

6号機の上下動が大きいことについて
- 観測記録の分析及び理由の考察 -

〔平成21年5月19日（改）〕

平成21年6月17日

東京電力株式会社

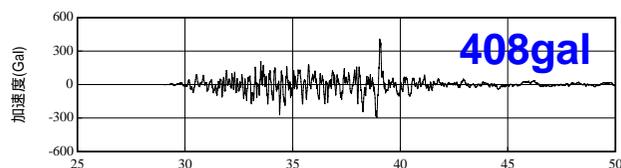


東京電力

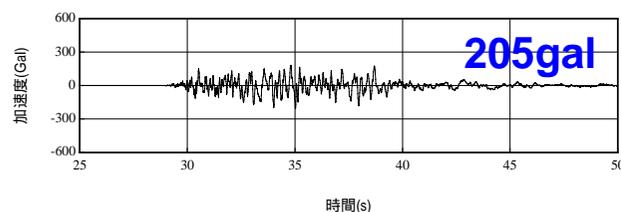
中越沖地震で観測された基礎版上の観測記録

原子炉建屋基礎版上の上下動は、6号機が最も大きい。
(最大値の生起時刻は35秒付近)

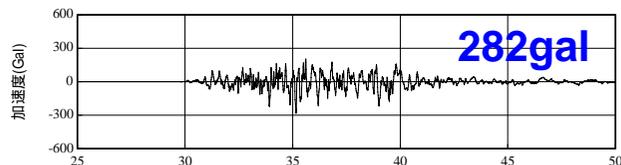
1号機



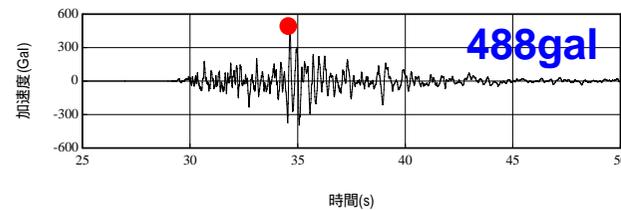
5号機



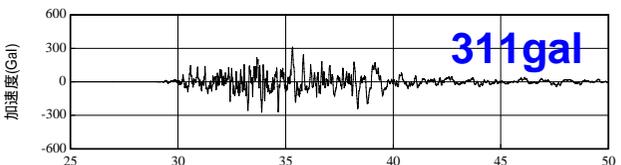
2号機



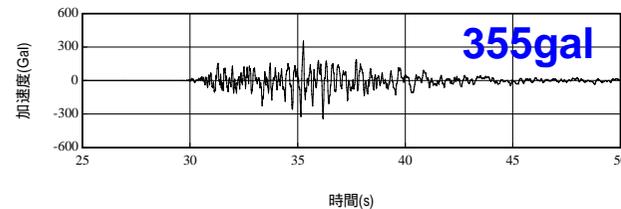
6号機



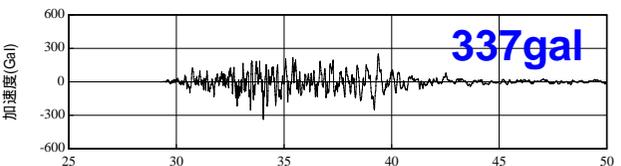
3号機



7号機

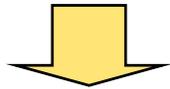


4号機



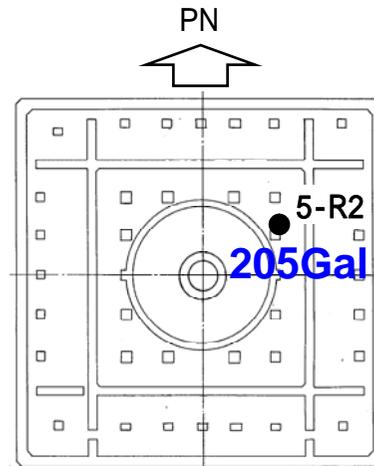
5号機、6号機、7号機の地震計配置位置

同じ大湊側でも、6号機上下動の最大加速度が特に大きい。
何故、この差が生じたのか？

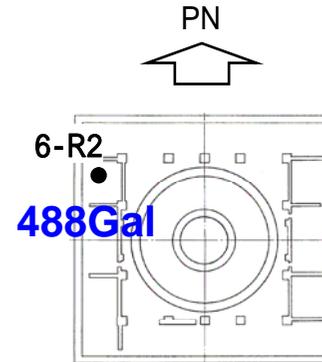


建屋ロッキングの影響

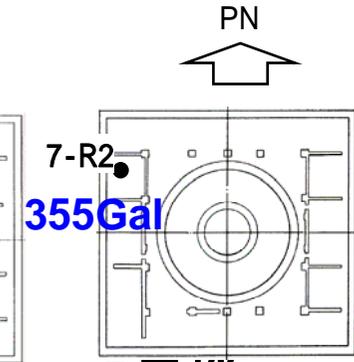
地震計は各号機とも建屋の中心から離れた位置にある。
地震時に建屋は水平方向に振動（スウェイ振動）するとともに回転方向に振動（ロッキング振動）する。
地震計の観測値は、このロッキング振動の影響を受けている可能性がある。



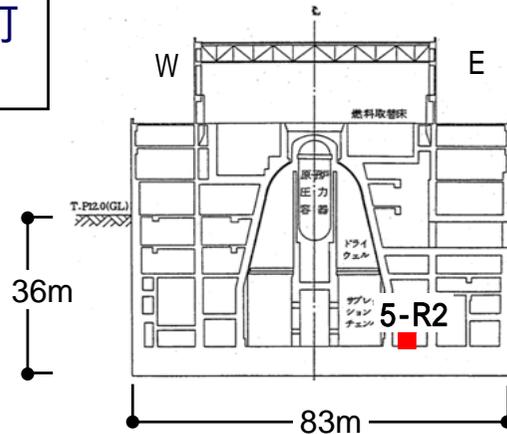
5号機



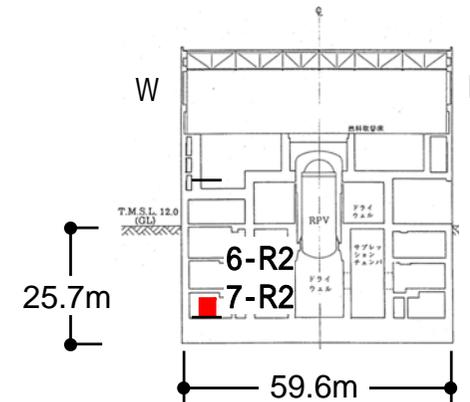
6号機



7号機

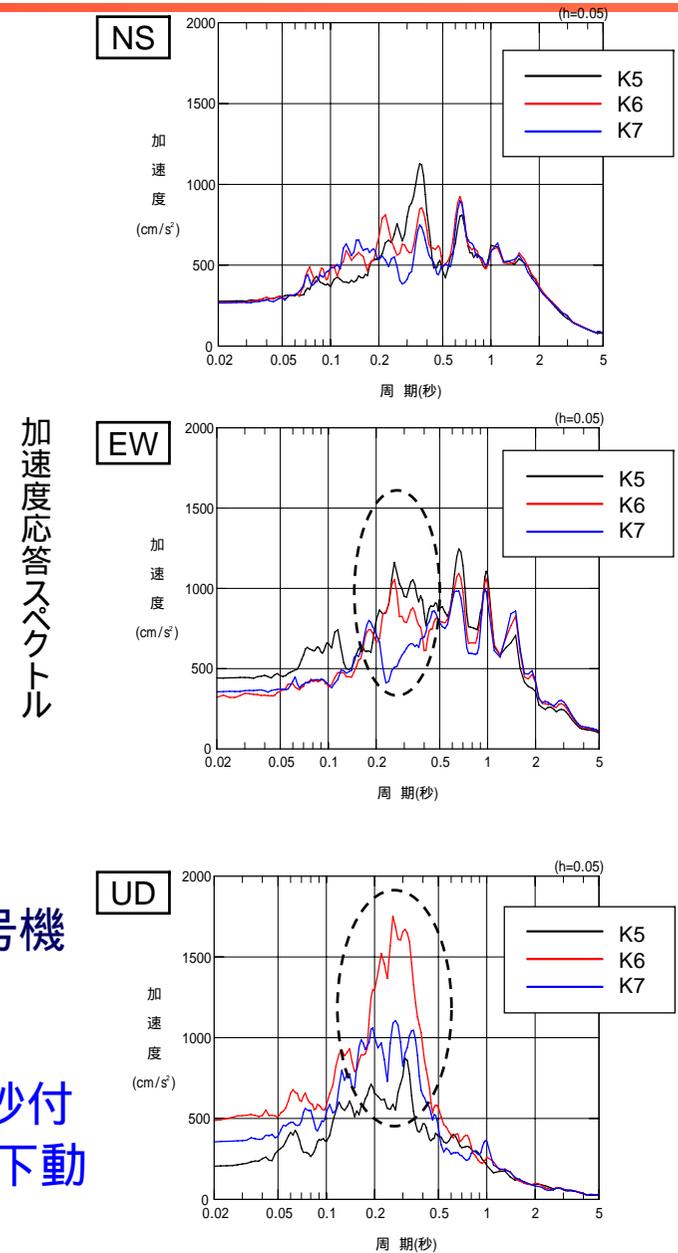
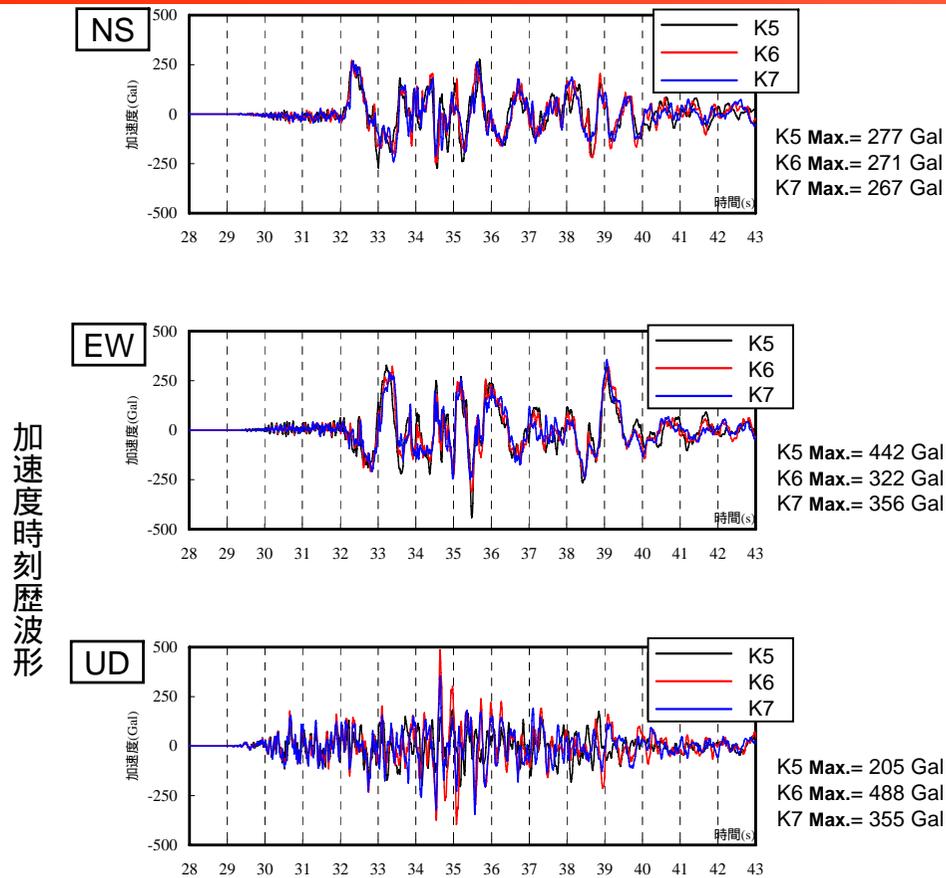


5号機



6号機 / 7号機

5号機、6号機、7号機の基礎版上記録の比較



水平動はEW方向の周期0.3秒付近で5号機と6号機が大きい。
 上下動は周期0.3秒付近で6号機が特に大きい。
 原子炉建屋のロッキング振動の固有周期は0.3秒付近であり、ロッキングの影響により各号機の上下動の相違が生じた可能性が高いと考えられる。

6号機の上下動が大きい理由について

< 仮説 >

水平方向（特にEW成分）の入力動（ロッキングの固有周期に対応する0.3秒付近）が7号機に比べ5号機 / 6号機で大きかった。

水平方向地震動のロッキング固有周期に対応する周期帯のパワーが同一の場合には、5号機に比べ6号機 / 7号機の方がロッキングの影響を受け易い。

以上から、結果として6号機で大きな上下動が記録されたものとする。

< 検討事項 >

検討1：本震の上下動の観測記録から、シミュレーション解析から推定されるロッキング振動を除き、純粋な上下動を推定し比較する。

検討2：余震記録を用いて、シミュレーション解析を介さずに実際の記録により「検討1」が妥当なものかを検証する。

検討3：なぜ固有周期0.3秒付近のEW成分の入力が、7号機に比べ5 / 6号機で大きかったのかということについて、地下構造の影響による可能性について検討する。

ロッキング振動のイメージ

5号機と6/7号機の相違点

- 6/7号機の方が建屋幅が短い
- 建屋重心位置はほぼ同程度
- 新設地震計は、5号機の方が建屋の中心に近い位置にある

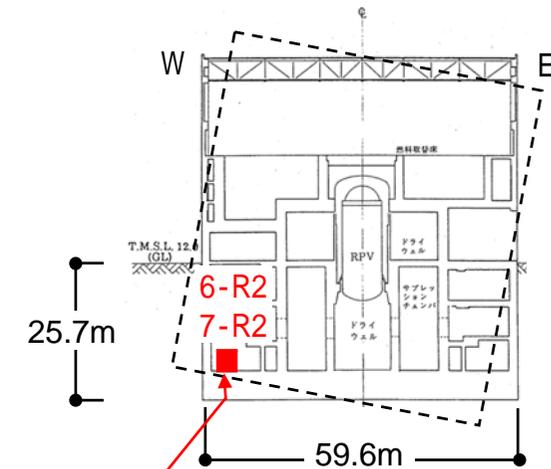
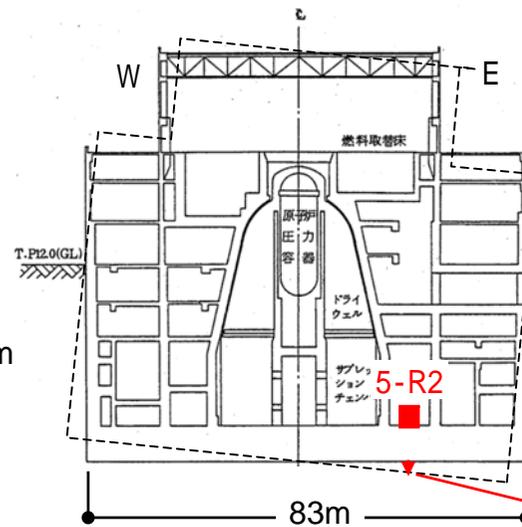
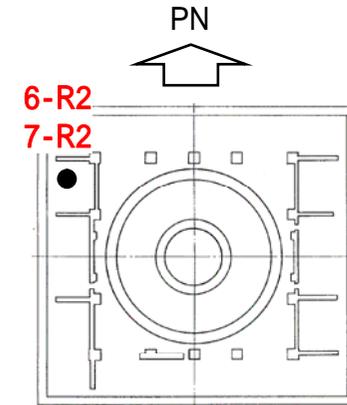
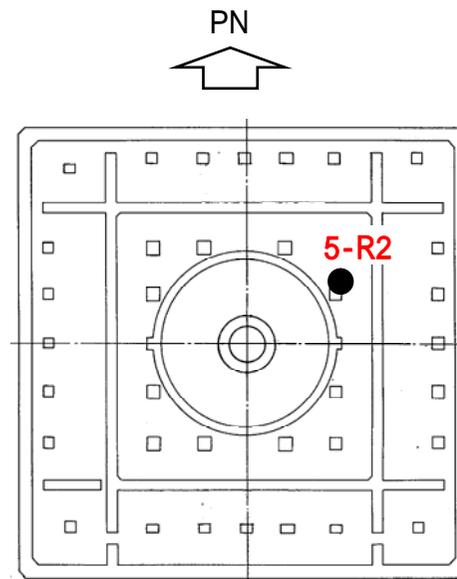


考察

- 建屋の形状から6/7号機の方がロッキング振動を励起し易い
- 地震計の配置から、6/7号機の方がロッキングによる上下動記録が入りやすい



- 5号機に比較し、6/7号機の記録には、ロッキング振動による上下動成分が多く含まれると考えられる

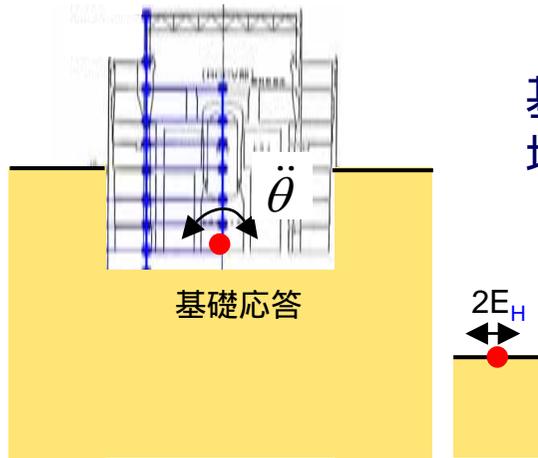


5号機

ロッキングによる上下動

6 / 7号機

ロッキング振動の励起しやすさの比較

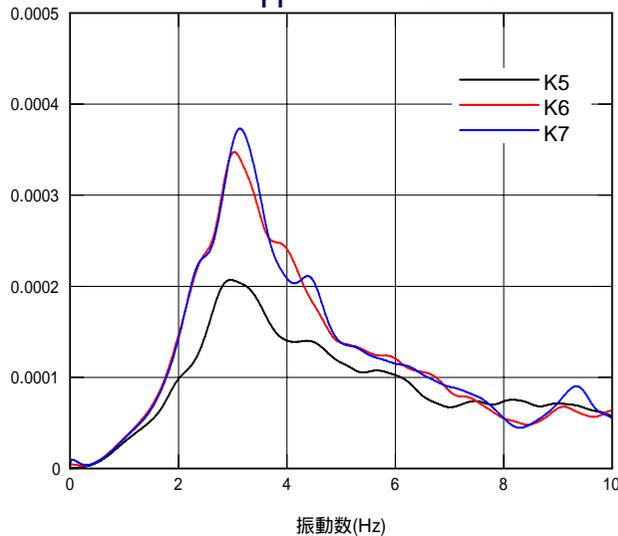


伝達関数の算定
 基礎版の観測記録から解放基盤波を推定した時に用いた地震応答解析モデルを用いて、次の伝達関数を算定した

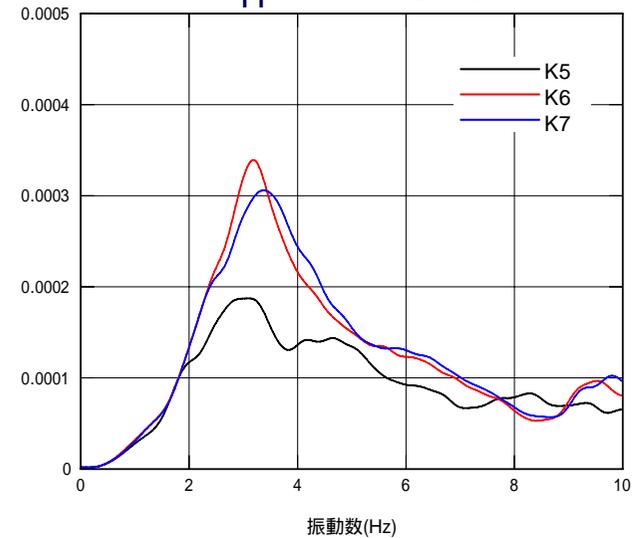
$$T_H: \text{基礎回転角加速度} \ddot{\theta} / \text{解放基盤水平} 2E_H$$

(注)・基礎回転角加速度は解析に基づく
 縦軸の単位 = $\frac{\text{rad/s}^2}{\text{Gal}}$

T_H NS方向

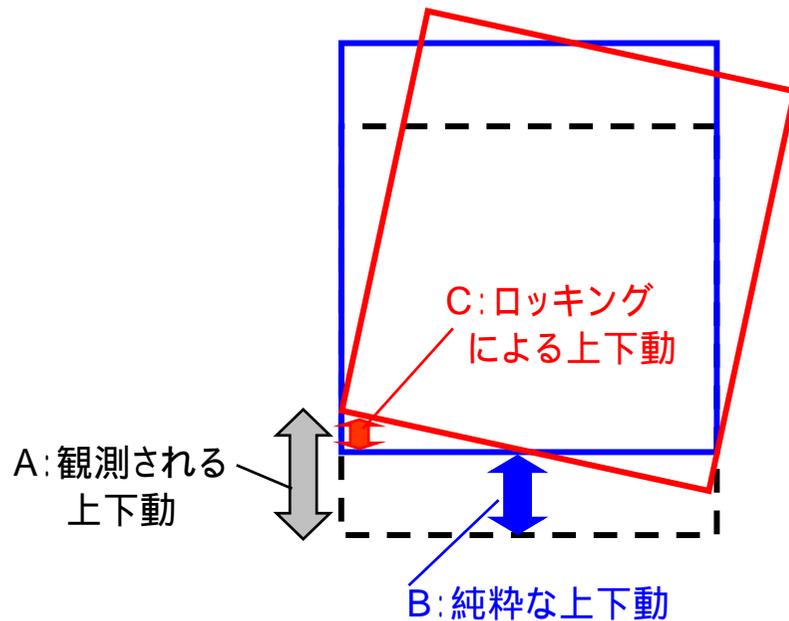


T_H EW方向



検討 1 : 本震記録による検討 (剛体のロッキングによる上下動について)

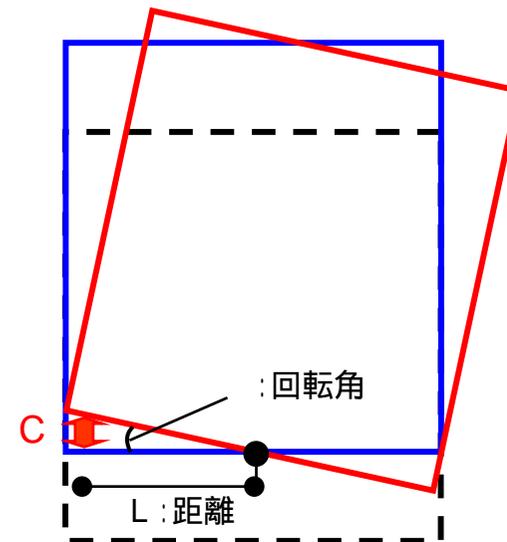
(1) 観測された上下動は、純粋な上下動とロッキングによる上下動の和と考えられる



観測される上下動

$$A = B + C$$

(2) ロッキングによる回転角が既知であれば、ロッキングによる上下動を確定することができる



ロッキングによる上下動

$$C \quad \times \quad L$$

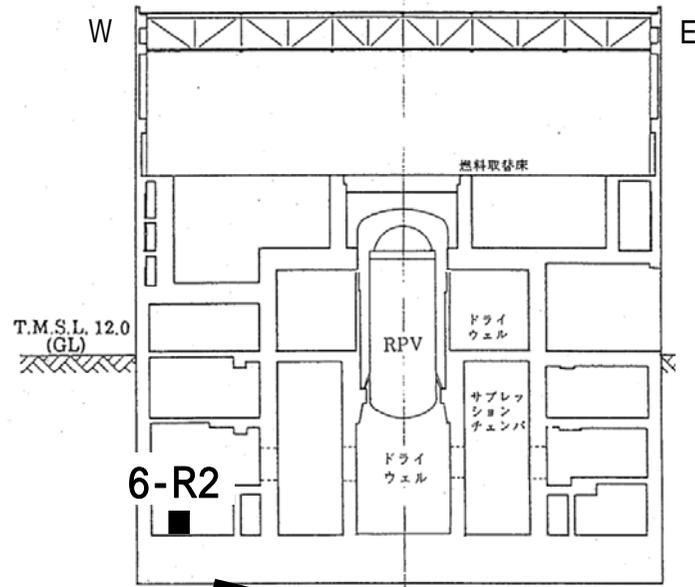
(が微小である場合)

検討 1 : 本震記録による検討 (検討概要)

本震時に観測された上下動記録とシミュレーション解析から得られた回転角を用いて、5号機～7号機基礎版の純粋な上下動を試算する。

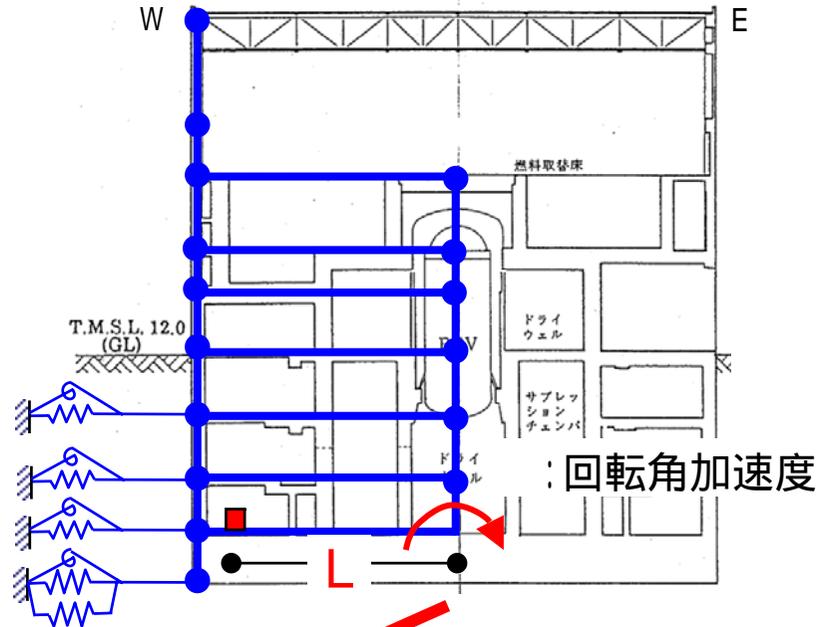
< 仮定 > 原子炉建屋を剛体と仮定
 ロッキング中心は建屋中心にある

観測による上下動記録



観測上下動

シミュレーション解析による回転角



ロッキング上下動

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測上下動} - \text{ロッキング上下動} \times L$$

検討 1 : 本震記録による検討 (6号機の検討)

< 解析条件 : 全号機共通 >

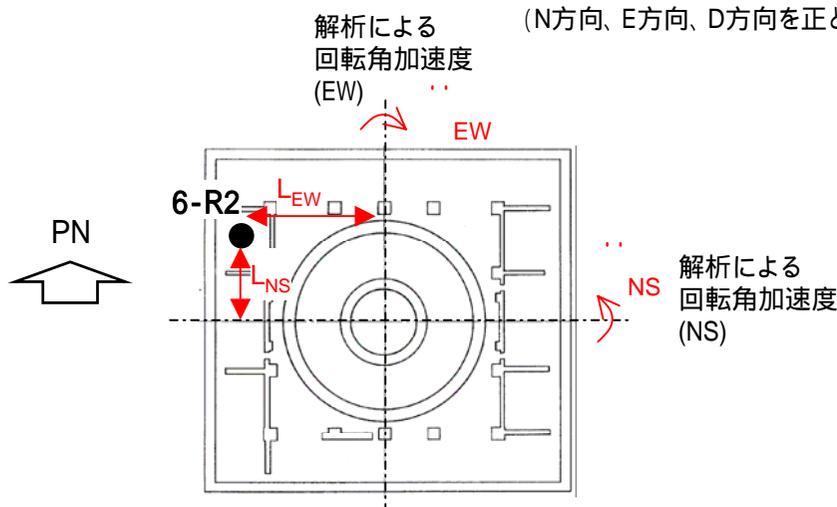
NS方向のロッキング成分とEW方向のロッキング成分の両方を考慮する
 加速度記録を用いて検討する

6号機の場合

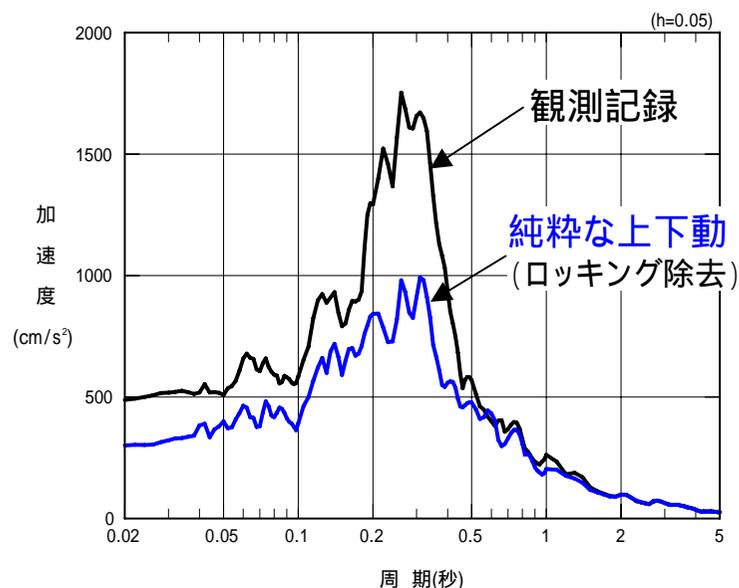
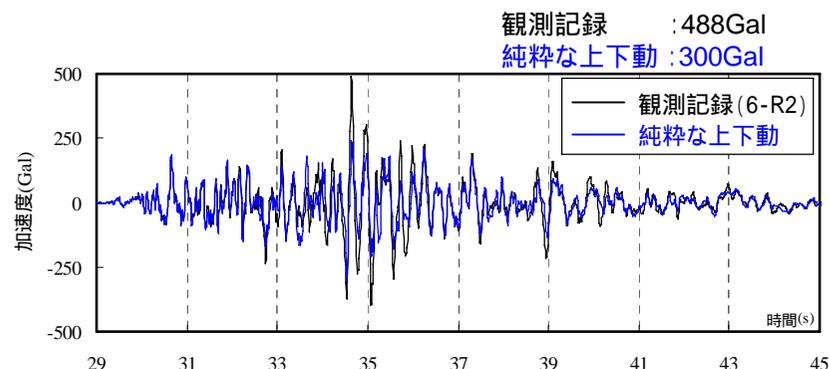
下式を用いて、ロッキング振動による
 上下動成分の除去を行った。

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測記録} + \ddot{\theta}_{NS} \cdot L_{NS} - \ddot{\theta}_{EW} \cdot L_{EW}$$

(N方向、E方向、D方向を正とする)



6号機の上下動記録からロッキングによる
 上下動成分を除去すると地震動が小さくなる



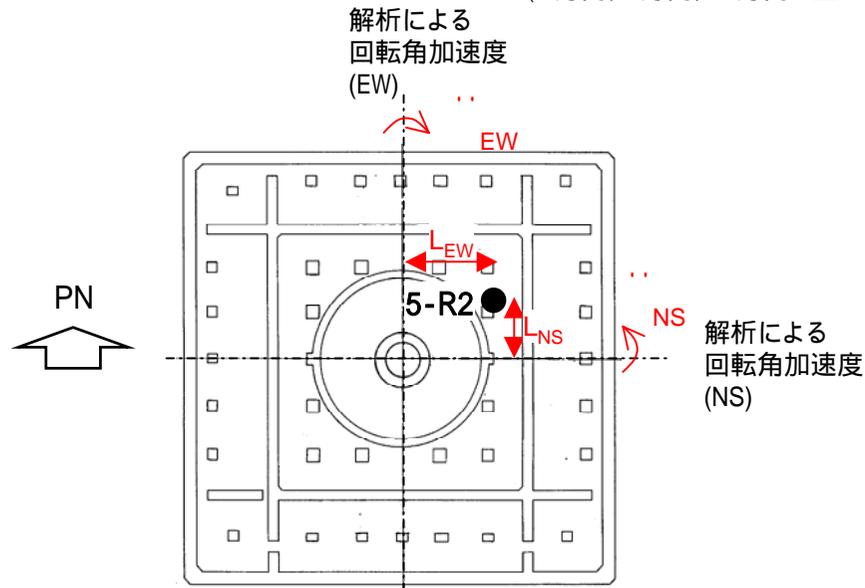
検討 1 : 本震記録による検討 (5号機の検討)

5号機の場合

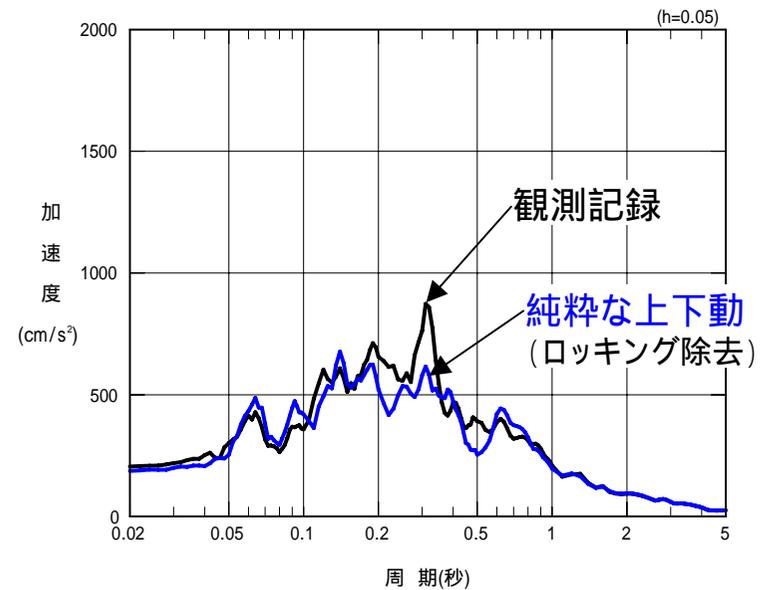
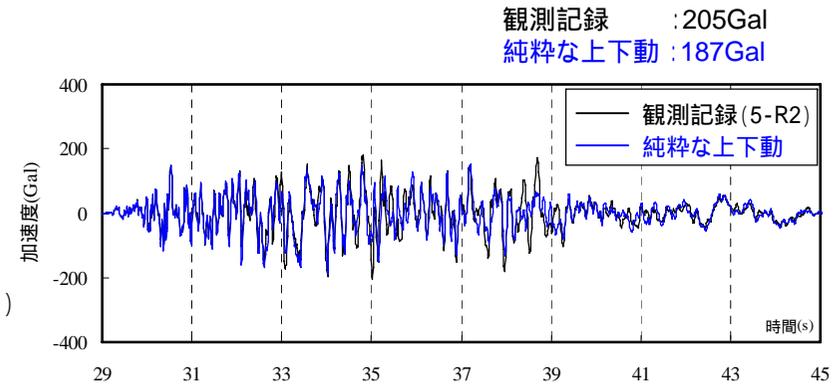
下式を用いて、ロッキング振動による上下動成分の除去を行った。

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測記録} + \dots \text{NS} \cdot L_{\text{NS}} + \dots \text{EW} \cdot L_{\text{EW}}$$

(N方向、E方向、D方向を正とする)



5号機の場合は、ロッキング振動による上下動成分を除去しても、地震動の低減は少ない



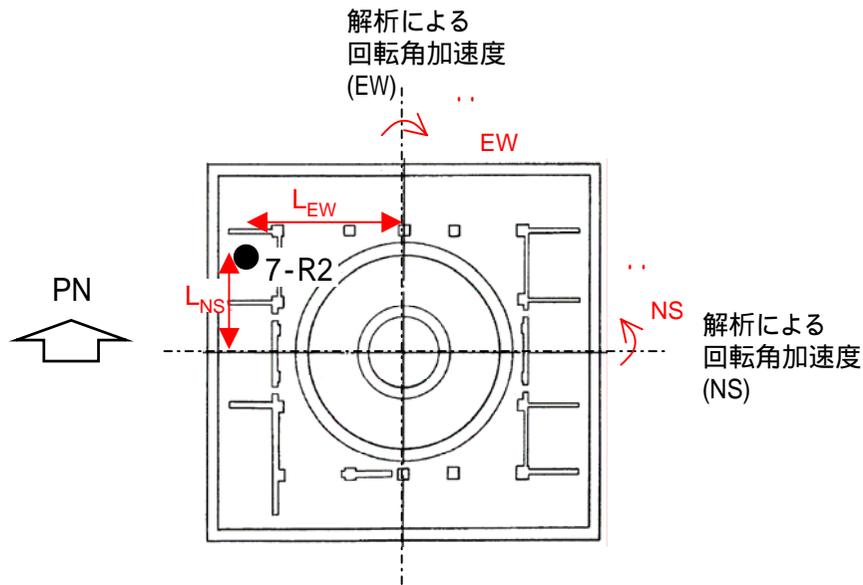
検討 1 : 本震記録による検討 (7号機の検討)

7号機の場合

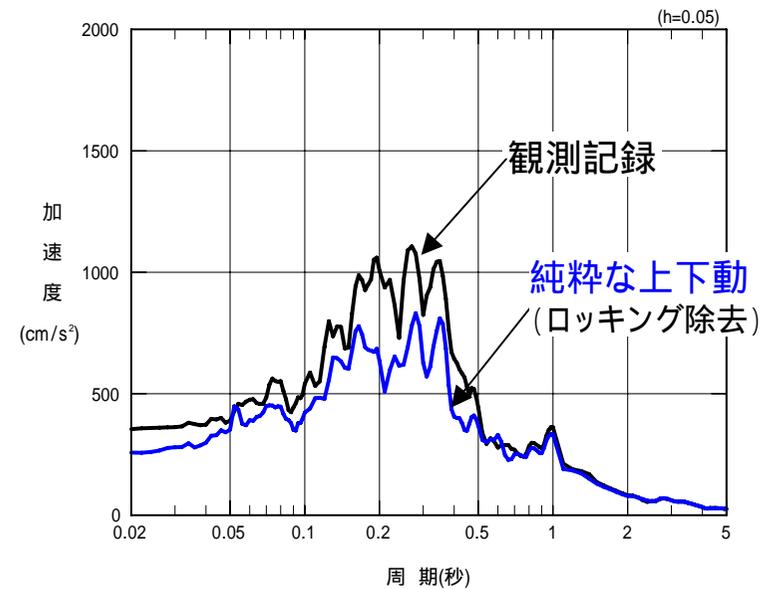
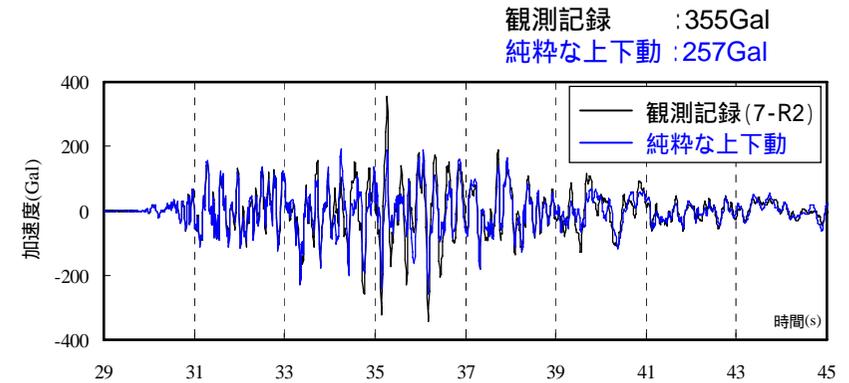
下式を用いて、ロッキング振動による上下動成分の除去を行った。

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測記録} + \ddot{\theta}_{NS} \cdot L_{NS} - \ddot{\theta}_{EW} \cdot L_{EW}$$

(N方向、E方向、D方向を正とする)

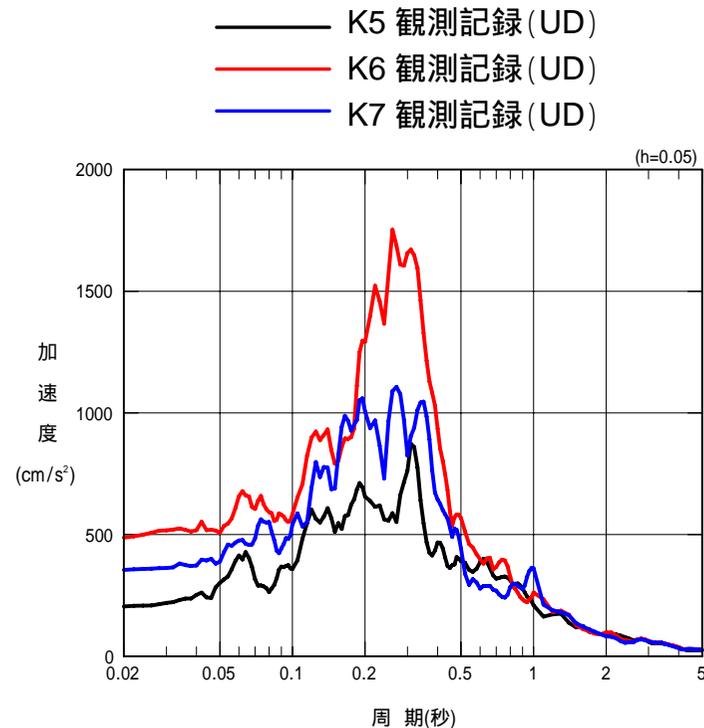


7号機の場合は、ロッキング振動による上下動成分を除去すると地震動が小さくなる

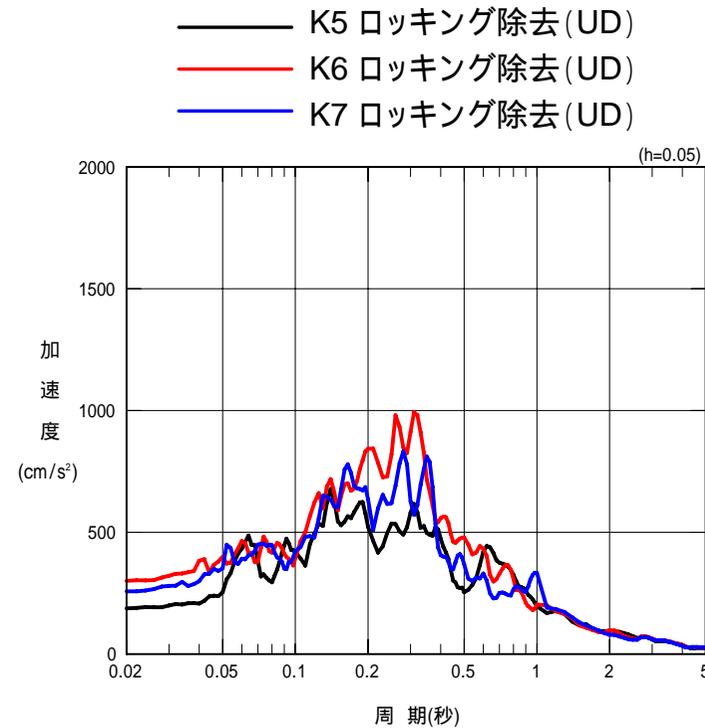


検討 1 : 本震記録による検討 (5 ~ 7号機の純粋な上下動の比較)

以上の検討で抽出された純粋な上下動成分について、
5号機、6号機、7号機の加速度応答スペクトルの比較を行った。



オリジナルの観測記録



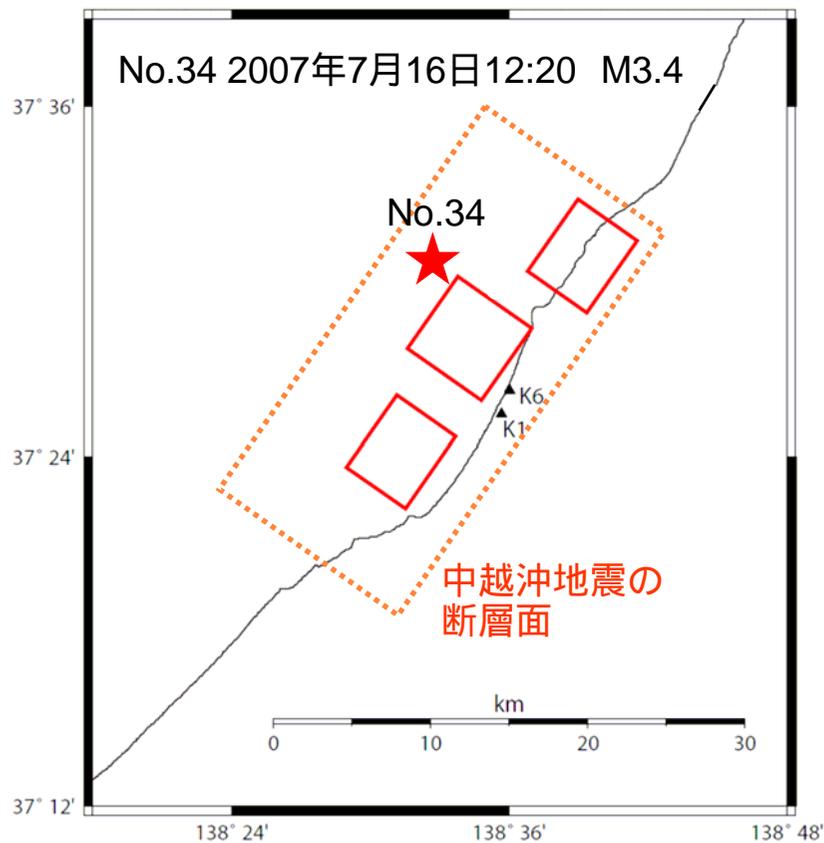
純粋な上下動応答

ロッキングによる上下動成分を取り除くことにより、5号機～7号機での差異はかなり小さくなる

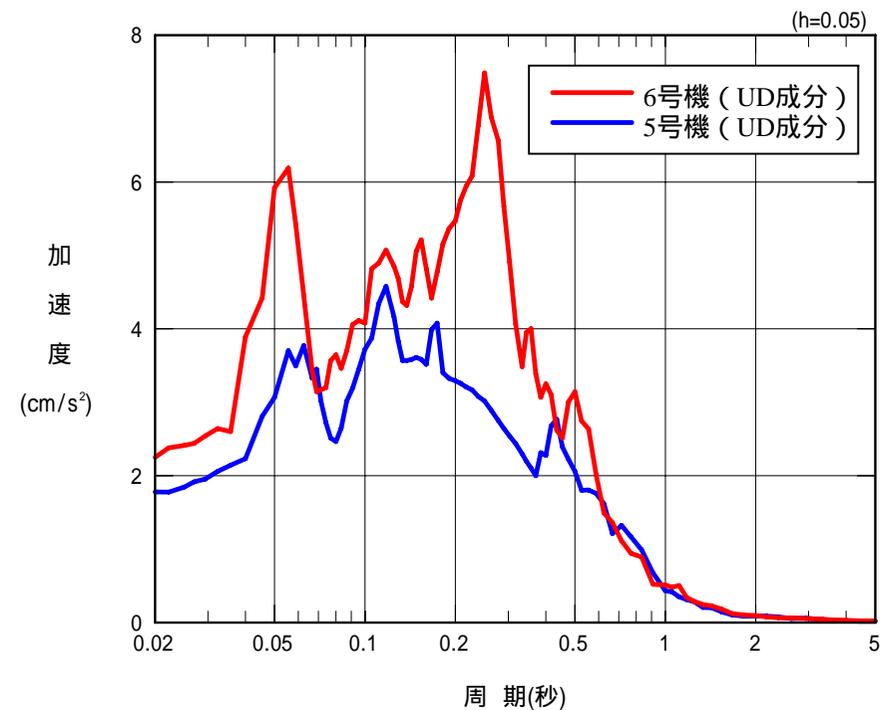
検討 2 : 余震記録を用いた検証 (対象記録)

対象とした地震記録

5号機と6号機の基礎版上の上下動記録の差が大きい地震



対象地震の震央位置



No.34 2007年7月16日12:20 M3.4

基礎版における上下動記録の応答スペクトル

検討 2 : 余震記録を用いた検証 (6号機の検討概要)

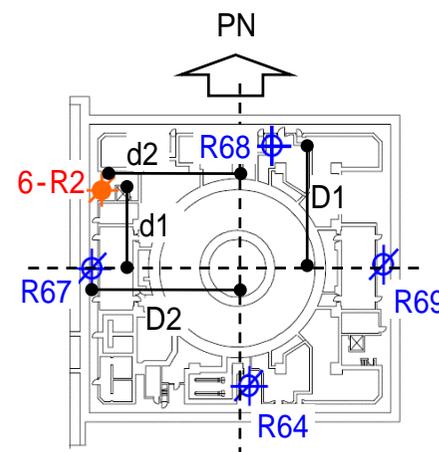
検討概要

6号機基礎版上の4点(R64,R67,R68,R69)の記録を用いて以下の検討を行う。(余震記録では新設、既設地震計とも記録が取れている。)

純粋な上下動成分の抽出

$$\left. \begin{aligned} \text{純粋な上下動 (NS)} \quad U_{ns} &= (R64 + R68) / 2 \\ \text{純粋な上下動 (EW)} \quad U_{ew} &= (R67 + R69) / 2 \end{aligned} \right\}$$

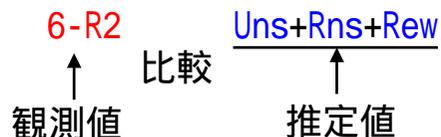
剛体であれば U_{ns} と U_{ew} は同じ値になる



6-R2地点のロッキング振動による上下動成分の計算

$$\begin{aligned} \text{NS方向のロッキング振動による上下動成分} &: R_{ns} = (R68 - U_{ns}) \times d1 / D1 \\ \text{EW方向のロッキング振動による上下動成分} &: R_{ew} = (R67 - U_{ew}) \times d2 / D2 \end{aligned}$$

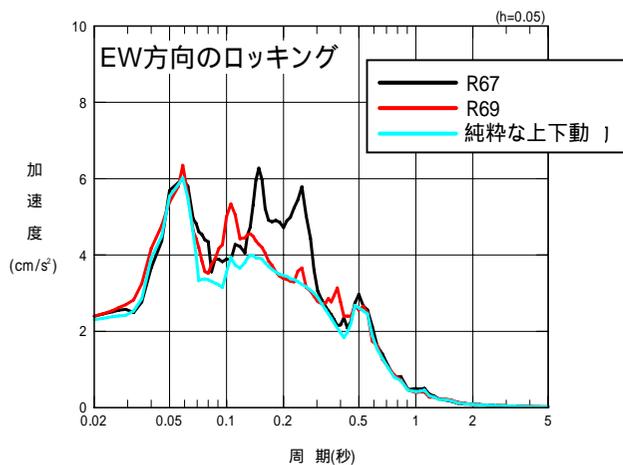
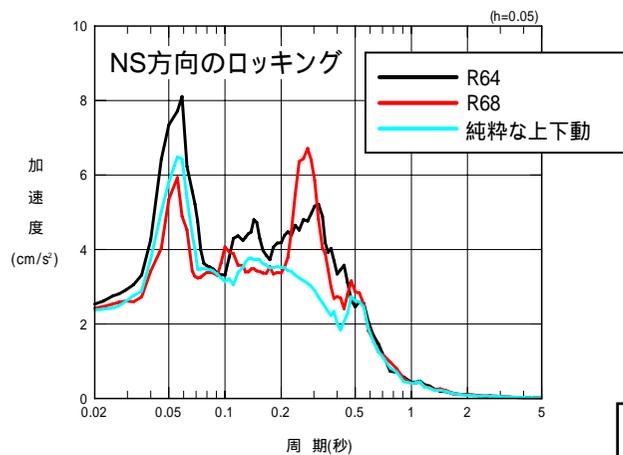
6-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較



既設地震計記録から推定した6-R2地点の上下動 ($U_{ns} + R_{ns} + R_{ew}$) が、実際に観測された6-R2の記録と一致すれば、剛体仮定が正しいと言える

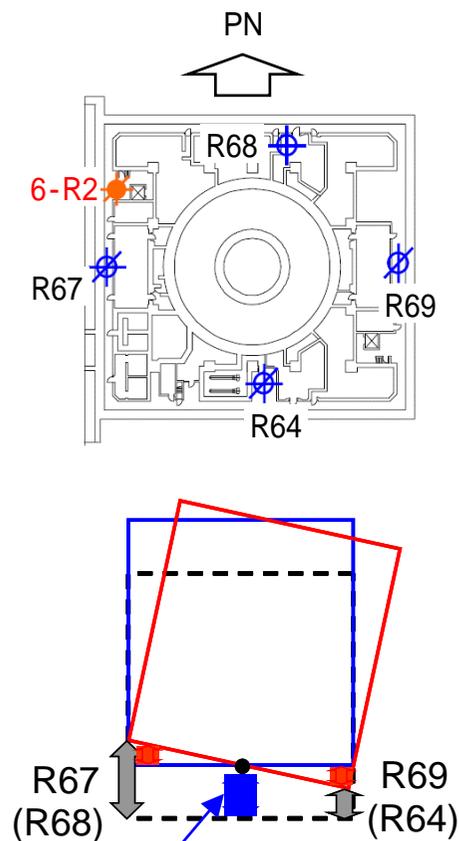
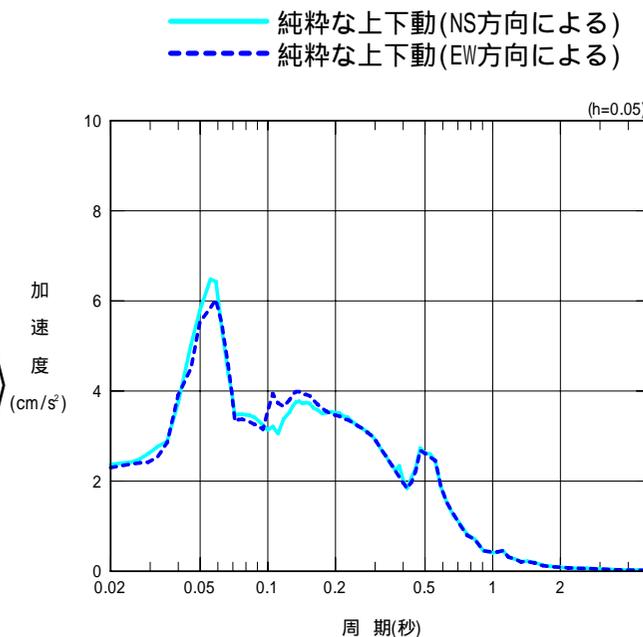
検討 2 : 余震記録を用いた検証 (6号機の検討)

純粋な上下動成分の算定



加速度応答スペクトル

比較



純粋な上下動

$$U_{ew} = (R67 + R69) / 2$$

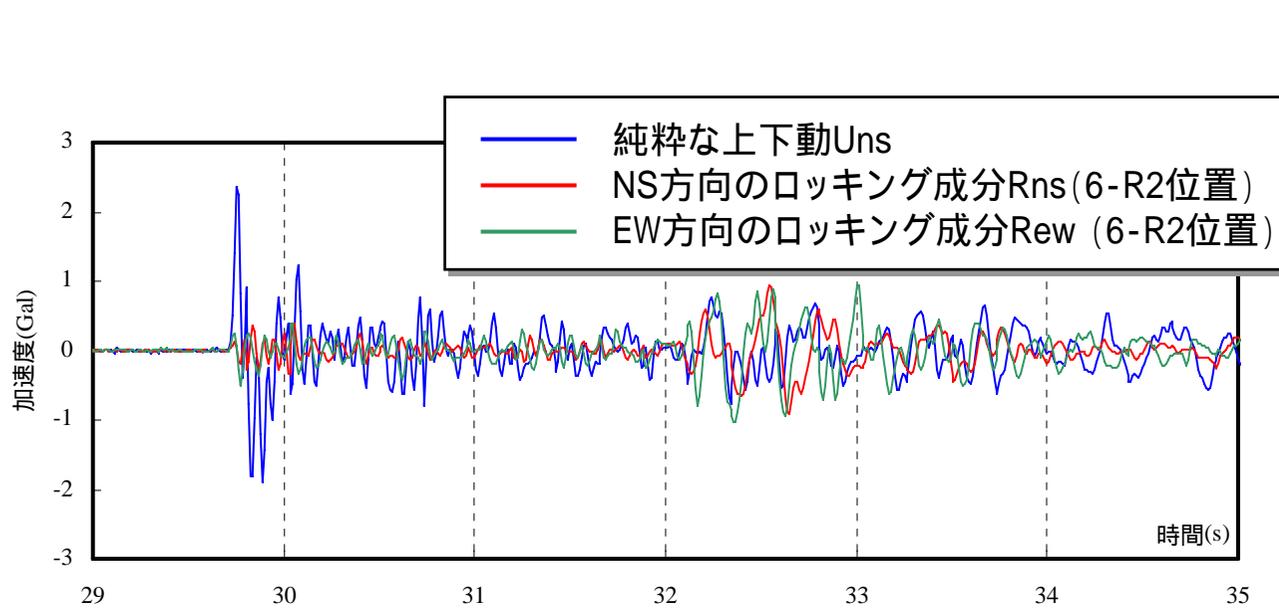
$$U_{ns} = (R68 + R64) / 2$$

観測記録からロックング成分を除去した純粋な上下動は観測記録より小さい。

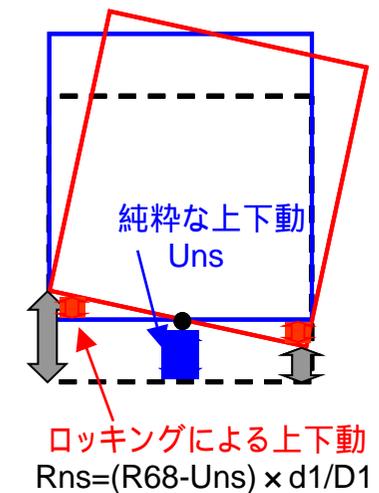
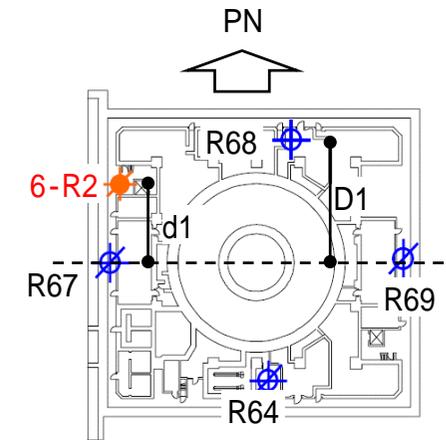
NS記録から求めた純粋な上下動とEW記録から求めた純粋な上下動はほぼ等しいことから、剛体仮定に矛盾はない。

検討 2 : 余震記録を用いた検証 (6 号機の検討)

6-R2地点のロッキング振動による上下動成分の算定



加速度時刻歴波形の比較

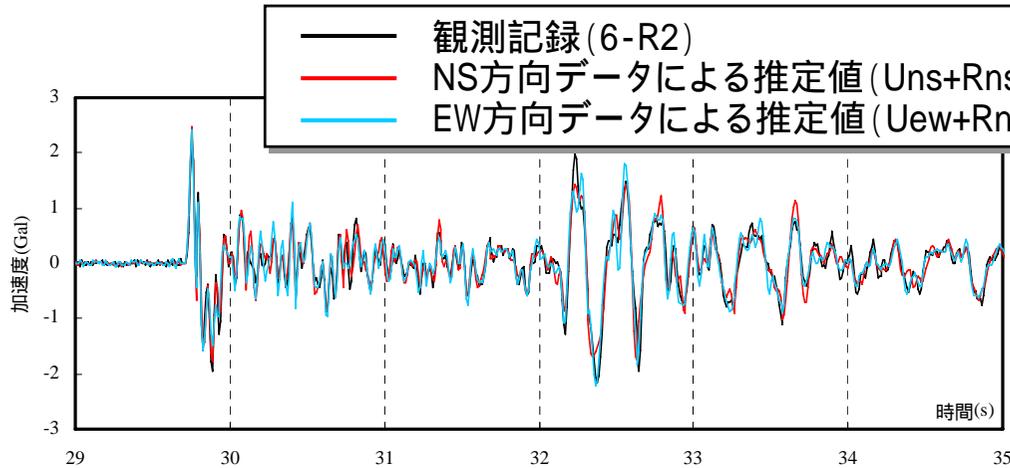


32秒以降でロッキングによる上下動成分が大きい

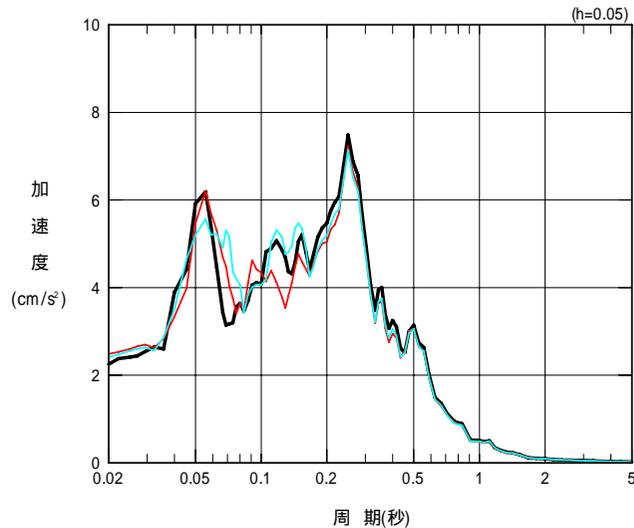
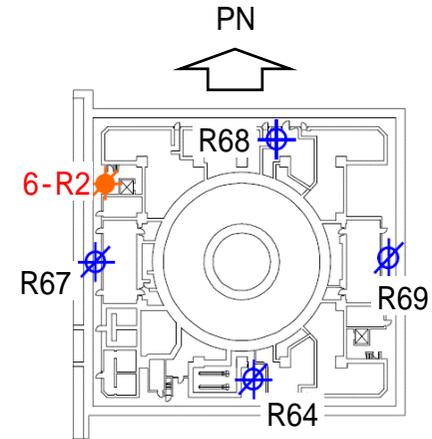
NS方向のロッキングとEW方向のロッキングは同程度である

検討 2 : 余震記録を用いた検証 (6号機の検討)

6-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較



加速度時刻歴波形の比較



加速度応答スペクトルの比較

余震記録を対象として、既設地震計 (R64, R67, R68, R69) の記録から新設地震計 (6-R2) の上下応答を精度良く推定できた。

すなわち、剛体仮定がほぼ成り立つことを確認した。

したがって、6-R2の記録にはロッキング振動により上下動が大きくなったものと考えられる。

検討 2 : 余震記録を用いた検証 (5 号機の検討概要)

検討概要

5号機基礎版上の3点(V52,V54,V55)の記録を用いて以下の検討を行う。

純粋な上下動成分の抽出

$$\text{純粋な上下動 (EW) } U_{ew} = (V52 + V55) / 2$$

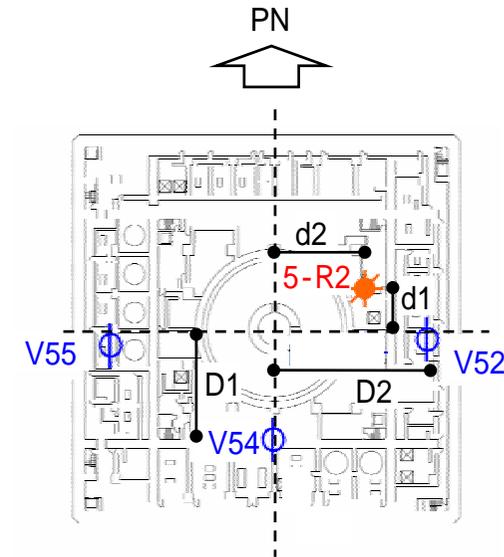
5-R2地点のロッキング振動による上下動成分の計算

$$\text{NS方向のロッキング振動による上下動成分} : R_{ns} = -(V54 - U_{ew}) \times d1 / D1$$

$$\text{EW方向のロッキング振動による上下動成分} : R_{ew} = (V52 - U_{ew}) \times d2 / D2$$

5-R2 : 新設地震計

V52 ~ V55 : 既設地震計



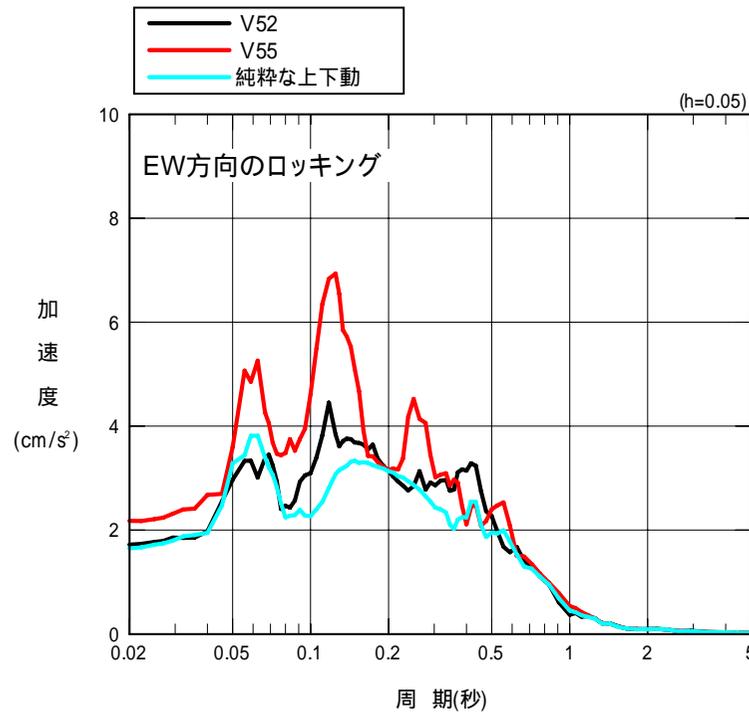
5-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較

5-R2	比較	$\frac{U_{ew} + R_{ns} + R_{ew}}$
↑		↑
観測値		推定値

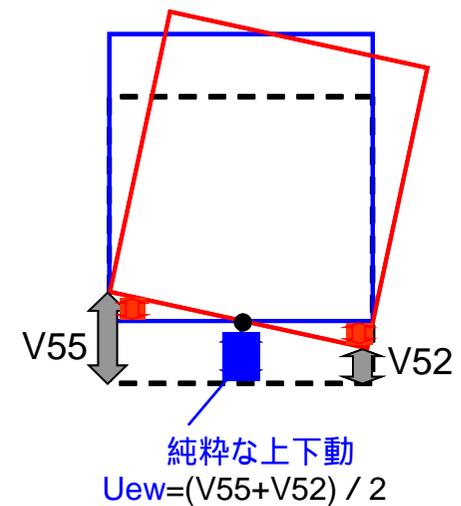
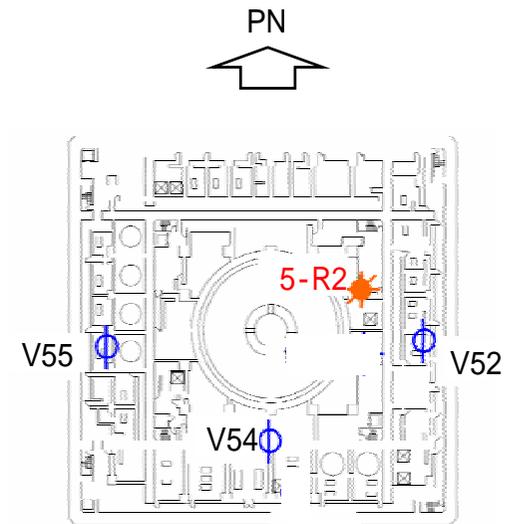
既設地震計記録から推定した5-R2地点の上下動 ($U_{ew} + R_{ns} + R_{ew}$) が、実際に観測された5-R2の記録と一致すれば、剛体仮定が正しいと言える

検討 2 : 余震記録を用いた検証 (5号機の検討)

純粋な上下動成分の抽出



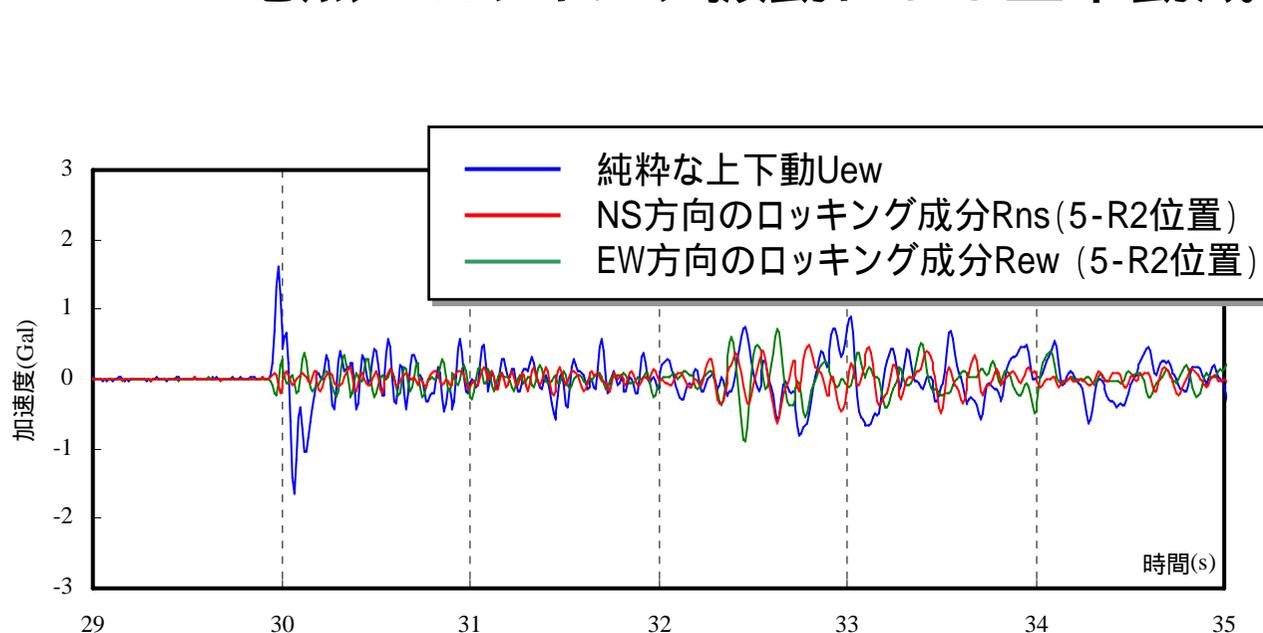
加速度応答スペクトル



5号機の場合もロッキングによる上下動成分を取り除いた純粋な上下動成分は小さくなる。

検討 2 : 余震記録を用いた検証 (5号機の検討)

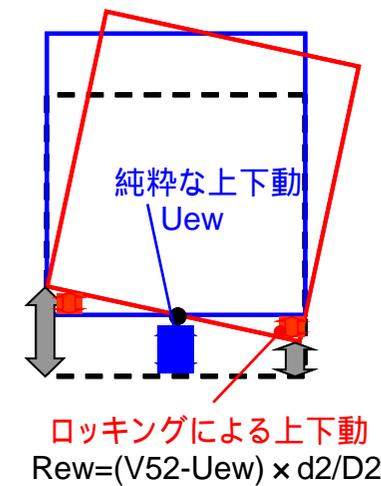
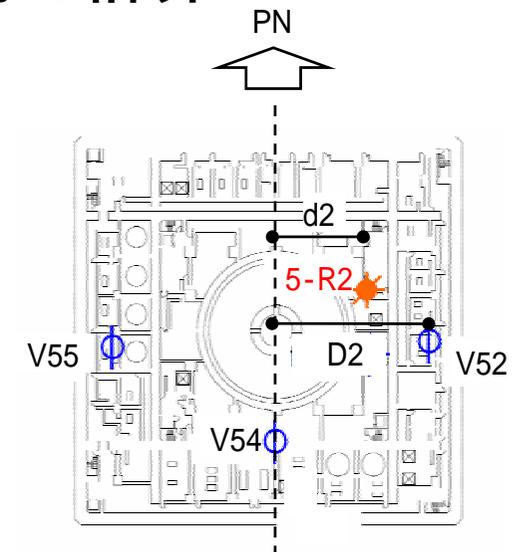
5-R2地点のロッキング振動による上下動成分の計算



加速度時刻歴波形の比較

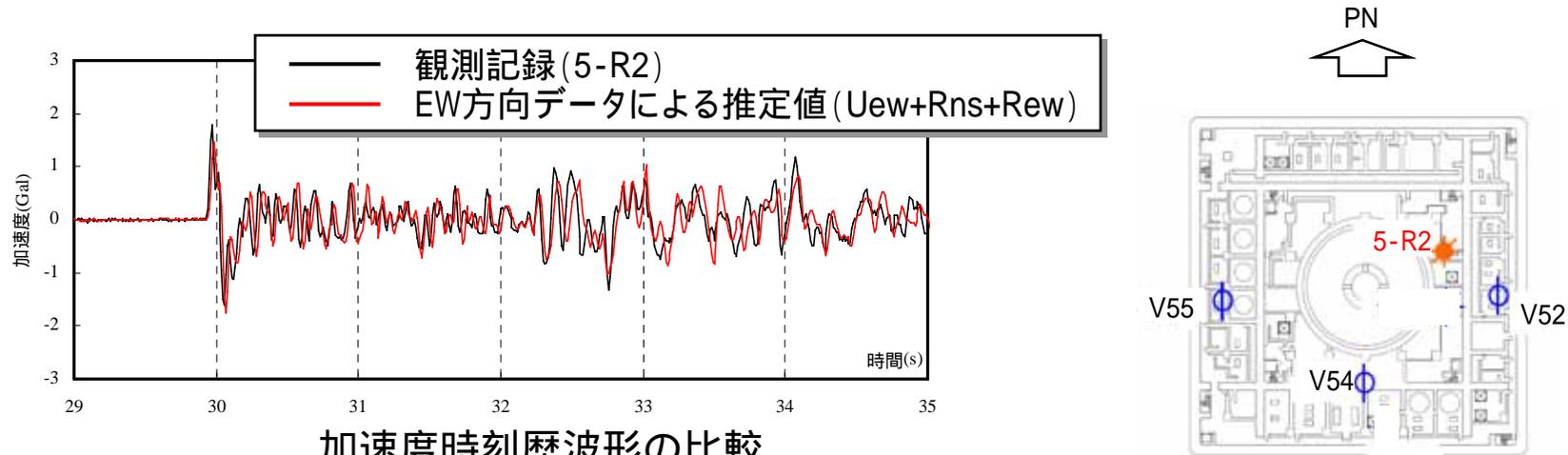
32秒以降でロッキングによる上下動成分が大きい

NS方向のロッキングとEW方向のロッキングは同程度である

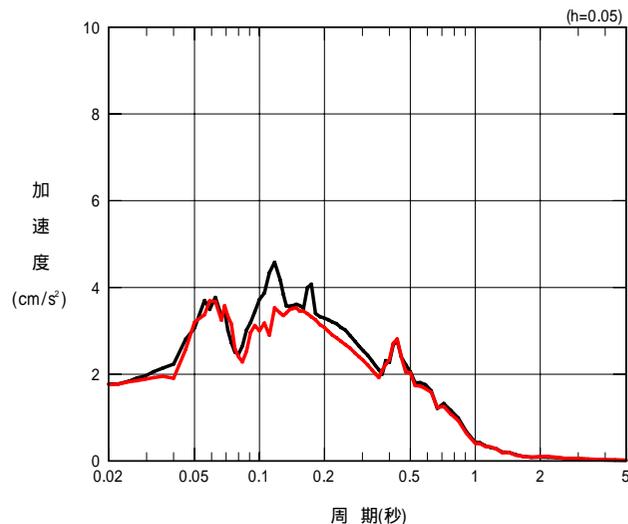


検討 2 : 余震記録を用いた検証 (5号機の検討)

5-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較



加速度時刻歴波形の比較



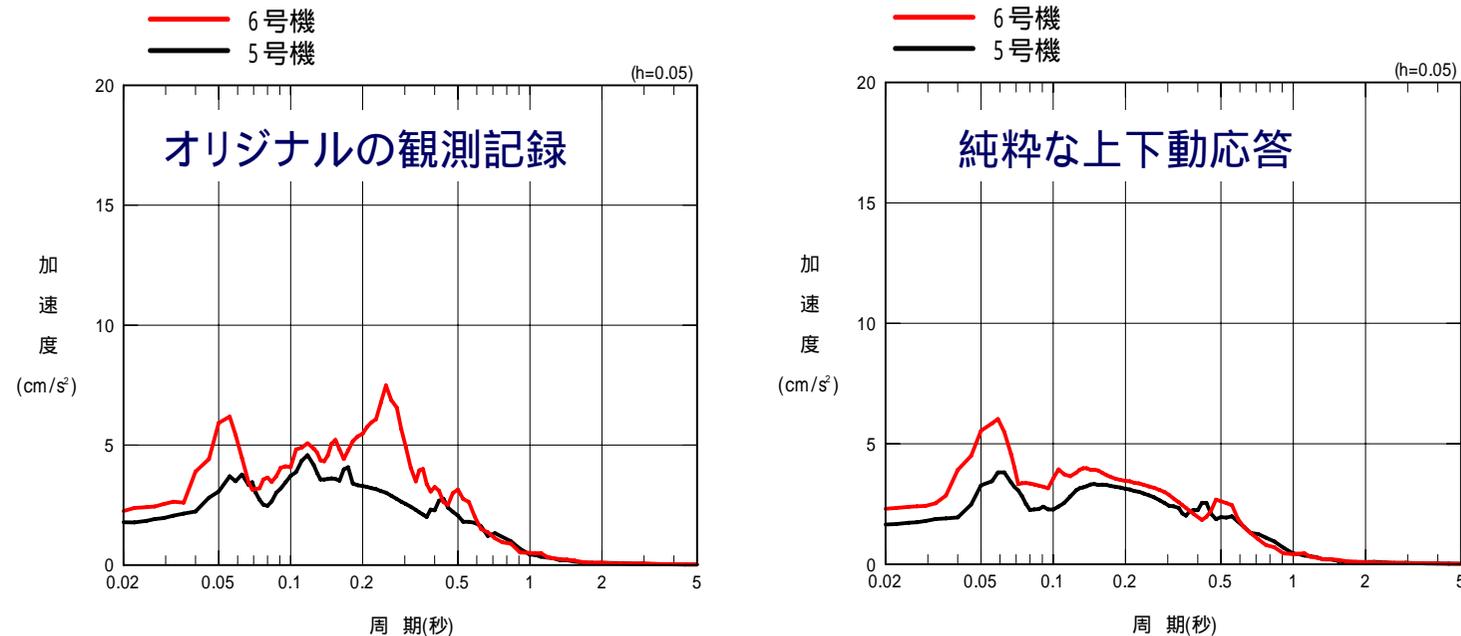
加速度応答スペクトルの比較

No.34地震を対象として、既設地震計 (V52,V54,V55) の記録から推定した新設地震計(5-R2)の上下応答は、6号機の場合と同様に精度良く推定できた。

すなわち、5号機においても剛体仮定がほぼ成り立つことを確認した。

検討 2 : 余震記録を用いた検証 (5号機と6号機の比較)

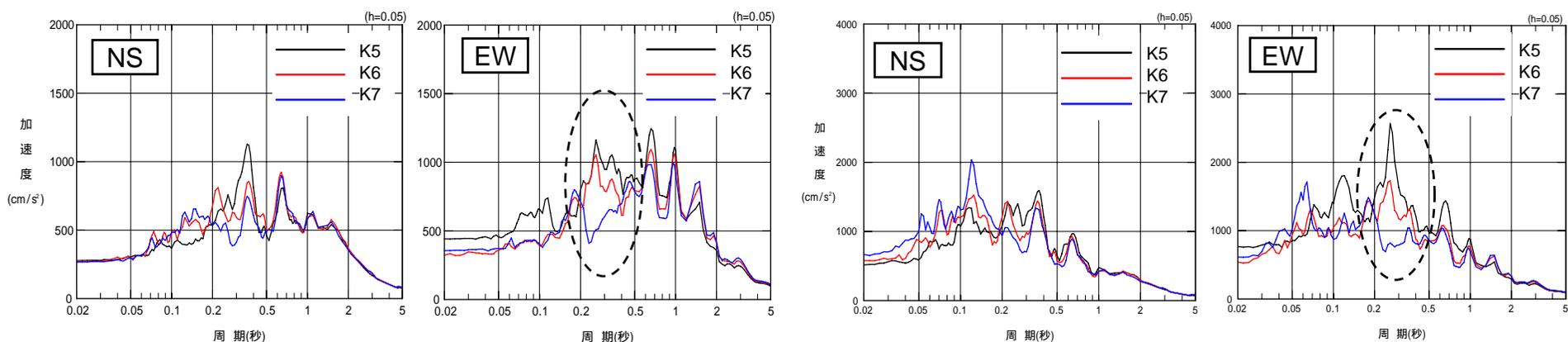
以上の検討で抽出された純粋な上下動成分について、5号機と6号機の加速度応答スペクトルの比較を行った。



ロッキングによる上下動成分を取り除くことにより、0.3秒付近の応答が5号機と6号機でほぼ一致する。
すなわち、6号機の0.3秒付近が大きいのは、ロッキングによる上下動成分によるためと推定される。

検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

応答スペクトルの比較 (基礎版上の記録・解放基盤波)



【基礎版上記録】

【解放基盤波】

基礎版上記録・解放基盤波ともに、0.3秒付近については、5号機と6号機のEW成分が大きい

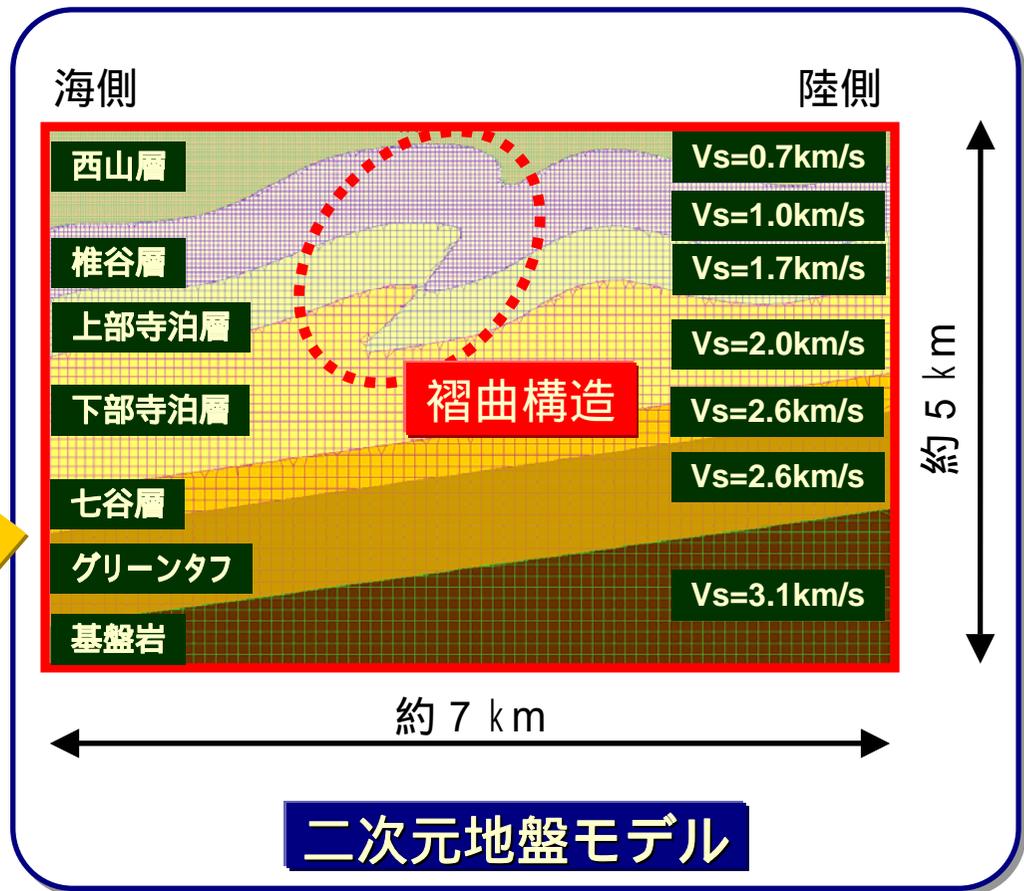
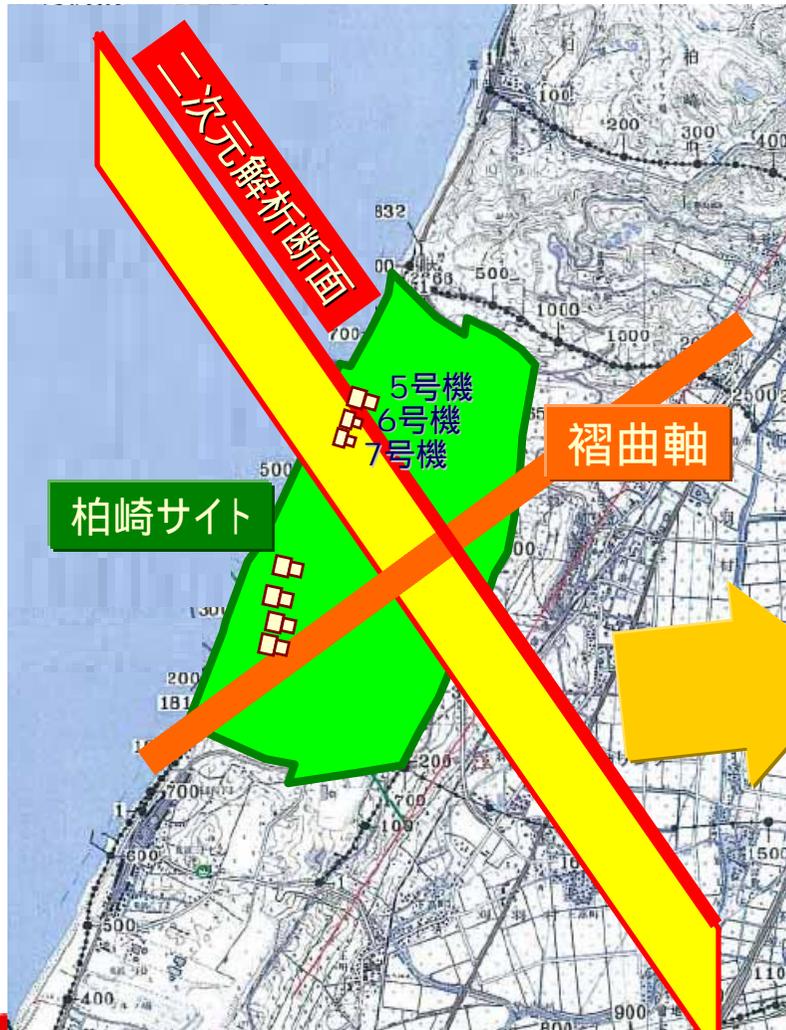


解放基盤波が5 / 6号機で大きくなる要因について、2次元地盤モデルによるFEM地震動シミュレーションにより検討

検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

二次元地盤モデルによる F E M地震動シミュレーション解析

5号機を通り、敷地内の褶曲軸と直交する方向に二次元地盤モデルを作成



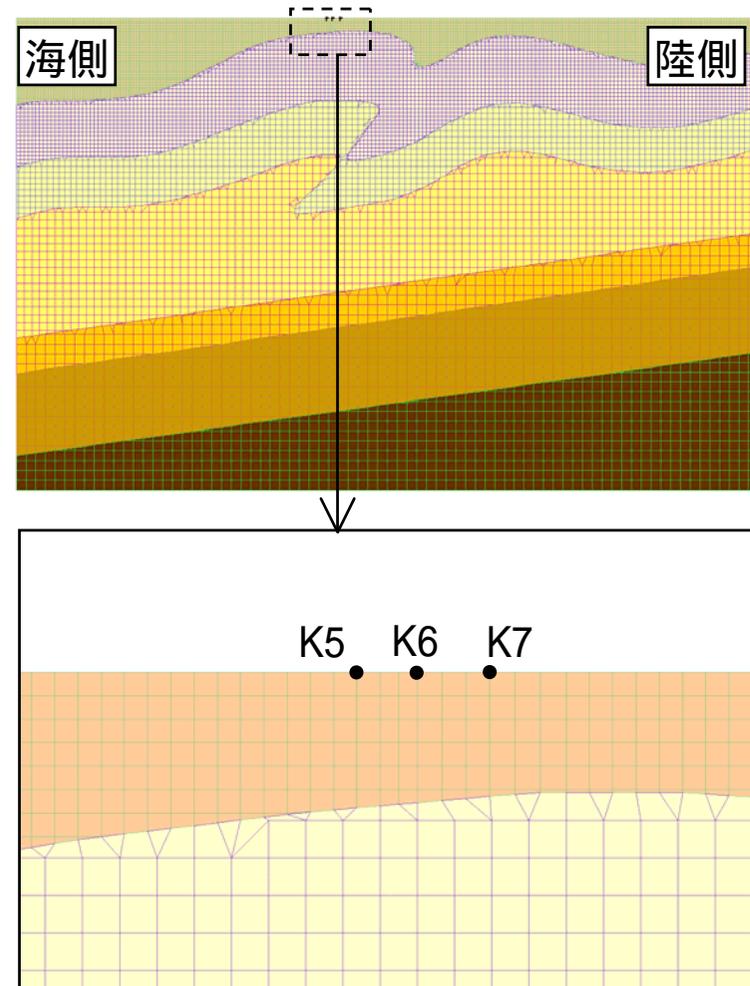
検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

二次元地盤モデルによる F E M地震動シミュレーション解析

【二次元解析断面と評価地点との関係】



二次元解析断面と評価地点

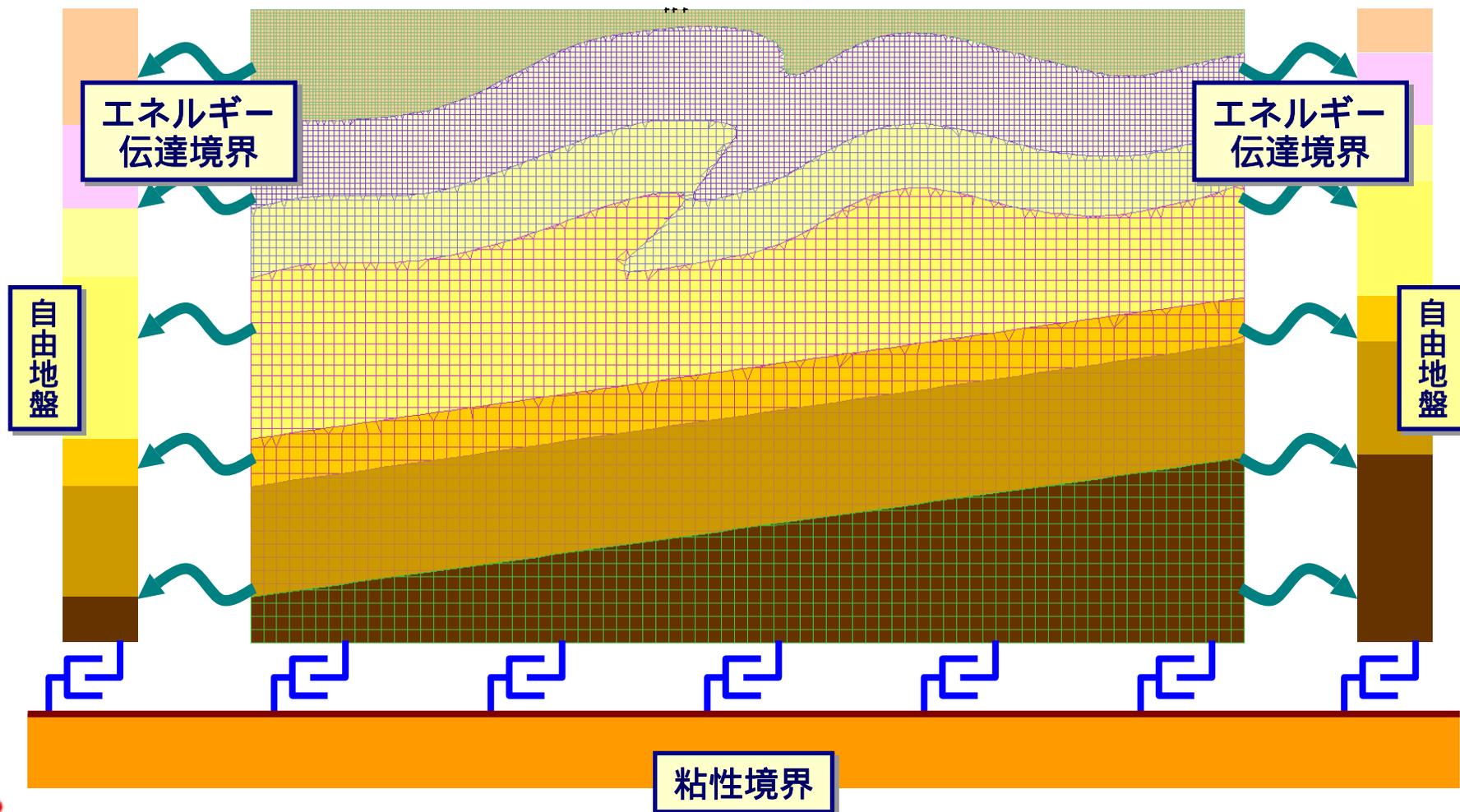


FEMメッシュと評価地点

検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

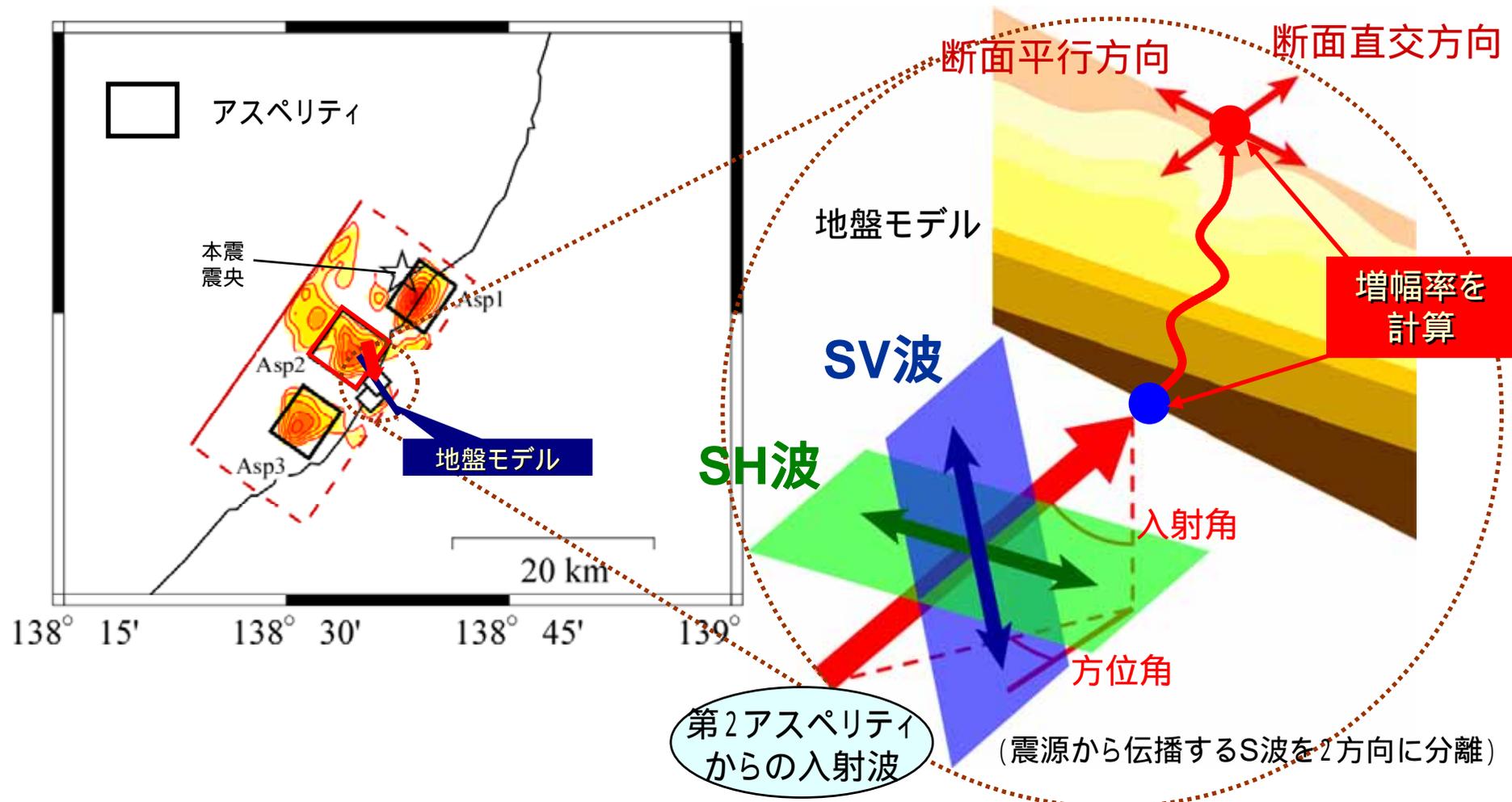
二次元地盤モデルによる F E M地震動シミュレーション解析

【FEMモデルの境界条件】



検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

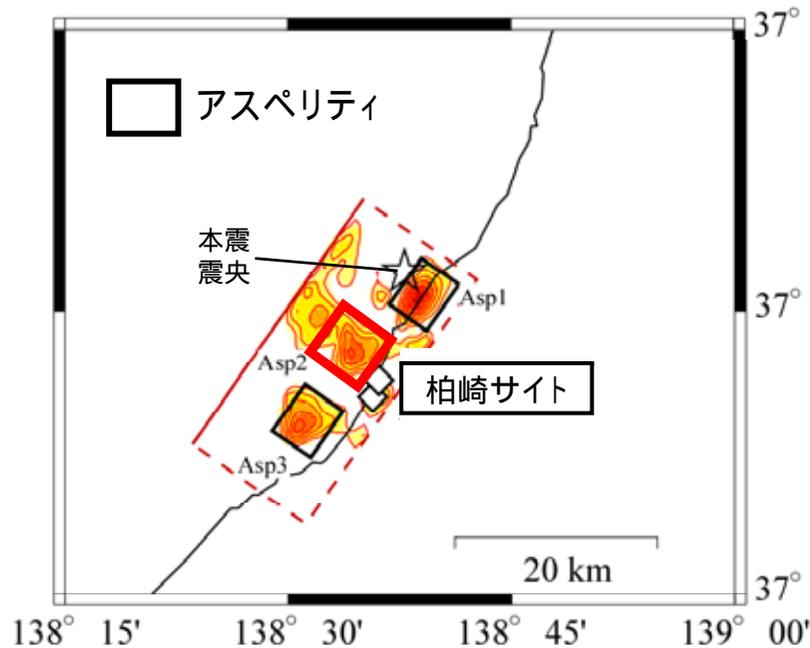
上下動の振幅を支配した第2アスペリティからの地震波を想定



検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

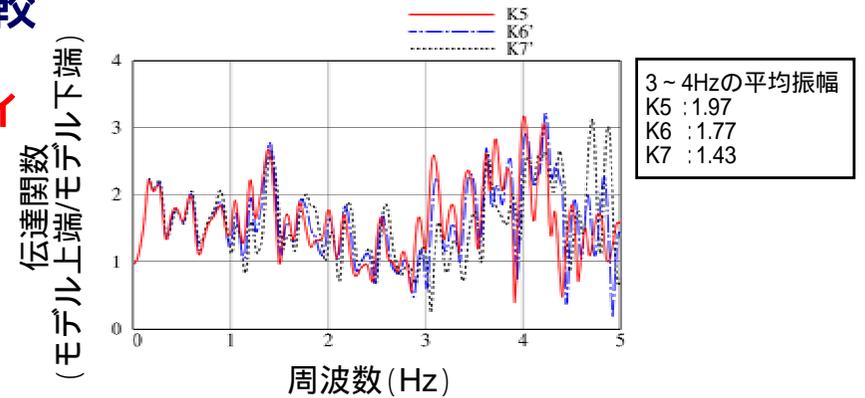
5、6、7号機投影点の伝達関数の比較

上下動の振幅を支配した**第2アスペリティ**からの地震波を想定

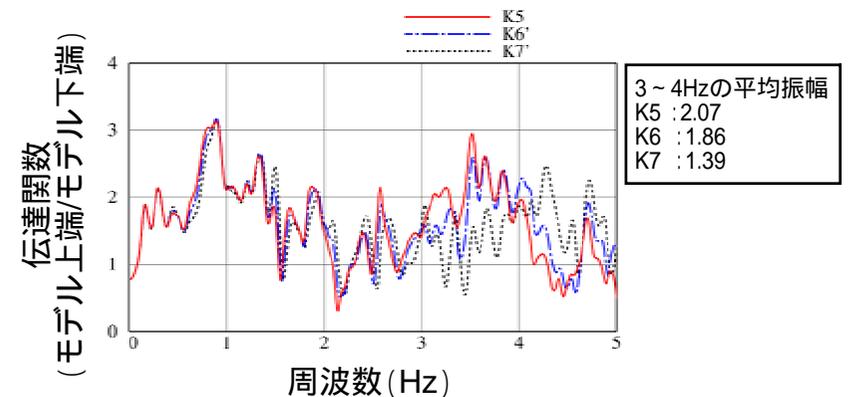


中越沖地震

第2アスペリティ(Asp2)からの斜め入射



(a) SH波入射・断面直交方向の応答 NS成分に相当



(b) SV波入射・断面平行方向の応答 EW成分に相当

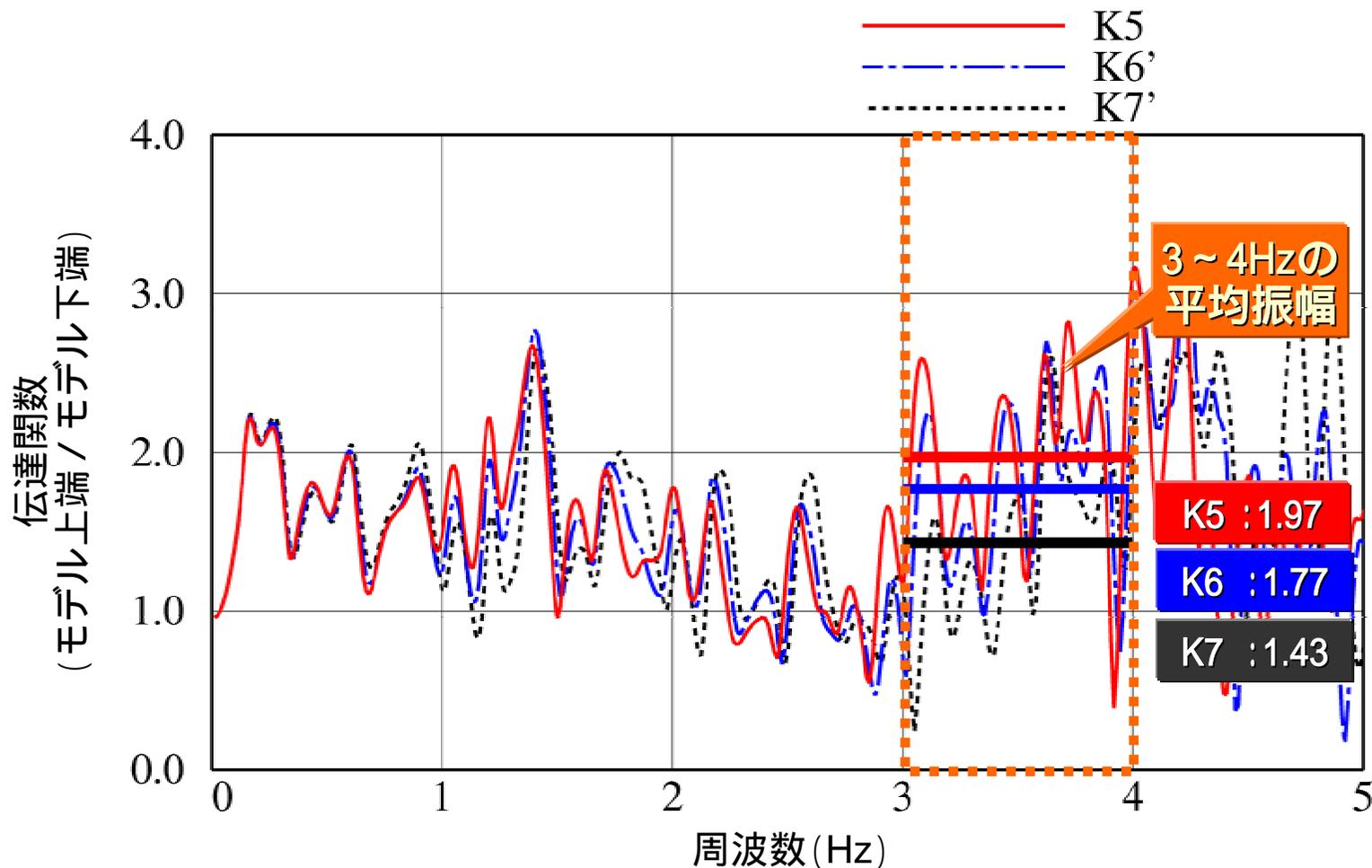
3 ~ 4 Hz付近では7号機の応答が小さい。特にEW方向の成分。

5号機と6号機は大差はない

顕著ではないが観測事実に整合的

検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

■ 3 地点の伝達関数の比較 (S H波入射 断面直角方向の応答)

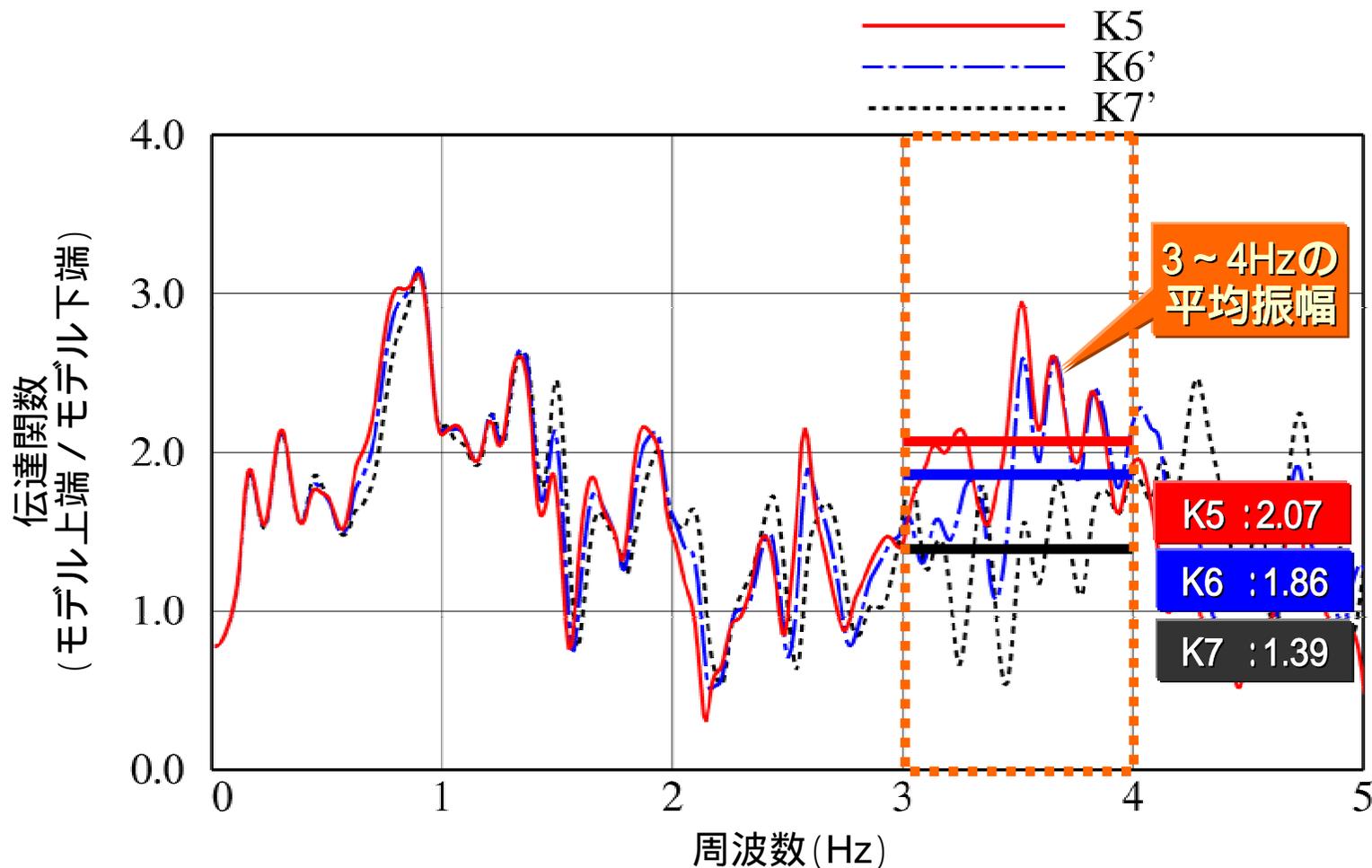


SH UY angv=+28 angh=+95

中越沖地震 第2アスペリティからの斜め入射

検討 3 : 入力地震動が号機間で異なる要因分析

■ 3 地点の伝達関数の比較 (S V 波入射 断面平行方向の応答)



SV UX angv=+28 angh=+95

中越沖地震 第2アスペリティからの斜め入射

まとめ（その1）

- （1）本震時の原子炉建屋の基礎版上の上下動の最大加速度を比較すると、6号機が最も大きかった。応答スペクトルでは、特に周期0.3秒付近に大きなピークがあった。
- （2）これは、周期0.3秒付近が卓越したEW方向の水平動によるロッキング振動の影響によるものではないかという仮説を立てて、以下の3項目の検討を実施。

本震の上下動の観測記録から、シミュレーション解析から推定されるロッキング振動を除き、純粹な上下動を推定し比較する。

余震記録を用いて、シミュレーション解析を介さずに実際の記録により の検討が妥当なものかを検証する。

なぜ固有周期0.3秒付近のEW成分の入力が、7号機に比べ5 / 6号機で大きかったのかということについて、地下構造の影響による可能性について検討する。

まとめ（その2）

（3） 及び についての確認

観測された上下動記録から、解析モデルに基づき推定されるロッキング振動による上下動を除去したところ、5～7号機の上下応答の差異は小さくなった。

についての確認

解放基盤における地震動を比較した結果、0.3秒付近の水平動は、解放基盤で既に7号機に比べ5 / 6号機が大きかった。また、二次元FEM解析によると、Asp2からの入射波に対し、7号機の3～4Hzの応答が6号機よりも小さい結果となった。

（4） 検討結果による推測

地下構造の影響により、EW方向の入力地震動が5 / 6号機において大きかった。

そのうち、建屋の外壁近傍に地震計が設置されている6号機において、ロッキング振動の影響を強く受けたことにより、記録としての上下動が大きくなった。