

合同W9-2-1

2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で 発生した地震動の分析

平成20年5月22日

独立行政法人 原子力安全基盤機構

甲第 306 A

本報告の内容

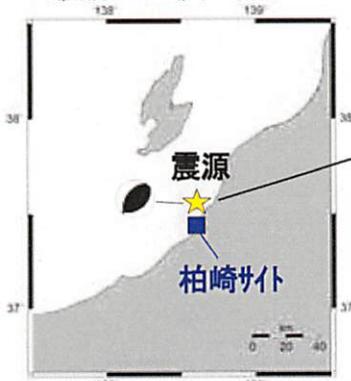
- I. 地震動の分析方法及び分析の条件
- II. 地震動発生要因の分析結果の概要
- III. 解析的手法による要因分析の詳細
 - III-1 震源断層の推定と震源特性による地震動への影響
 - III-2 深部地盤の地震動伝播特性による地震動への影響
- IV. 設計用地震動との比較による要因の整理
- V. 分析で得られた知見及び耐震バックチェックに反映すべき事項

I. 地震動の分析方法及び分析の条件

I (1)

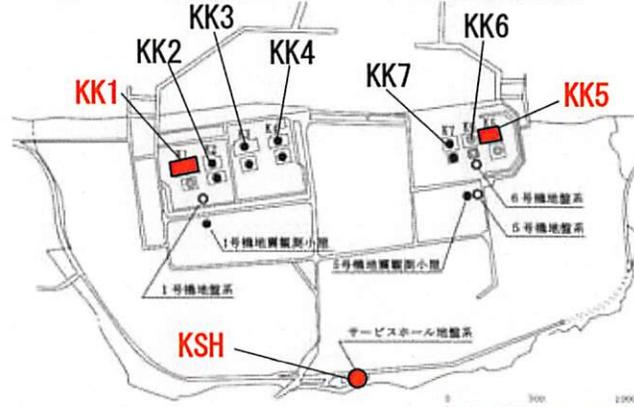
I-1 敷地概要及び地震動観測位置

■震源と地震の諸元

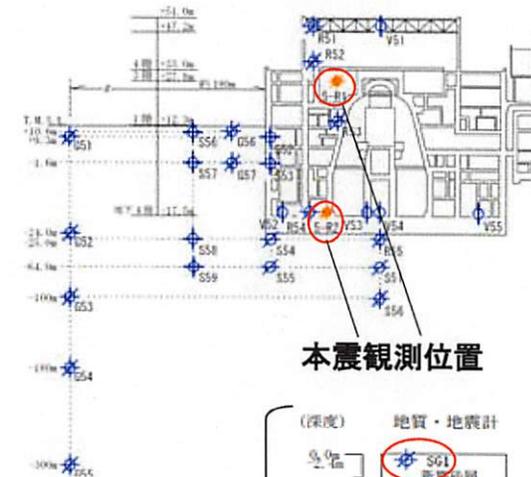


本震：
2007. 7. 16 10:13
Mj=6. 8
Mo=9. 3x10¹⁸ Nm
(F-net)
深さ=10km
震央距離=14km

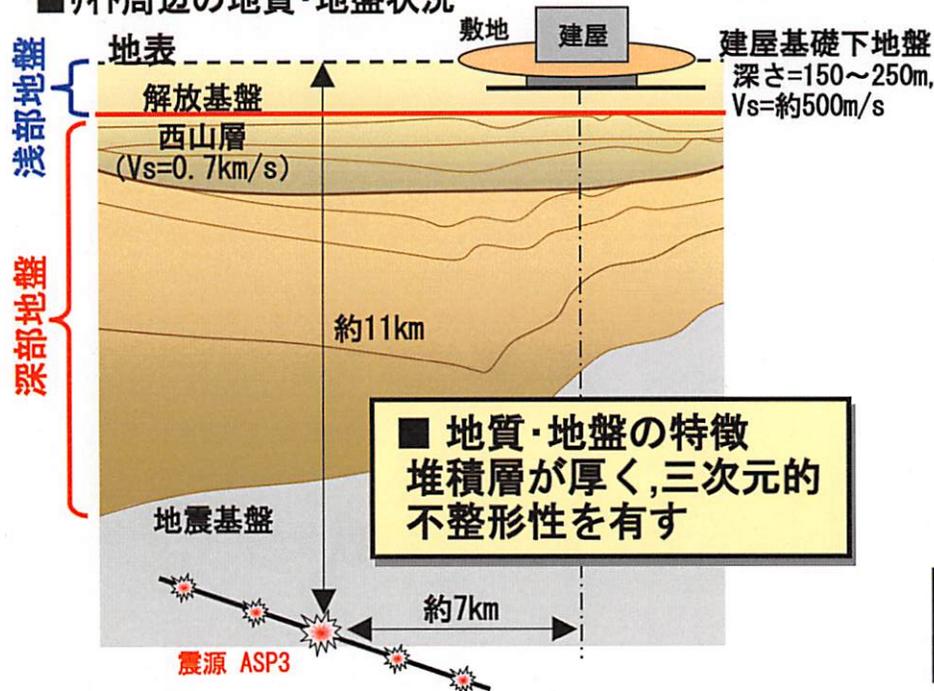
■1~7号機 (KK1~KK7) の位置関係



■5号 (KK5) 地震計設置位置

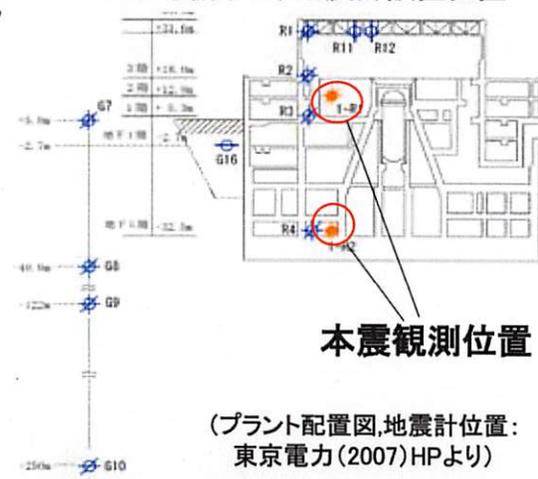


■サイト周辺の地質・地盤状況



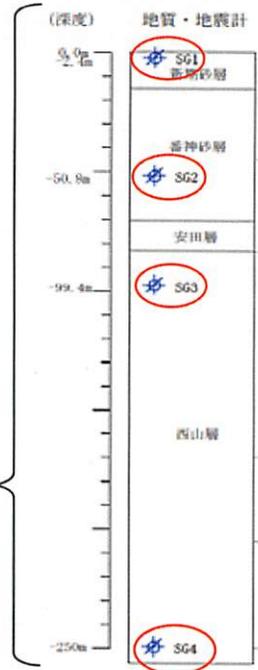
■地質・地盤の特徴
堆積層が厚く、三次元的
不整形性を有す

■1号機 (KK1) 地震計設置位置



(プラント配置図,地震計位置:
東京電力(2007)HPより)

地盤系の本震観測記録は、
サービスホールのみで収録



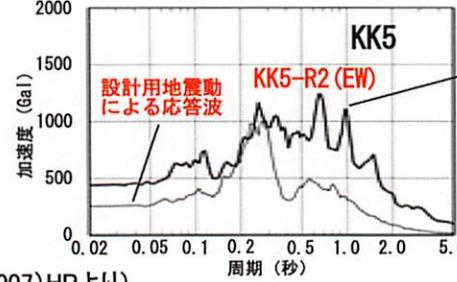
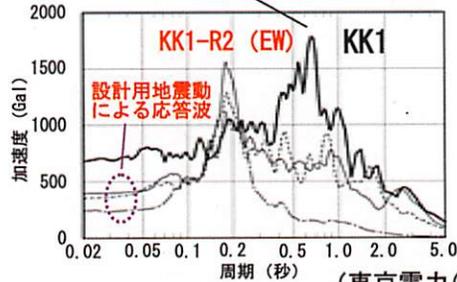
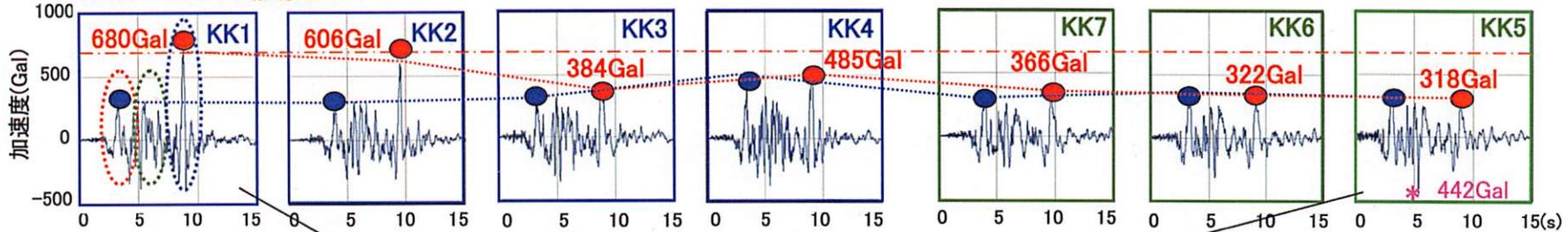
■サービスホール (KSH) 地震計設置位置

I-2 敷地で観測された地震動の特徴と設計用地震動

I (2)

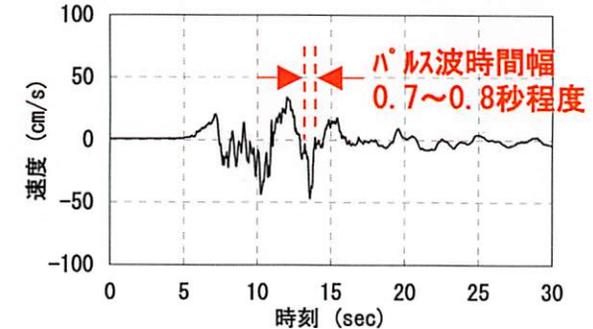
■ 各号機原子炉建屋基礎盤上観測波形 (EW方向)の特徴

3つのパルス波発生



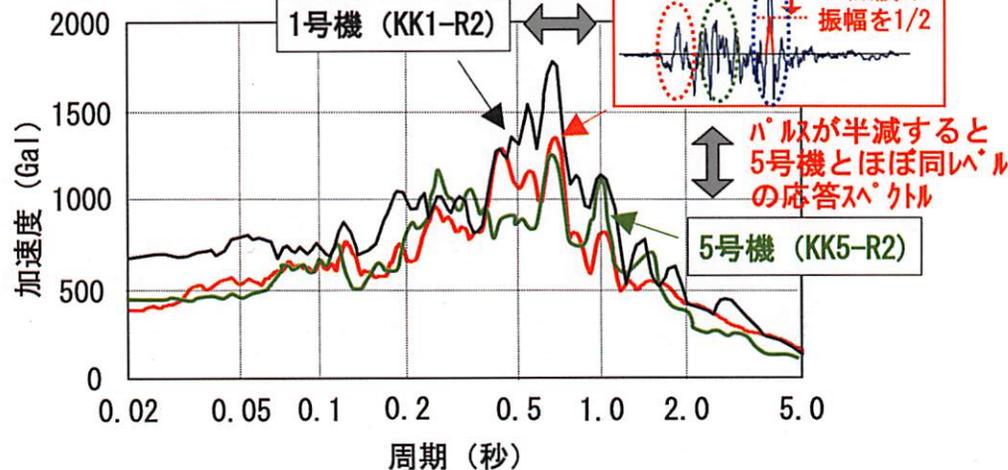
(東京電力(2007)HPより)

■ KSH地中波に見られるパルス波



■ 第3のパルス波の応答スペクトルに及ぼす影響の分析

パルス減少⇒ほぼ全周期帯でスペクトル減少



- 観測地震動の特徴と設計地震動
 - ・ KK1~KK7の建屋基礎版上の観測地震動は、設計を上回っている。特に、KK1とKK2が大きく、KK5側の約2倍。
 - ・ 観測記録には、3つのパルス波が発生。
 - ・ KK1の観測波形では、3番目のパルス波が地震動全体のレベルを引き上げている。

I-3 地震動の分析方法

- 観測地震動及び地質・地盤の特徴
- ① 各号機の観測地震動が設計値を上回る
 - ② KK1の地震動が最大で、KK5側の約2倍
 - ③ 各観測地震動には、3つのパルス波形
 - ④ KK1の地震動パルスに対し、3番目のパルスの影響が大きい
 - ⑤ 深部地盤に3次元的な不整形性があり、堆積層が厚い。

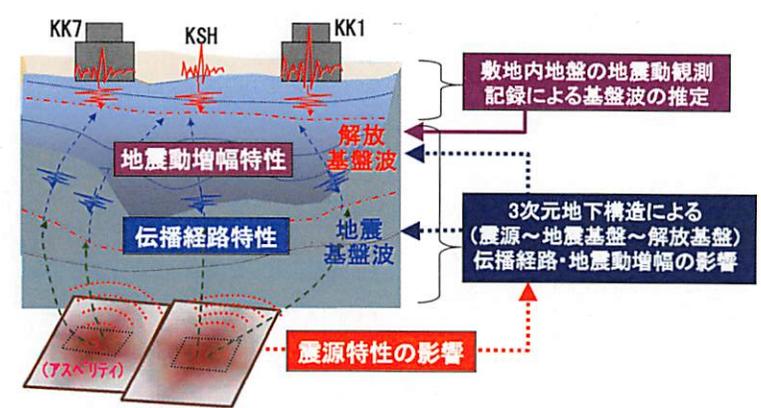
- 分析の内容
- (1) 1号機のパルス波増幅及び号機間のパルス波のレベル差の分析
 - ① 震源特性による影響の分析
 - ② 深部地盤の伝播特性による影響の分析
 - (2) 設計用基準地震動との比較による要因の整理
 - ① 解放基盤面上の地震動の推定
 - ② 耐専スペクトルとの差異分析

■ Ss策定において、他サイトに反映すべき事項のまとめ

- 得られた知見の整理
- (1) 柏崎特有の知見
 - (2) 他のサイトへ展開すべき知見

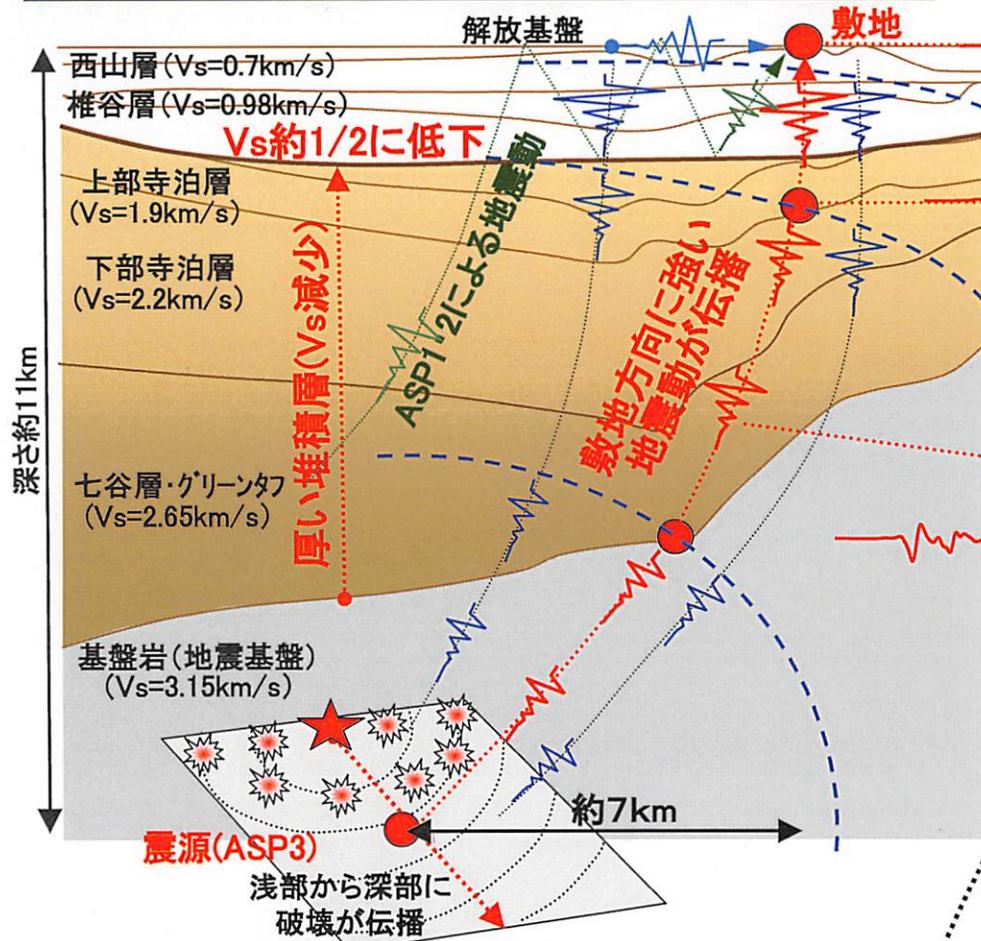
I-4 分析の前提条件

- ① 現時点の公開情報の範囲で実施。地震発生後に実施した東京電力の敷地及び周辺の調査結果は地下構造モデルに反映されていない。今後、調査等で得られた情報を含め逐次反映して検討する予定。
- ② 震源特性と深部地盤の影響に重点を置いて分析（パルスの発生周期帯を中心に解析）



II. 地震動発生要因の分析結果の概要

II (1)



■ 深部地盤の影響 (IV-2)

解放基盤付近の堆積層でVsの大幅な低下、反射波等との干渉によりパルス波が大きく増幅

↑

Vsが次第に減少する厚い堆積層を伝播する間に、パルス波が成長

↑

ASP3から放射された強い地震動が堆積層で屈折しながら敷地方向に伝播

■ 1号機側と5号機側の波形後半のパルス波のレベル差 (IV-3)

震源と深部地盤による3次元的な地震動伝播効果、解放基盤付近の堆積層での増幅効果等の違いにより、パルス波にレベル差が発生

⇒ 深部地盤による3次元的な伝播効果: 1号機側は5号機側の1.2~1.4倍

■ 震源特性の影響 (IV-1)

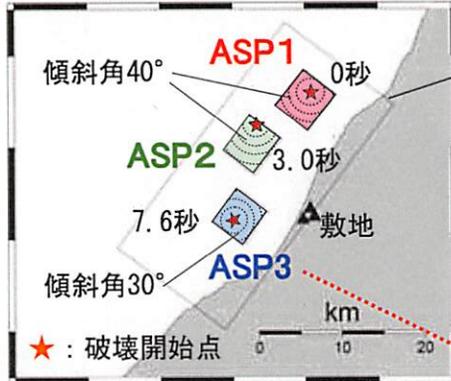
同規模の地震と比べ、地震動が大きい (短周期レベル約1.5倍)

3つのアスペリティ(ASP1~3)の破壊によりパルス波が発生

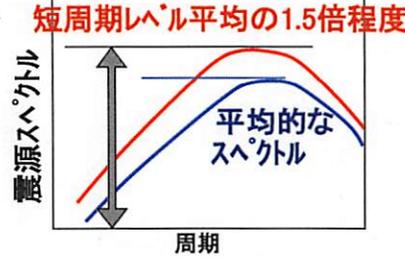
敷地極近傍のASP3から地震動の放射が大きい

■ 震源特性の影響

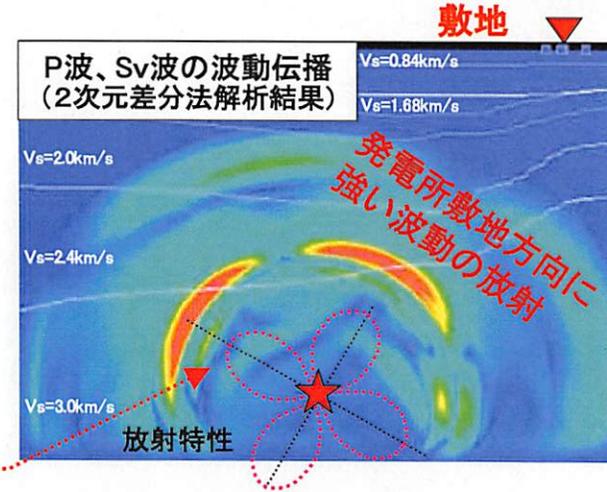
3つのアスペリティの破壊によりパルス波が発生



同規模の地震と比べ短周期側の地震動が大きい

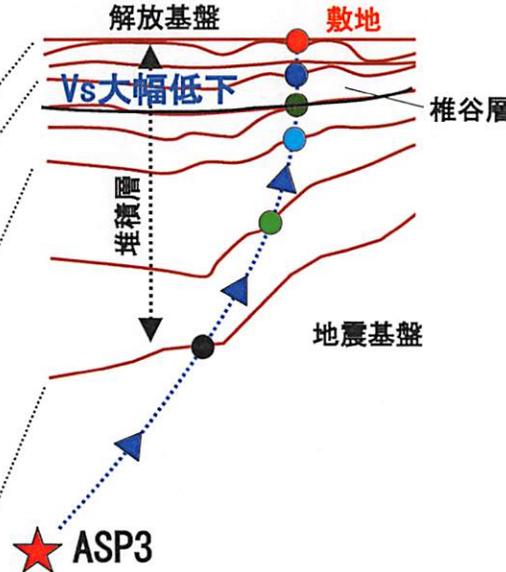
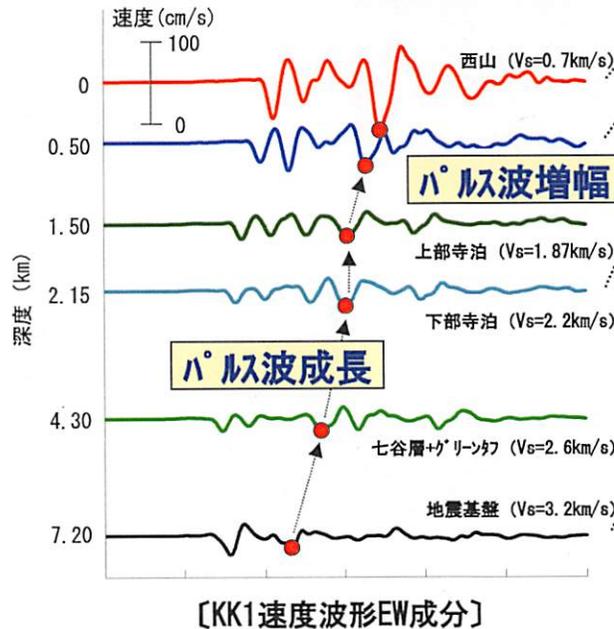


ASP3による敷地への放射大

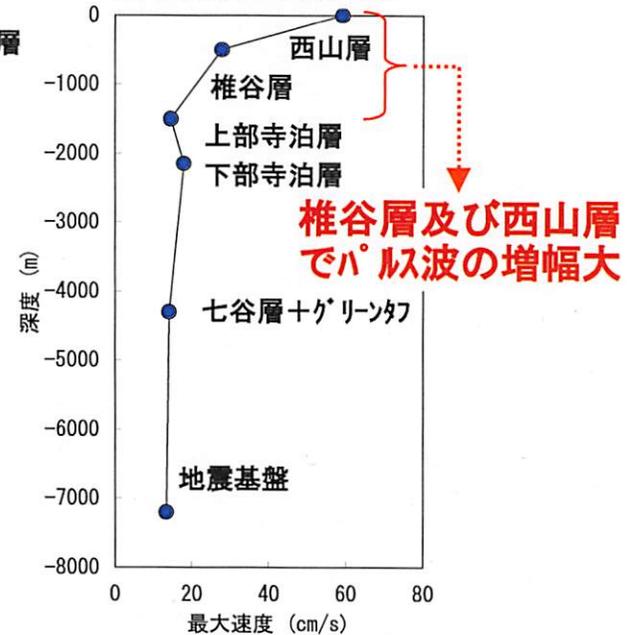


■ 深部地盤の影響

・ KK1のパルス波増幅の過程



パルス波 (EW) 最大速度の深さ方向分布

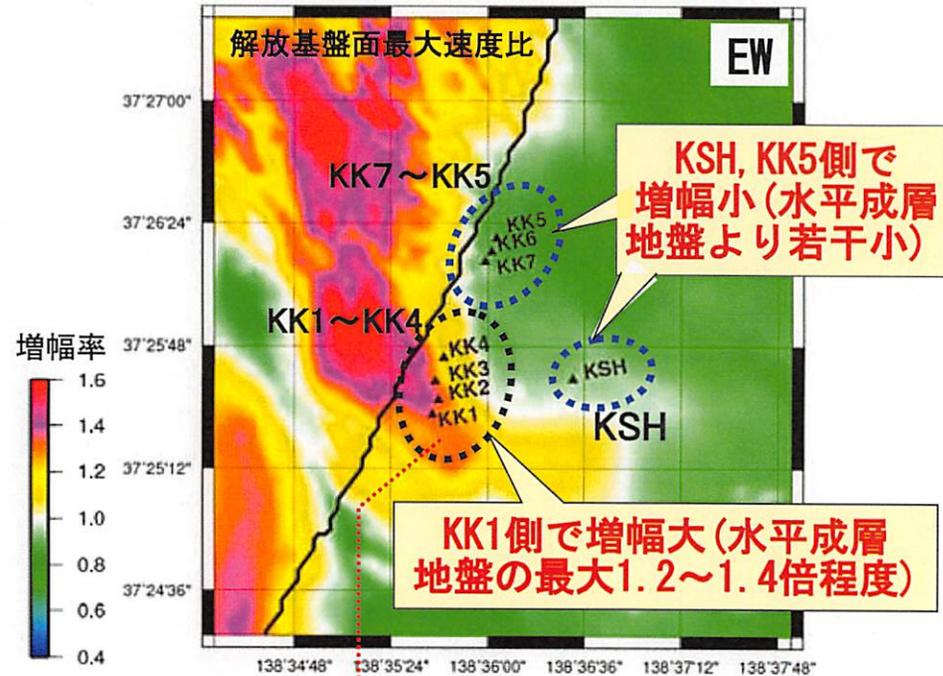
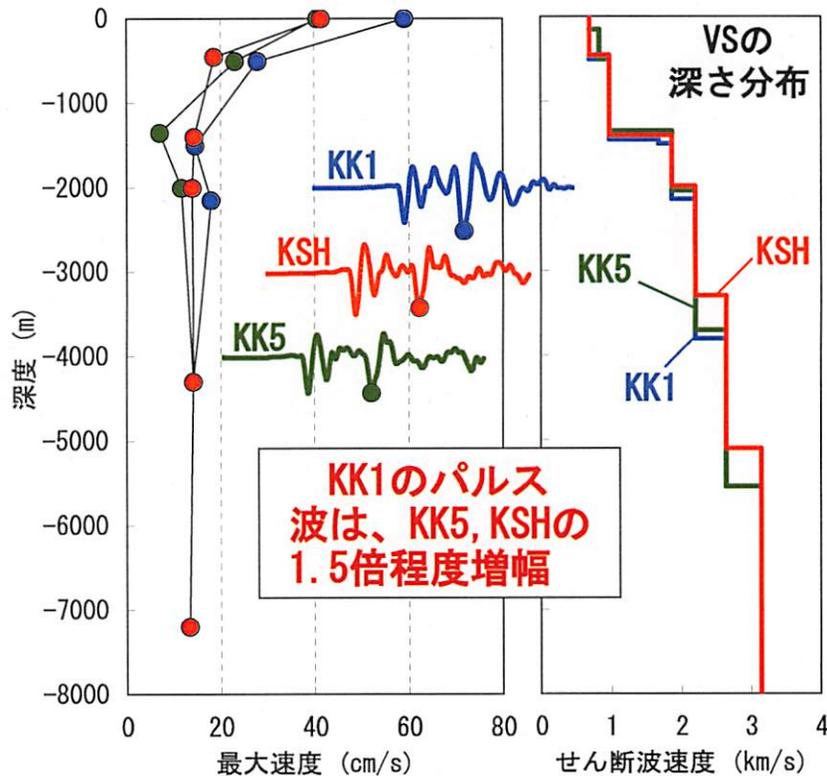


■ 1号機側と5号機側のパルス波のレベル差の要因

深部地盤による3次元的な伝播効果
による地震動レベルの違い

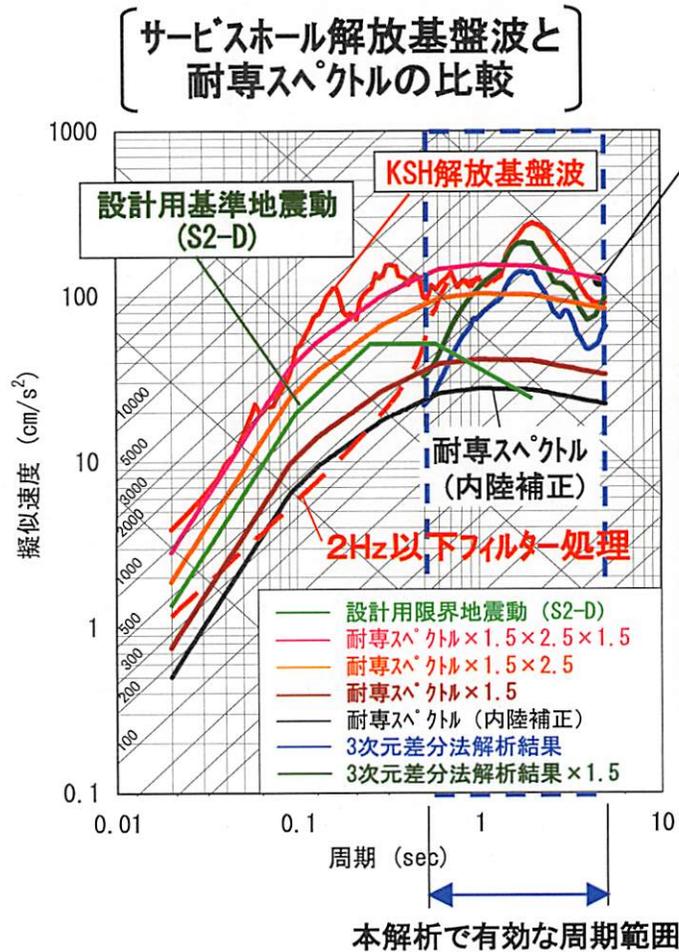
[3次元地盤モデルの最大速度/水平成層地盤の最大速度]

KK1・KK5・KSHのパルス波
増幅特性の比較



KK1周辺では3次元的な伝播効果により
最大1.5倍程度地震動が増幅

■ 設計用地震動との比較による要因の整理



耐専スペクトル(内陸補正) × 震源特性(約1.5倍)
 × 深部地盤(約2.5倍) × その他要因の影響(1.5倍程度)
 ⇒ サービスホールの解放基盤波の応答スペクトル
 (長周期側)と概ね対応

〔解析に基づく長周期領域(0.5秒以上)の差の検討結果〕

サイト名	S ₂ との比較*1	震源特性 の影響*2	深部地盤 の影響*3	その他要因 の影響*4
	耐専との比較			
サービスホール (KSH)	約2.5倍	約1.5倍	約2.5倍	1.5倍程度
	約5.5倍			
1号機 (KK1)	-	約1.5倍	約3.0倍	1.5倍程度
	7倍程度			
5号機 (KK5)	-	約1.5倍	約2.0倍	1.0倍程度
	3倍程度			

*1: 上段はKSH解放基盤波と旧指針による設計用基準地震動(S₂-D)との比較、
 下段は、解析結果等から推定したKSH解放基盤波と耐専スペクトルとの比較
 を示す。
 *2: 短周期側: 平均の1.5倍程度を考慮
 *3: 不整形性を伴う厚い堆積層による影響(震源の放射特性の影響を含む)
 *4: 3次元差分法による解析結果とKSHの応答スペクトルの差から約1.5倍と推定
 した。

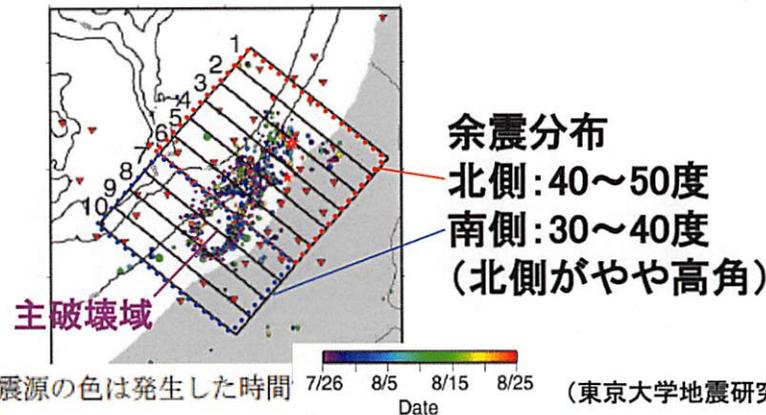
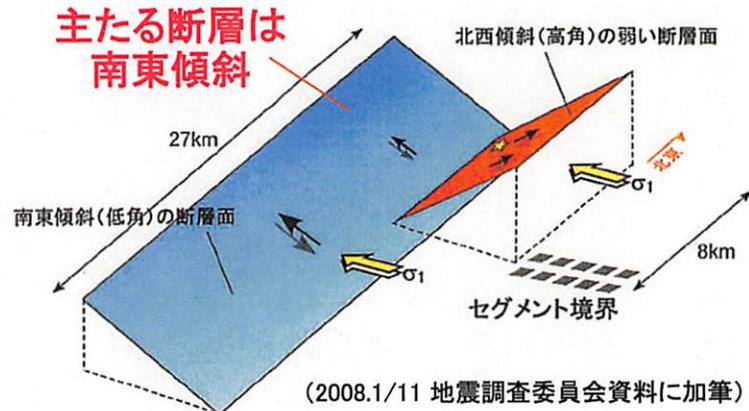
Ⅲ. 解析的手法による要因分析の詳細

Ⅲ-1(1)

Ⅲ-1 震源断層の推定と震源特性による影響の検討

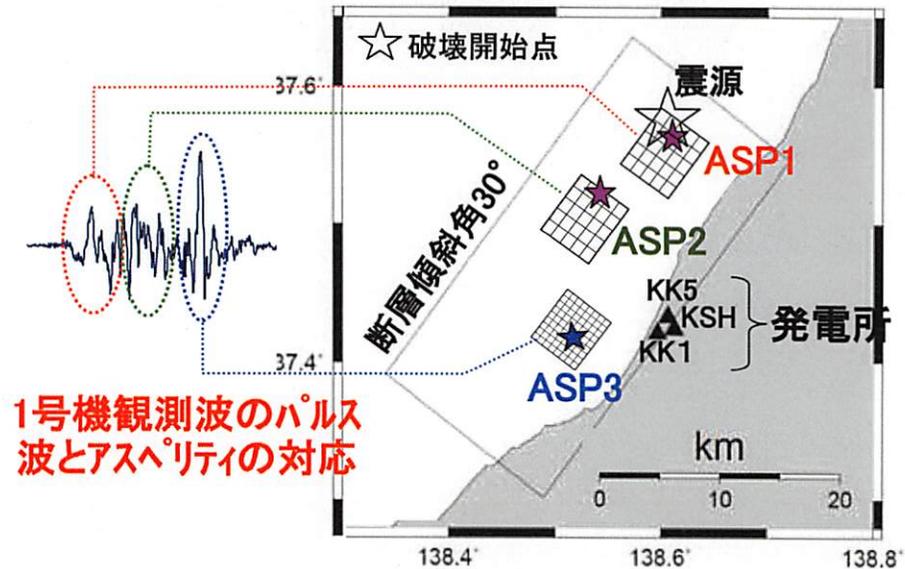
■ 震源断層の推定

- ① 余震分布や震源周辺の地震動観測記録から、主たる震源断層は南東傾斜で、主に3つのアスペリティが破壊したと推定
- ② 上記の震源断層を入倉や釜江等の断層モデルに基づいてモデル化。発電所及び周辺地域の観測点の地震動を経験的グリーン関数法で解析して観測記録との整合性を検討



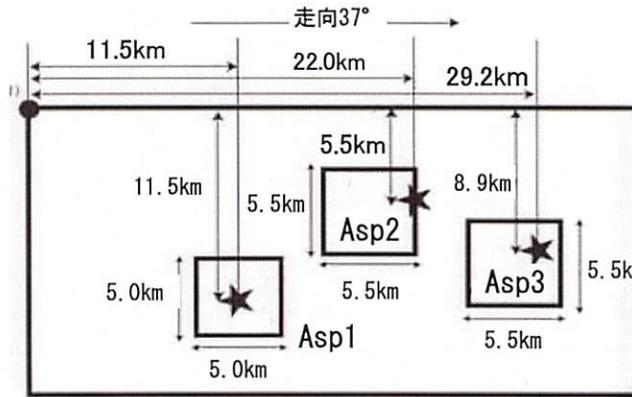
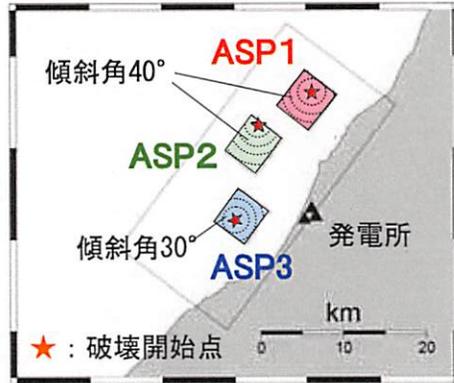
〔観測記録等から推定された震源断層モデル例〕

(入倉他HP(2008)の震源断層モデル)



■ 震源断層モデルの設定

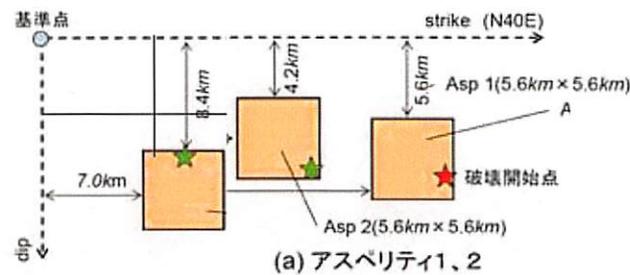
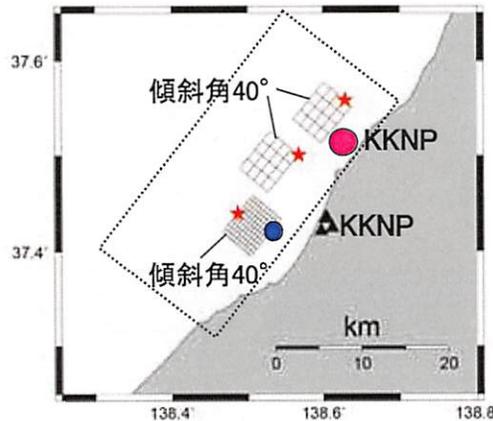
〔震源モデル1：入倉ほか(2007HP)を参考としたモデル〕



震源モデル1 断層パラメータ

ASP	断層パラメータ	
1	Mo (Nm)	1.69×10^{18}
	$\Delta \sigma$ (Mpa)	23.7
2	Mo (Nm)	1.69×10^{18}
	$\Delta \sigma$ (Mpa)	23.7
3	Mo (Nm)	1.02×10^{18}
	$\Delta \sigma$ (Mpa)	19.8

〔震源モデル2：釜江(2008HP)を参考としたモデル〕



震源モデル2 断層パラメータ

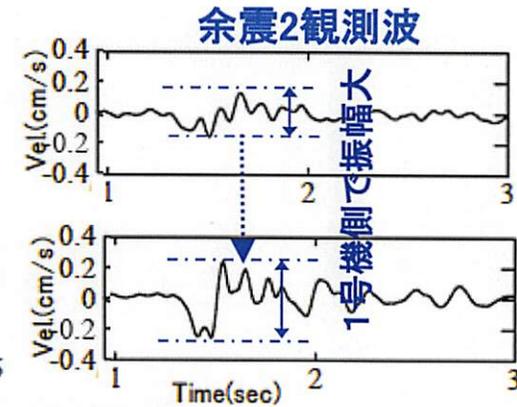
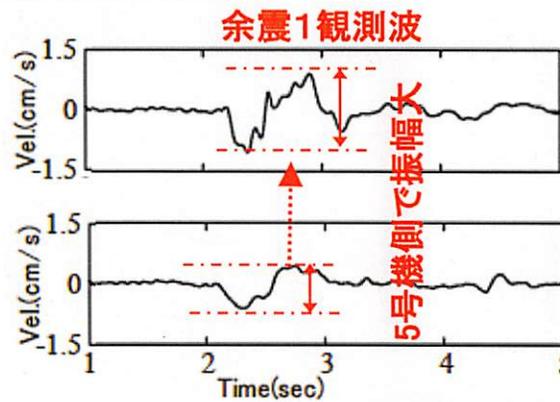
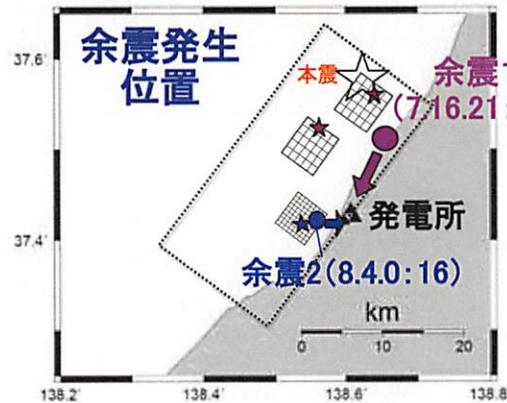
ASP	断層パラメータ	
1	Mo (Nm)	1.33×10^{18}
	$\Delta \sigma$ (Mpa)	18.4
2	Mo (Nm)	2.00×10^{18}
	$\Delta \sigma$ (Mpa)	27.6
3	Mo (Nm)	2.00×10^{18}
	$\Delta \sigma$ (Mpa)	27.6

■ 震源断層モデルの妥当性検討

経験的グリーン関数法による解析結果と観測記録の比較

〔経験的グリーン関数法に用いた要素地震波〕

地震動の到来方向を考慮して要素地震波の選定



(入倉他HP(2007)の資料を加筆・修正)

〔本震との特性違いを考慮した要素地震波の高周波減衰特性の補正<釜江(1990)>〕

fmaxの補正方法

地震規模によるfmaxの算定

$$f_{max} = 7.31 \times 10^3 \times M_0^{-0.12}$$

… Faccioli (1986)

〔本震と要素地震のfmax〕

⇒本震 : 6.0 Hz

余震1 : 13.7 Hz

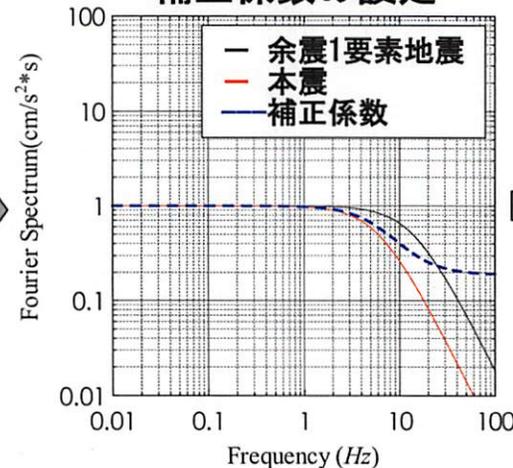
余震2 : 20.9 Hz

⇒高周波減衰特性

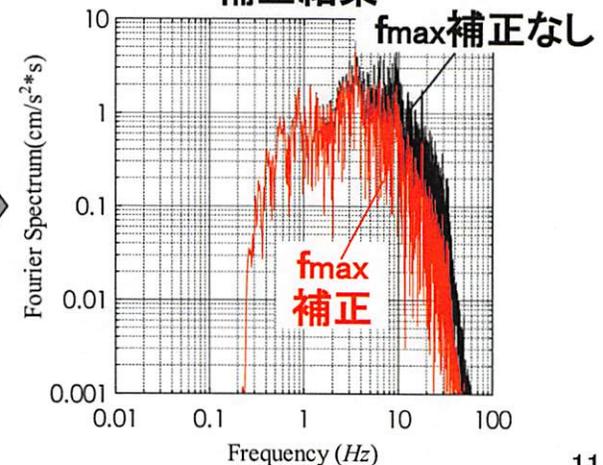
$$F(f) = 1 / [1 + (f/f_{max})^2]$$

… 香川・他(2003)

補正係数の設定

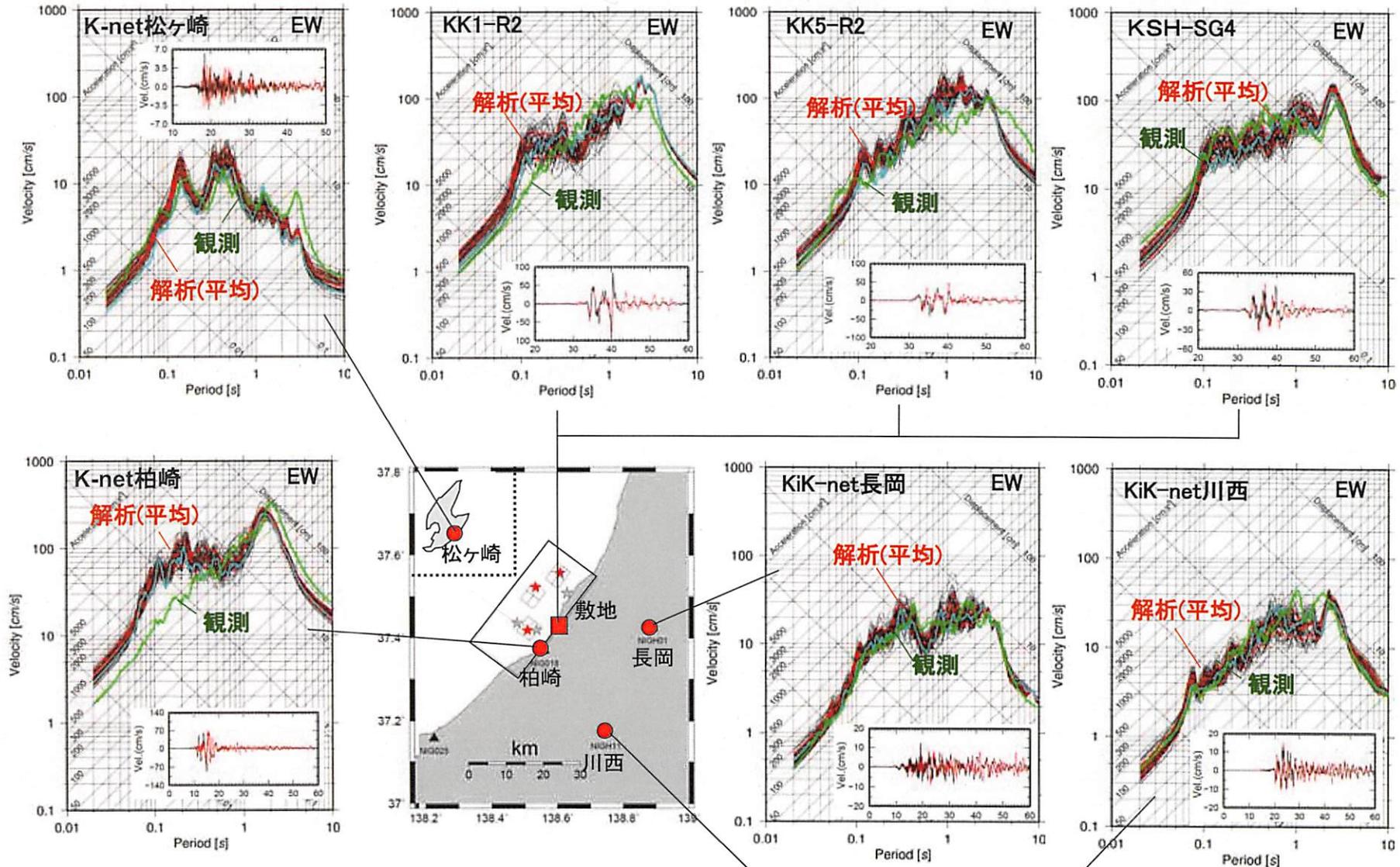


補正結果



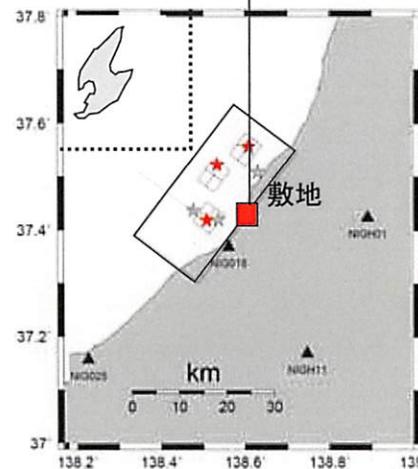
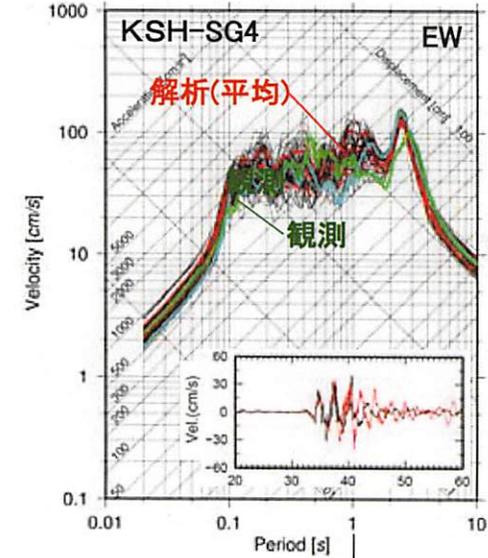
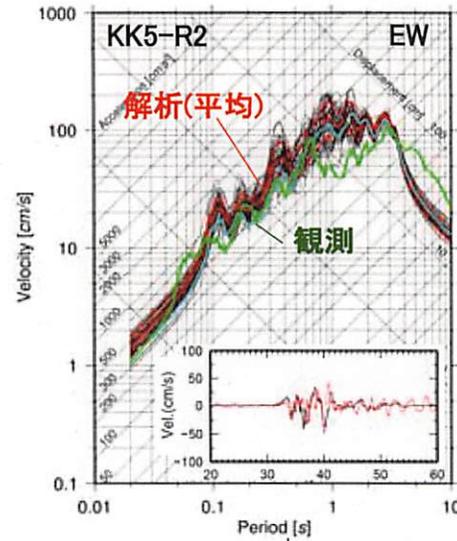
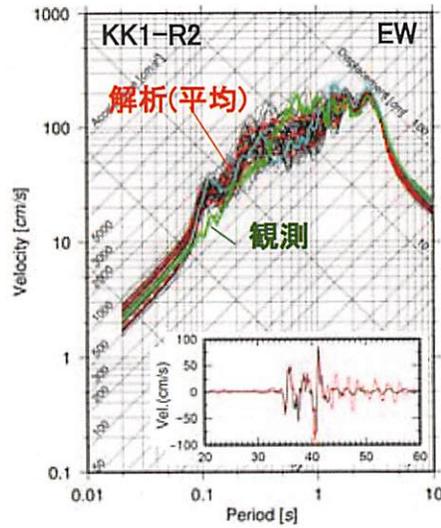
震源モデル1: 解析結果と観測記録の比較

(要素地震波フィルター処理⇒解析で有効な周波数0.3-10Hz)



■震源モデル2: 解析結果と観測記録の比較

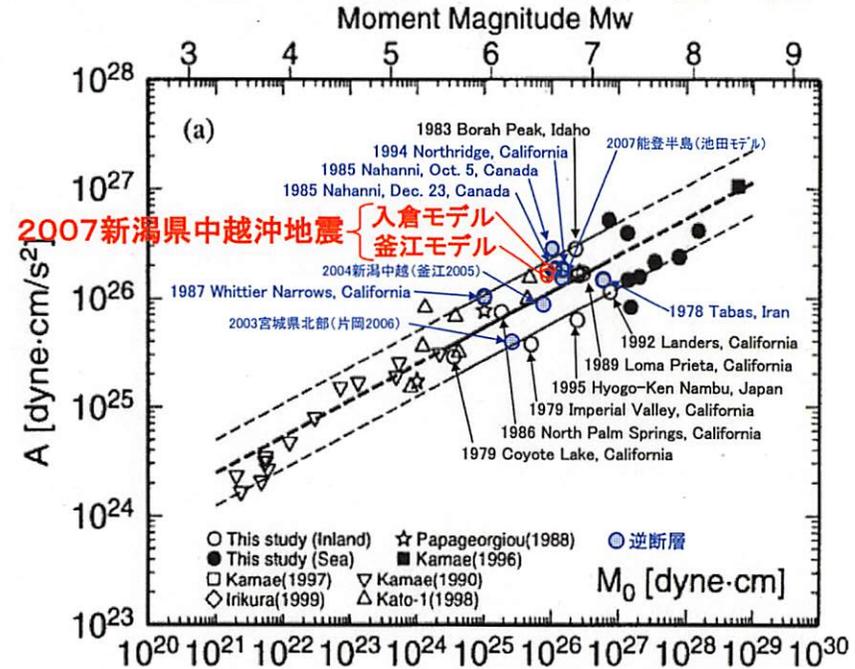
(要素地震波フィルター処理⇒解析で有効な周波数0.3-10Hz)



■敷地に対する震源特性の影響(1)

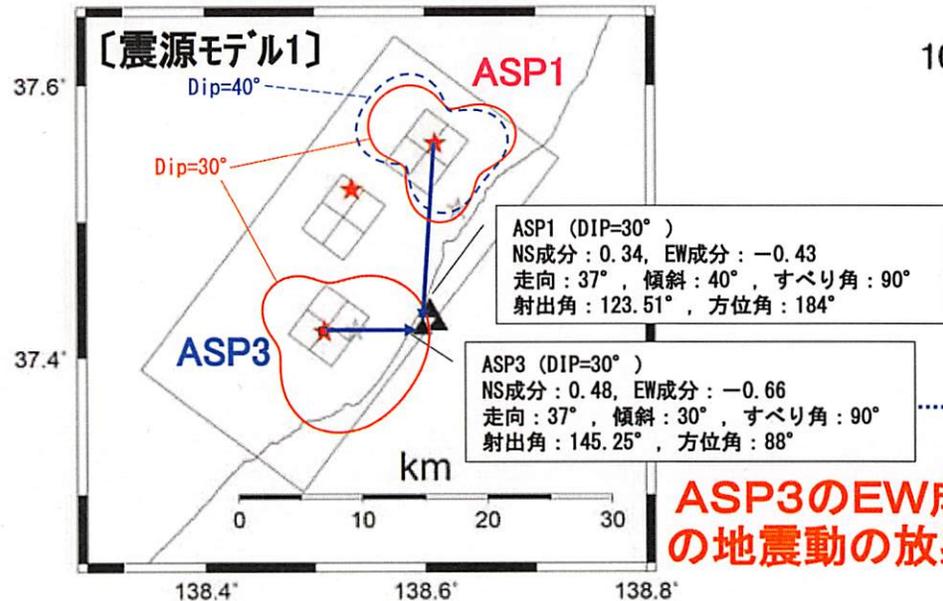
- ①震源断層モデルから推定される短周期レベルは、同規模の地震(Mj6.8)の平均より1.5倍程度高い。
- ②アスペリティ3は敷地に極近く、発電所に強い地震動を放射
- ③各アスペリティの破壊形式(破壊開始点、開始時間、破壊伝播方向)がパルス波増幅の一要因

〔今回の地震の短周期レベル:平均の約1.5倍〕

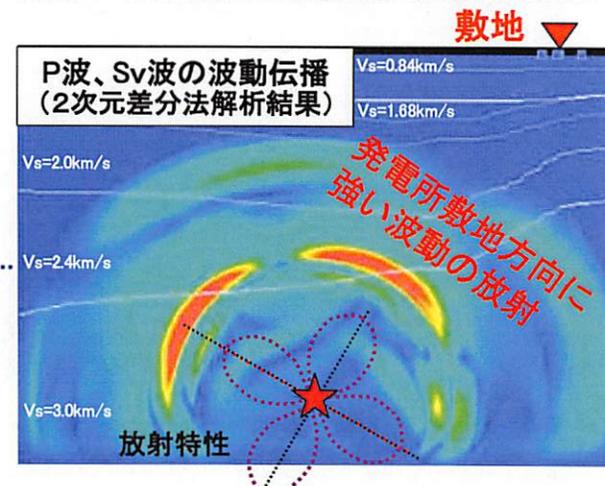


(壇 一男他(2001)日本建築学会構造系論文集(第545号)より)

〔震源からの放射特性の影響〕

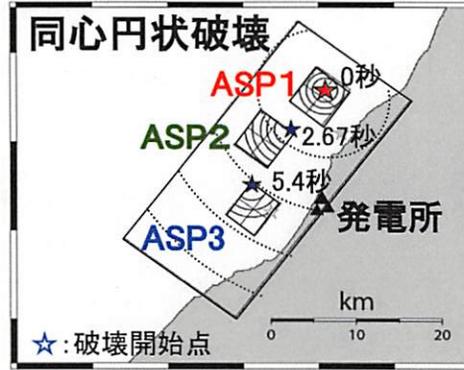
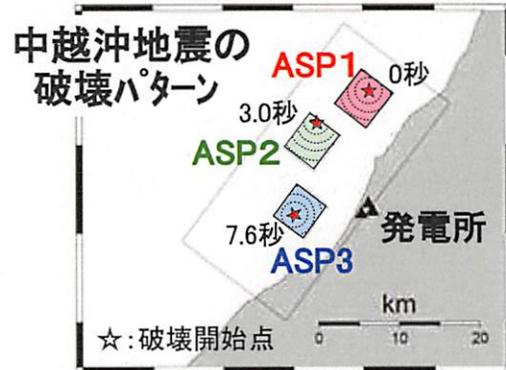


ASP3のEW成分の地震動の放射大

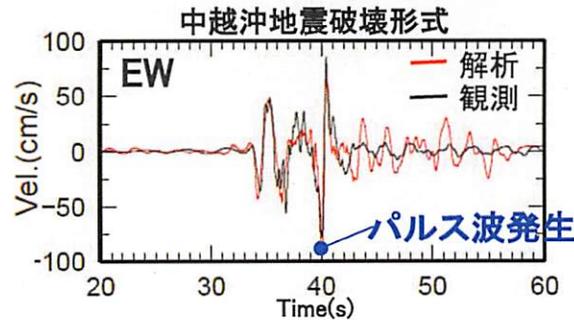


■敷地に対する震源特性の影響(2)

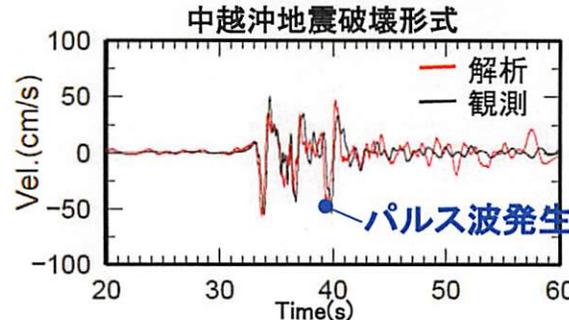
断層破壊形式による地震動特性への影響



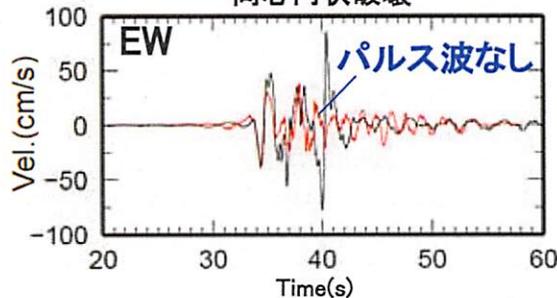
〔KK1-R2速度波形比較〕



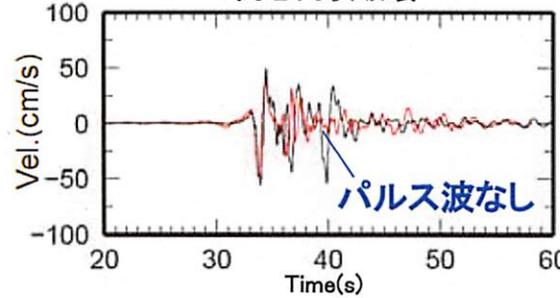
〔K5-R2速度波形比較〕



同心円状破壊



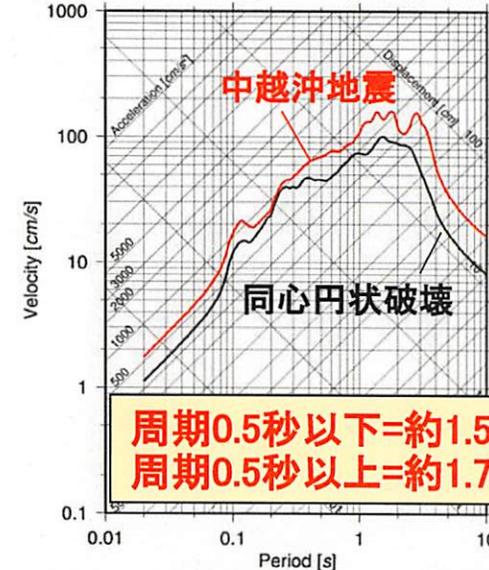
同心円状破壊



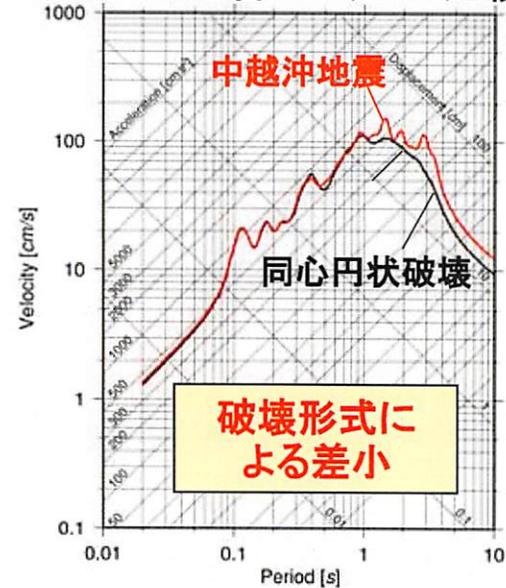
(要素地震波フィルター処理⇒解析で有効な周波数0.3-10Hz)

Ⅲ-1(7)

〔KK1-R2応答スペクトル比較〕



〔KK5-R2応答スペクトル比較〕

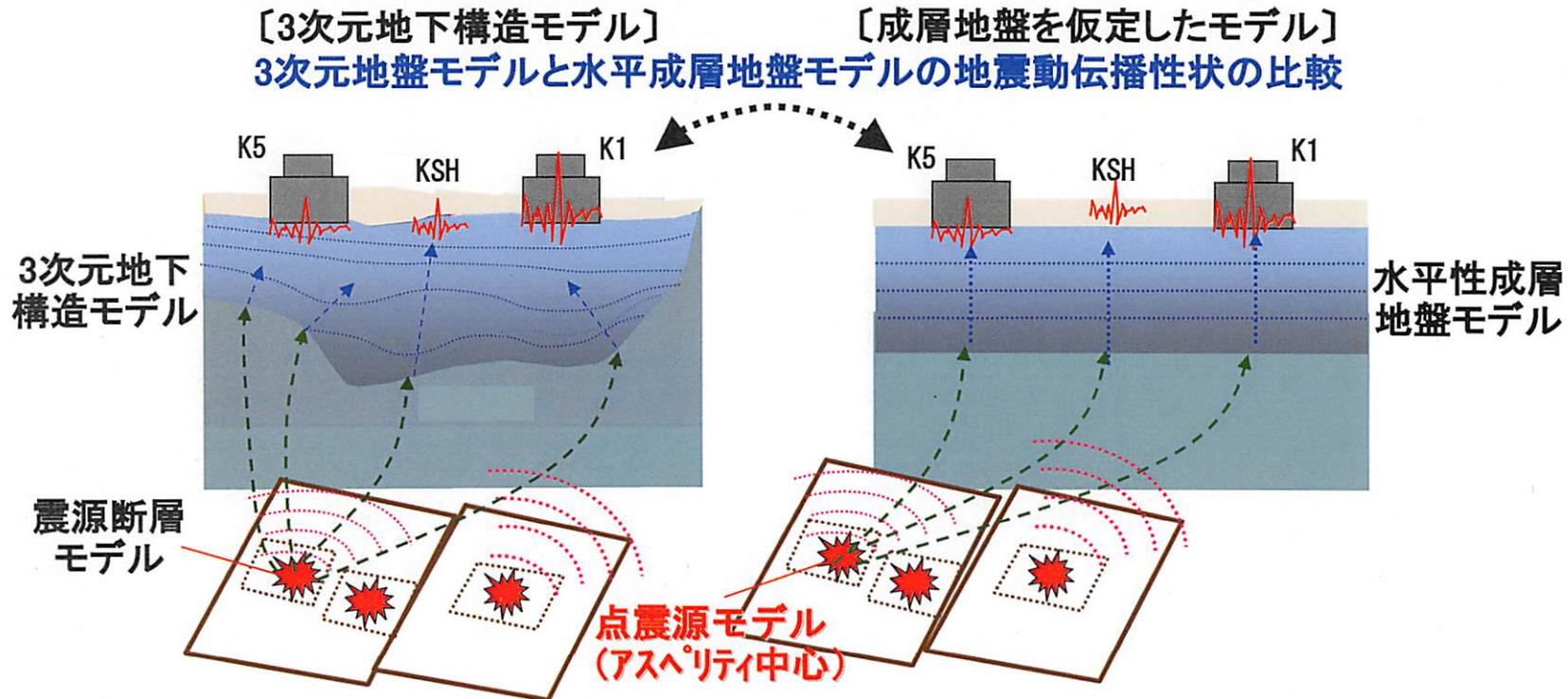


Ⅲ-2 深部地盤の地震動伝播特性による地震動への影響

■地震動の伝播性状の解析及び分析方法

- ①アスペリティ中心に点震源を設定した地震動解析
⇒各アスペリティからの地震動の伝播性状の把握
⇒各号機のパルス波の増幅特性の分析
- ②アスペリティの断層破壊を考慮した地震動解析
⇒1号機におけるパルス波の増幅特性の分析
⇒号機間のパルス波の増幅特性の比較
⇒深部地盤による3次元地震動伝播効果の分析

・3次元差分法による地震動解析
(パルス波の周期帯を含む長周期側の地震動の解析)
・②は、主に震源モデル1の解析結果について分析

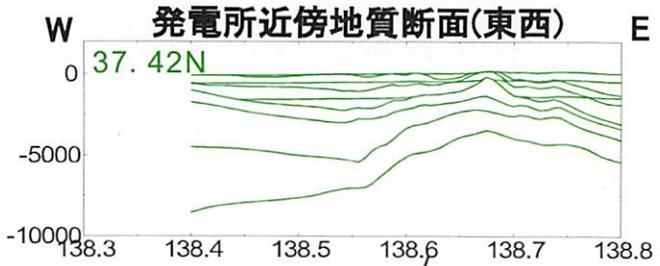
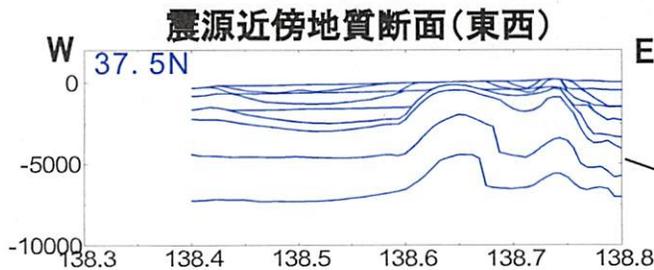


■ 推定した3次元地下構造モデルとその特徴

- ① 旧石油公団の基礎試錐、反射法探査、ボーリング調査等のデータや地質図から地下構造を推定。余震記録を用いて速度構造を同定。
- ② 上記地下構造では、敷地直下の深部地盤の急な傾斜帯や敷地北東の背斜構造等、震源からの地震動の伝播経路に不整形な構造有り
- ③ 敷地周辺では地震基盤が約5~8kmと非常に深く、上部に堆積岩が厚く堆積

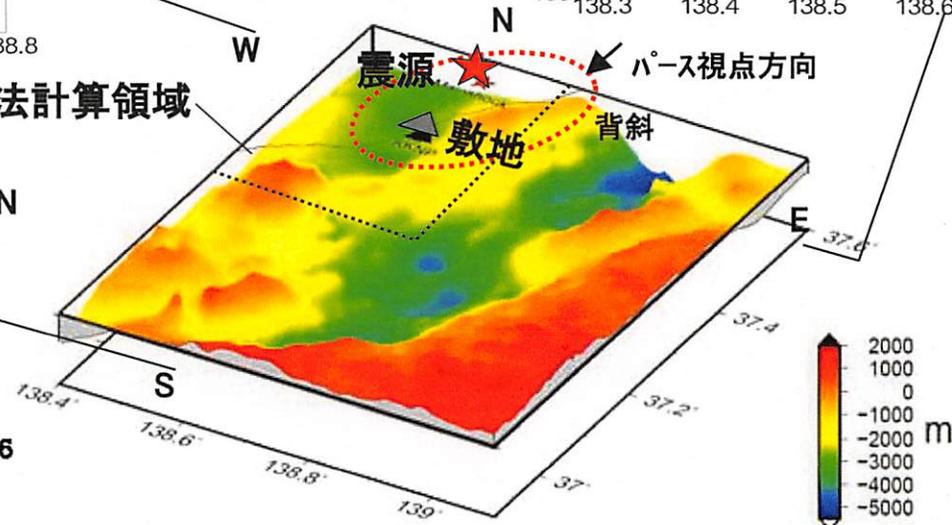
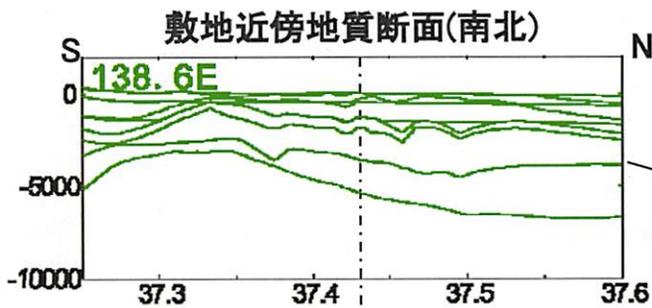
III-2(2)

〔地層断面パース(各層上面を表示)〕

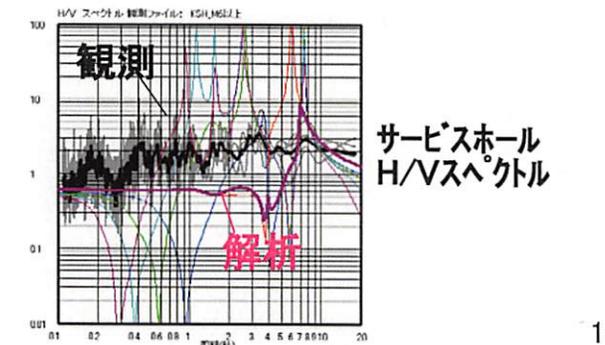
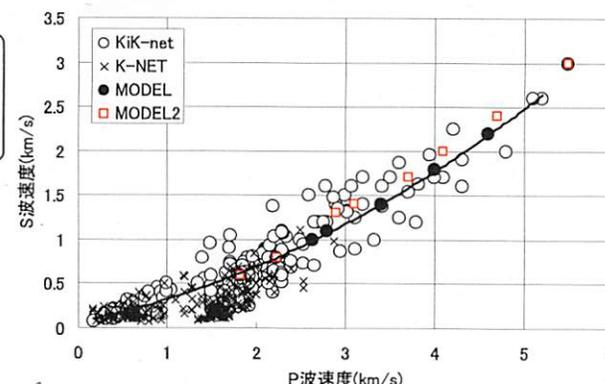
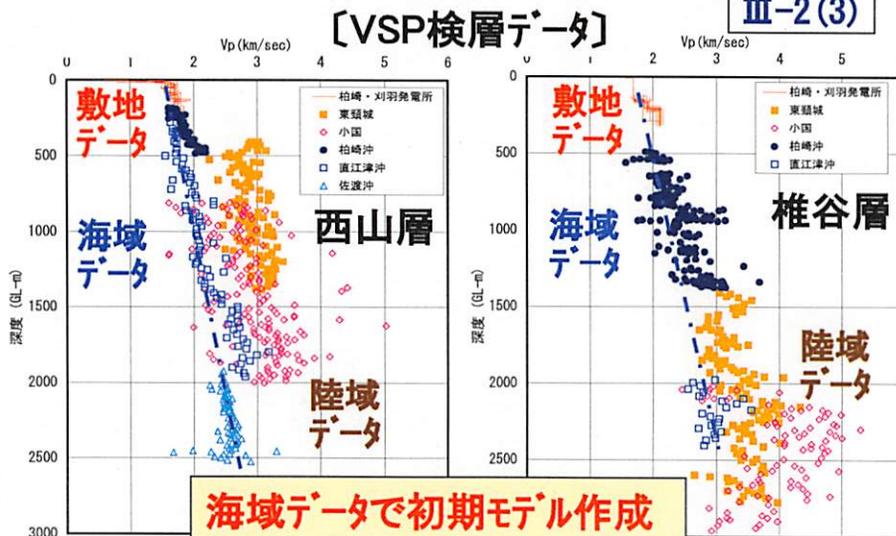
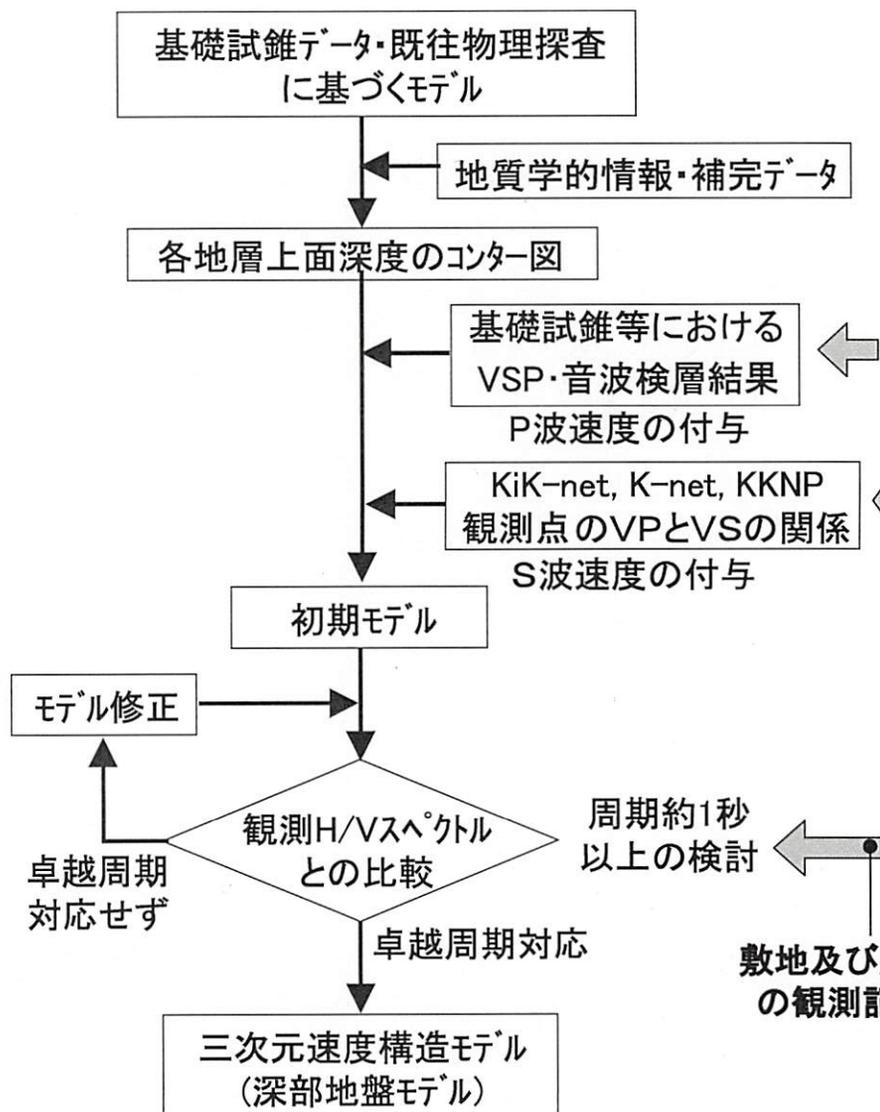


下部寺泊層 (Vs=2.2km/s)
上面震度コンター図

差分法計算領域

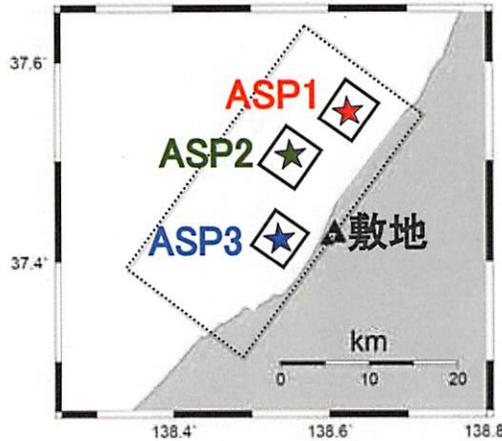


■地下構造モデル作成方法



■ 震源モデルの設定

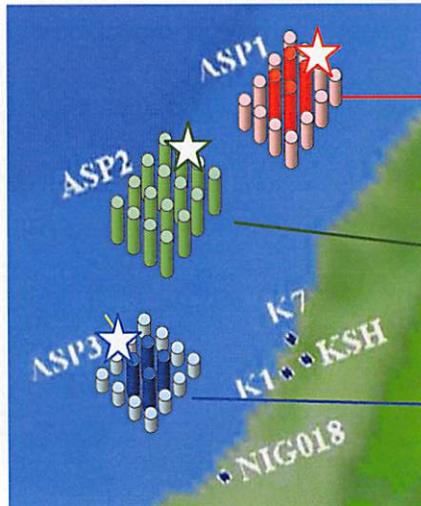
〔点震源モデル〕



	Mo (Nm)	深さ (km)	走向 (度)	傾斜角 (度)	すべり角 (度)
ASP1	1.69×10^{18}	10	40	40	90
ASP2	1.69×10^{18}	8.3	40	40	90
ASP3	1.02×10^{18}	11.3	40	30	90

震源時間関数: 三角形型時間関数、継続時間: 1秒

〔震源断層モデル 1〕

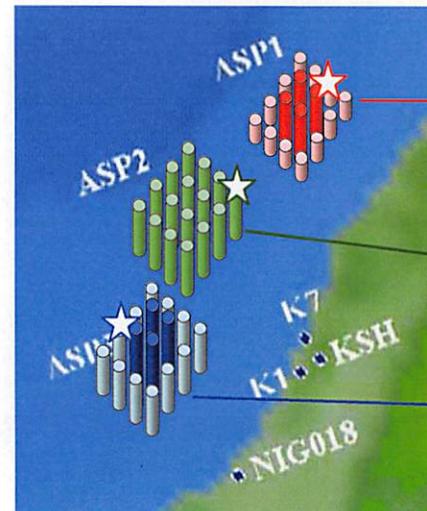


ASP1: 傾斜角40度
Mo=1.69x10¹⁸ Nm
(分布=中央2: 周辺1)

ASP2: 傾斜角40度
Mo=1.69x10¹⁸ Nm
(分布: 一定)

ASP3: 傾斜角30°
Mo=1.02x10¹⁸ Nm
(分布=中央2: 周辺1)

〔震源断層モデル 2〕



ASP1: 傾斜角40度
Mo=1.33x10¹⁸ Nm
(分布=中央2: 周辺1)

ASP2: 傾斜角40度
Mo=2.00x10¹⁸ Nm
(分布: 一定)

ASP3: 傾斜角40°
Mo=2.00x10¹⁸ Nm
(分布=中央2: 周辺1)