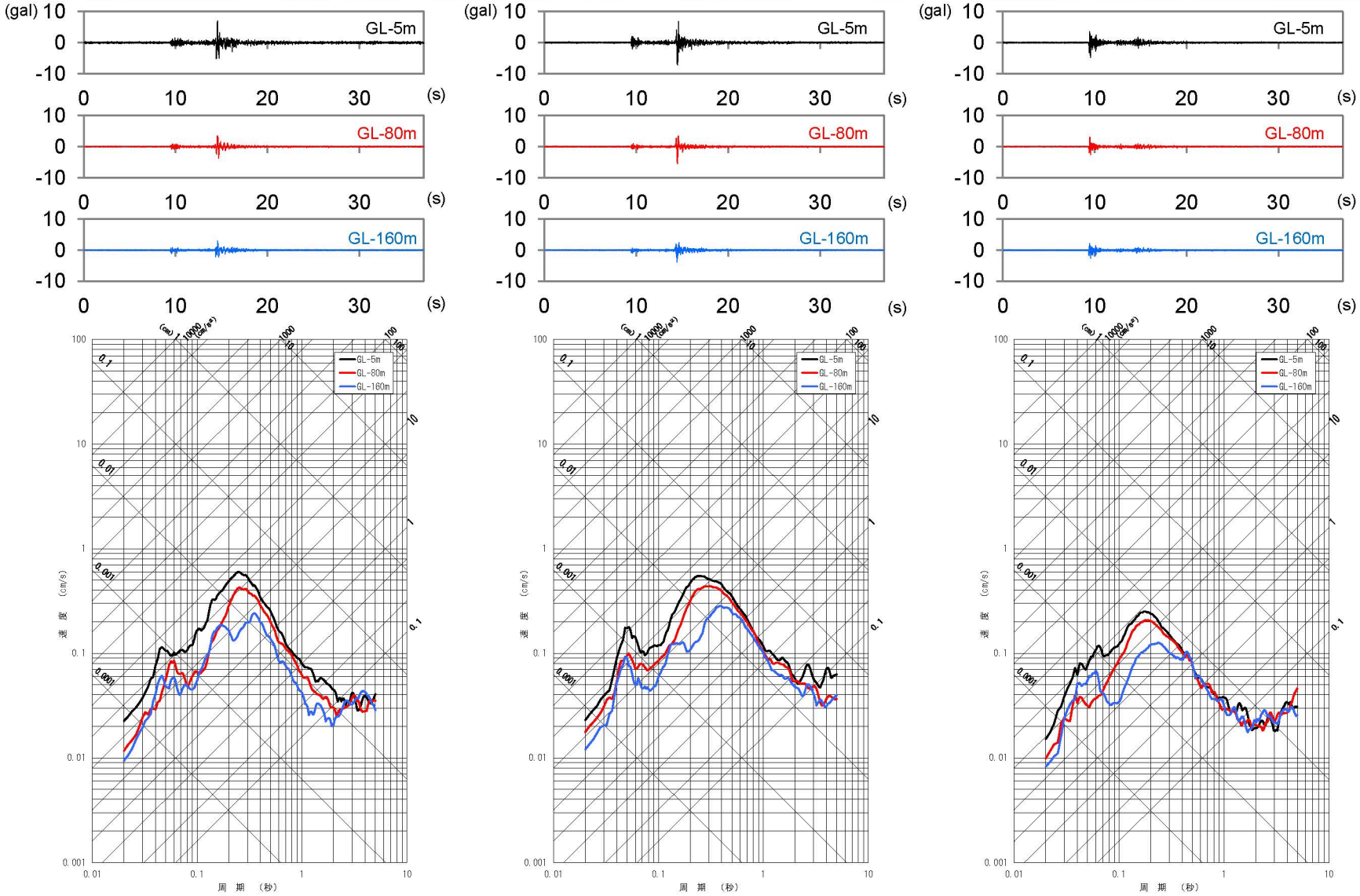
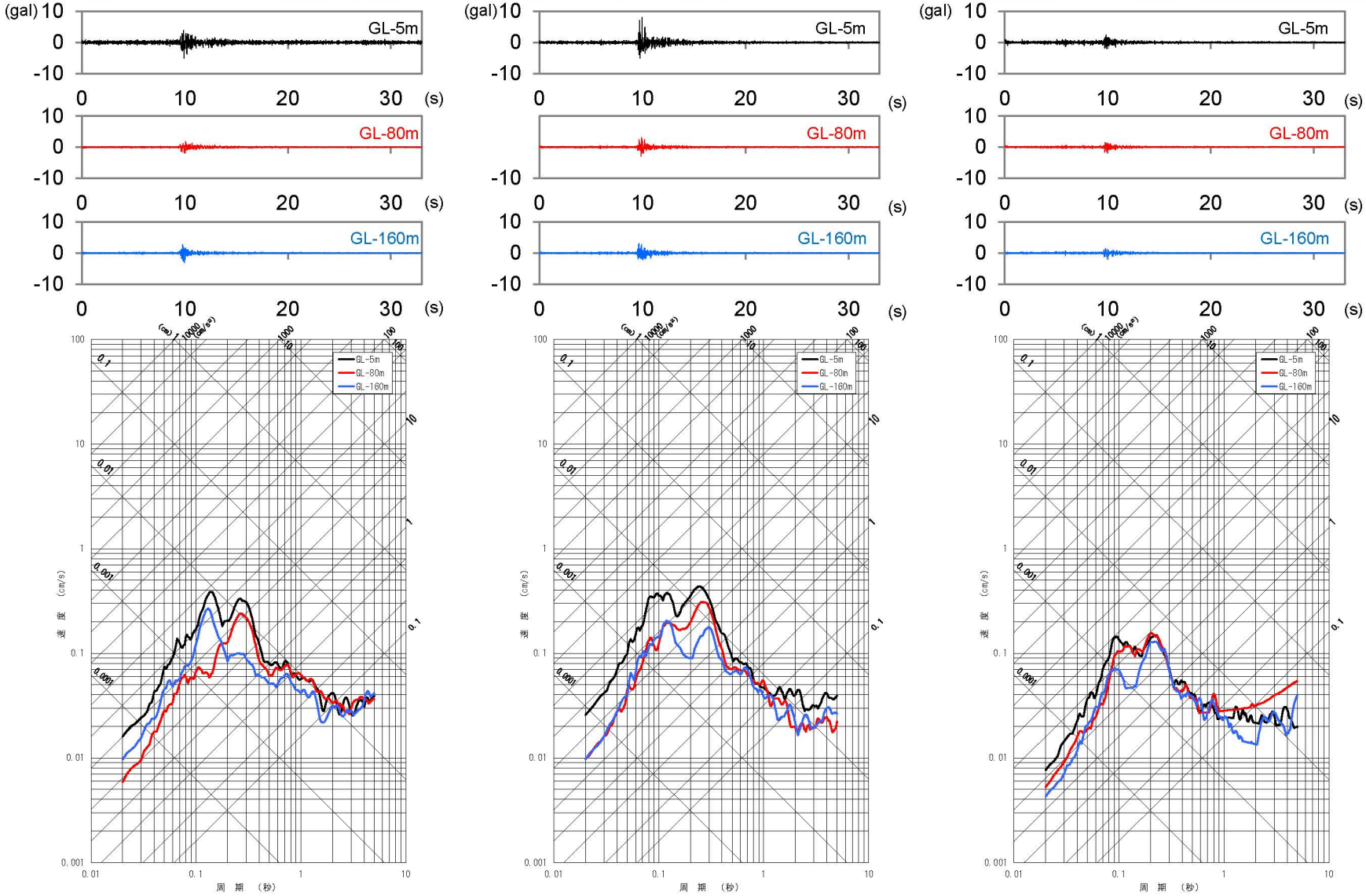
No.16 2006.2.1 伊予灘の地震 M4.3

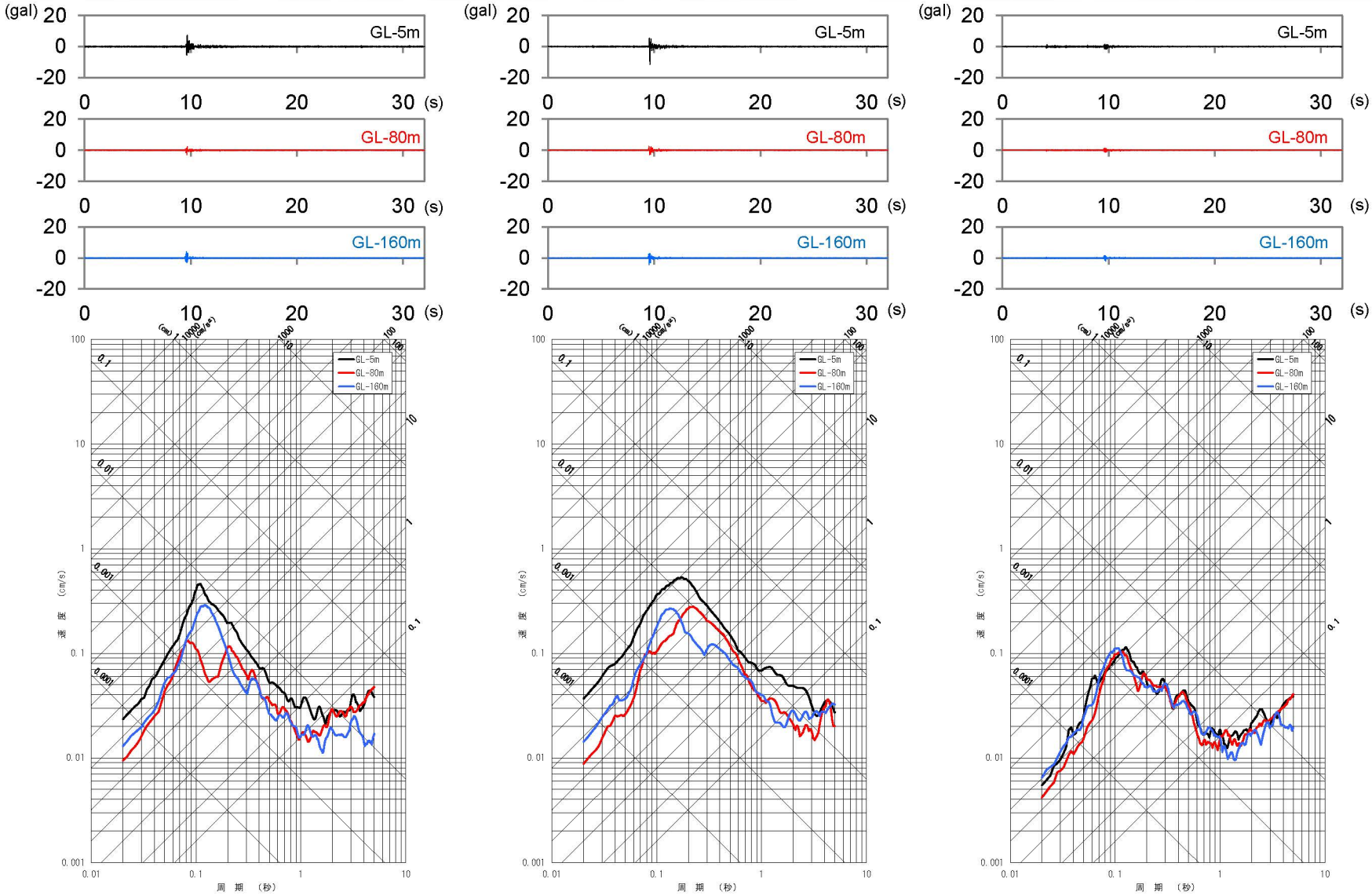


No.17 2006.5.28 伊予灘の地震 M4.3



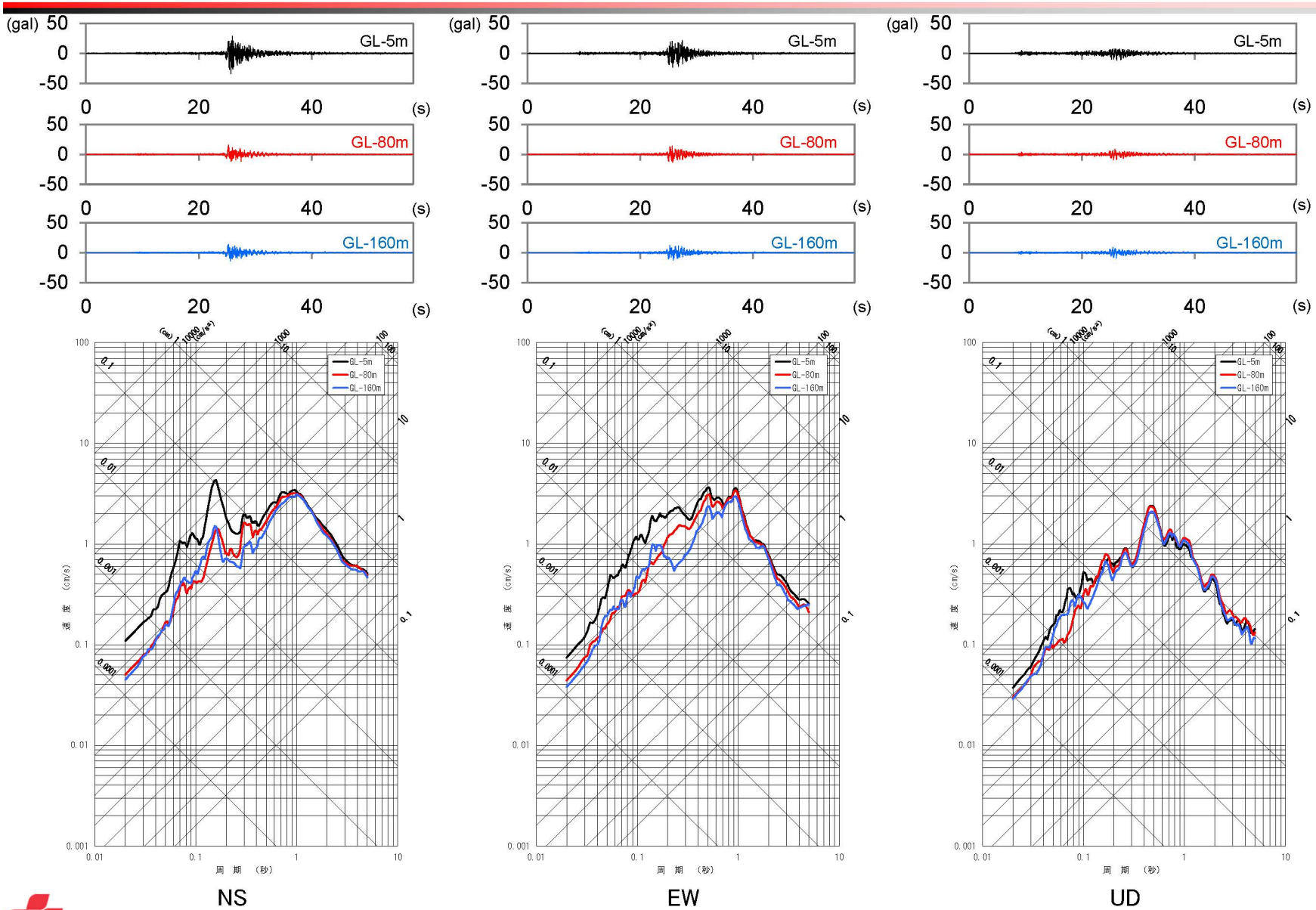
NS EW UD

No.18 2006.6.6 伊予灘の地震 M3.6

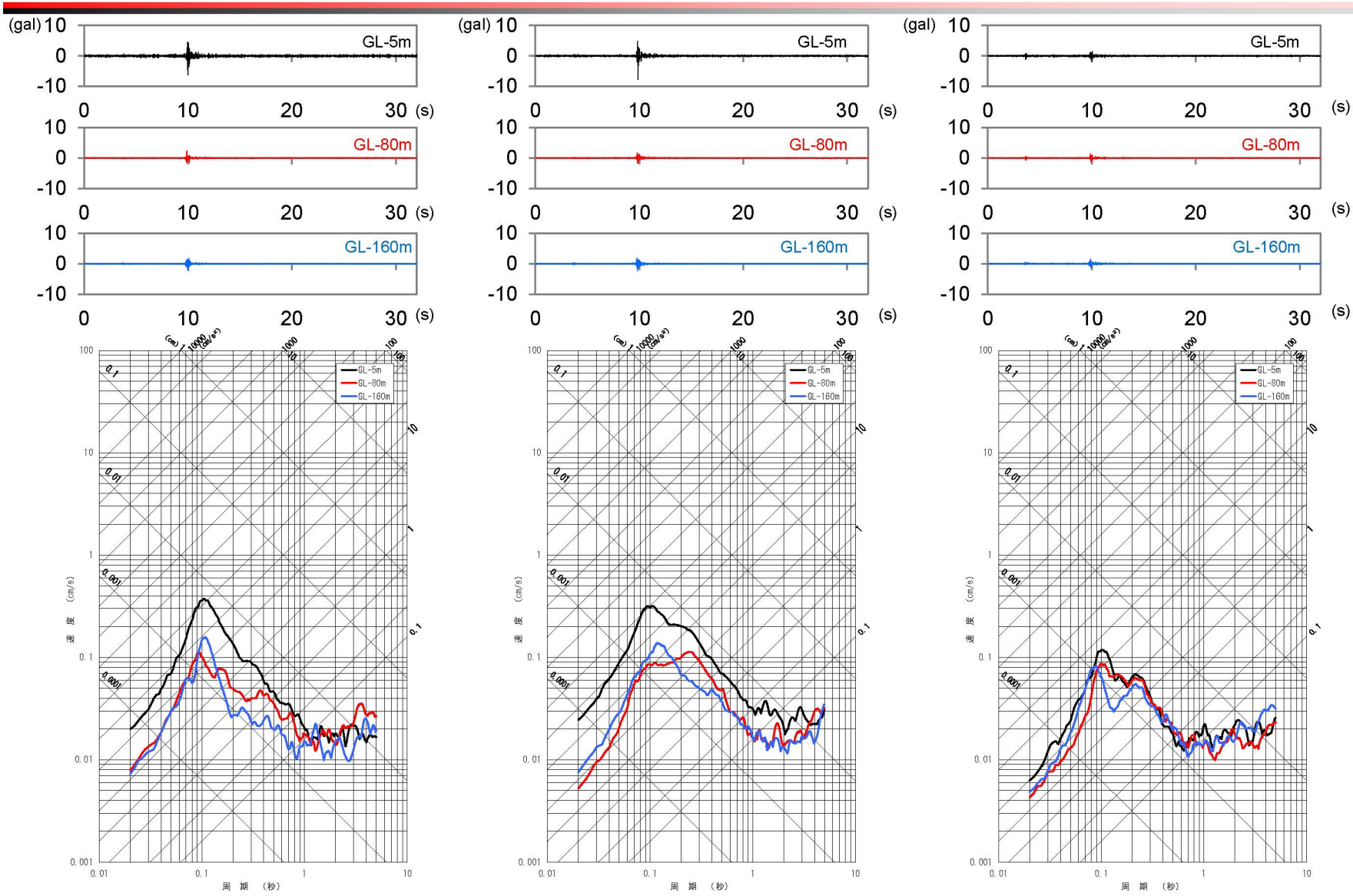


NS EW UD

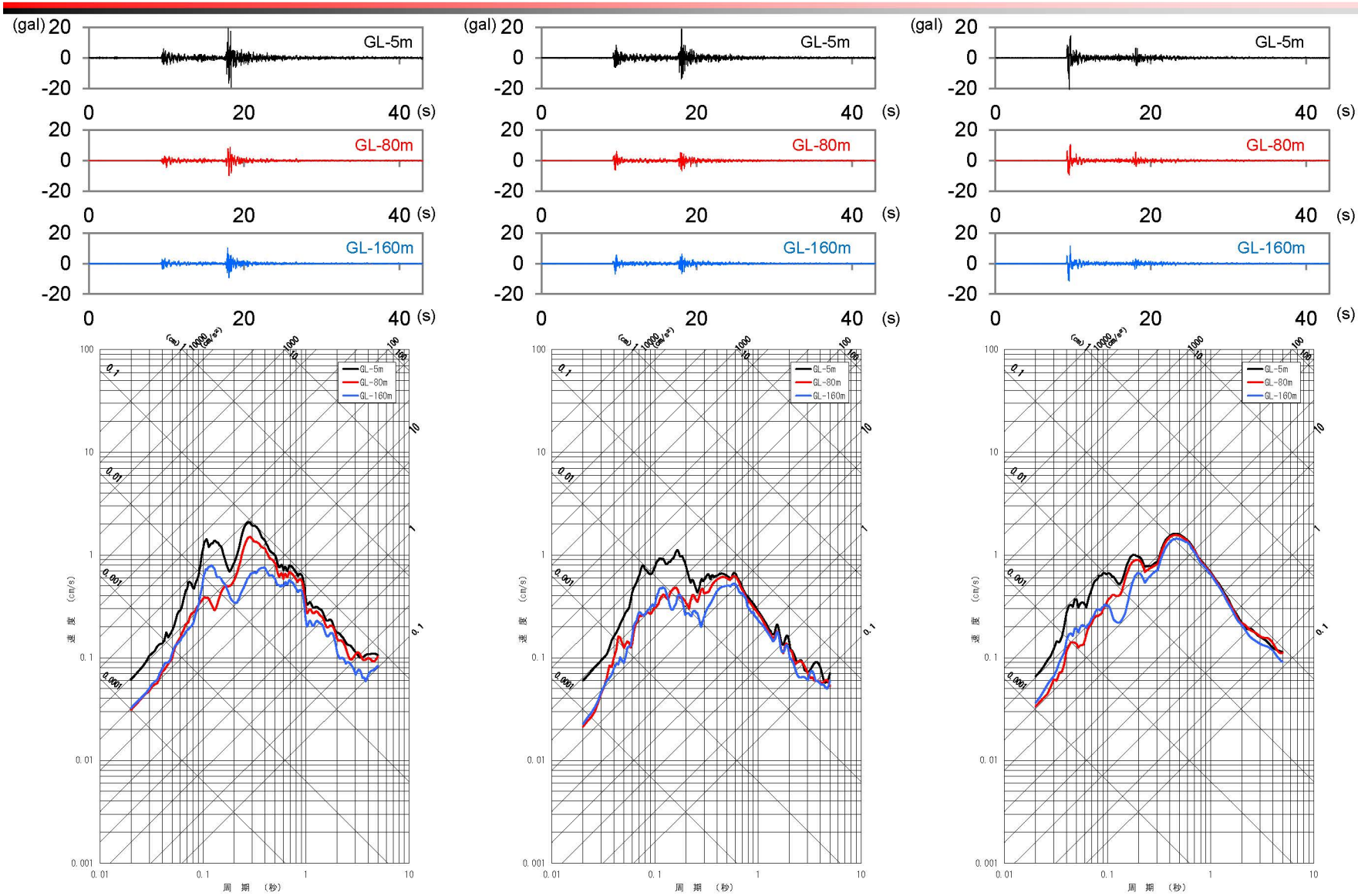
No.19 2006.6.12 大分県西部の地震 M6.2



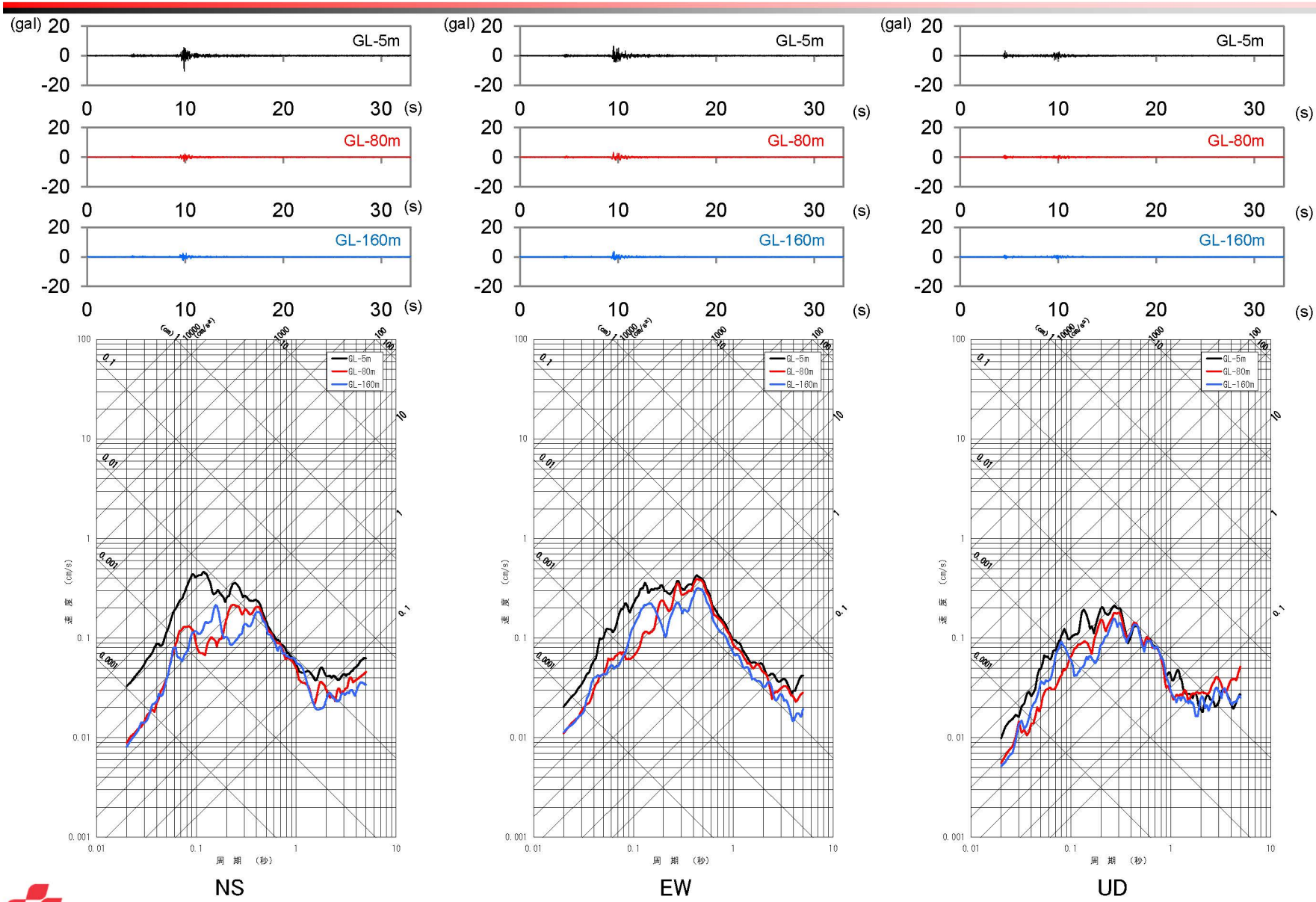
No.20　2006.8.23　伊予灘の地震　M3.6



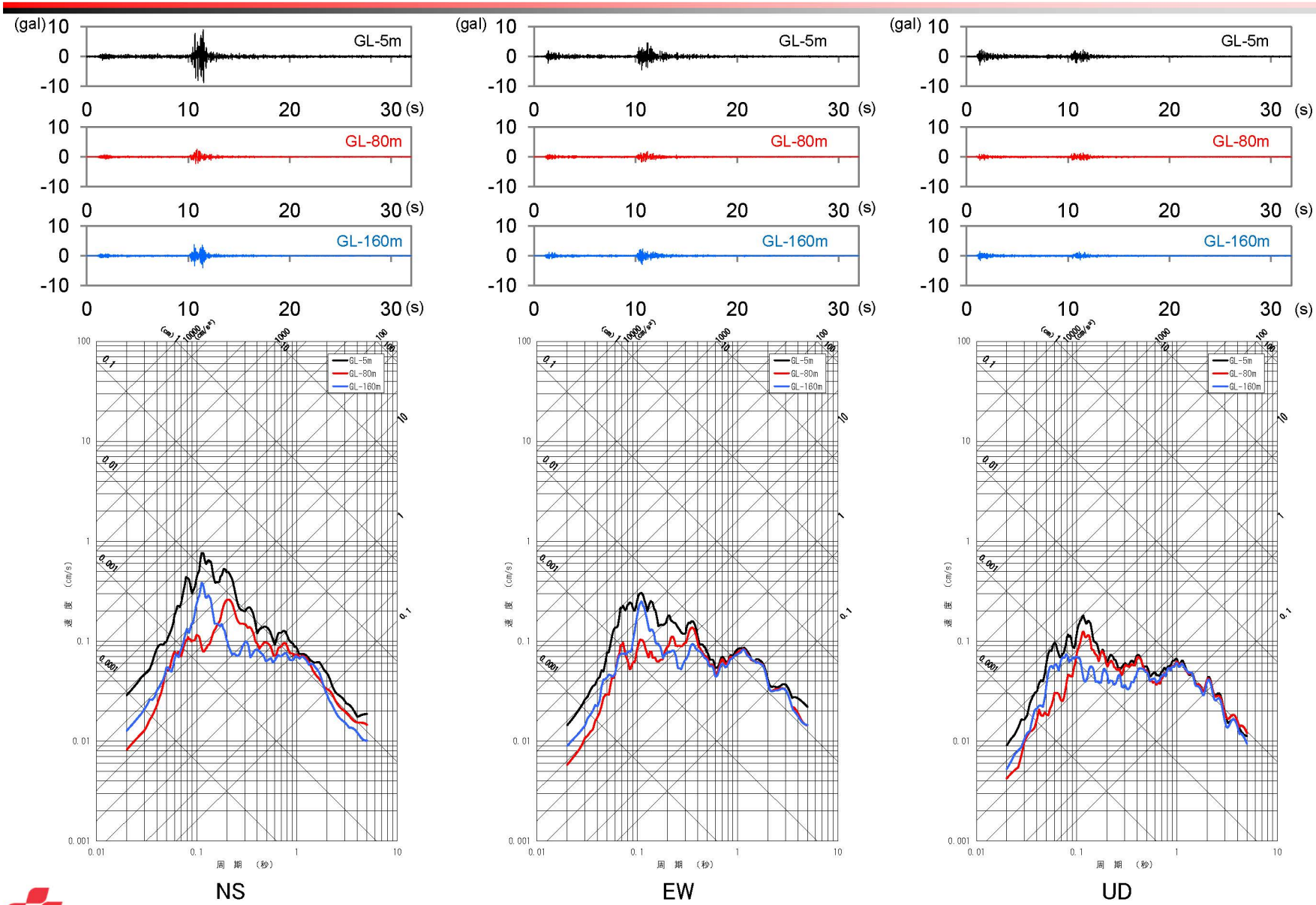
No.21　2006.9.26　伊予灘の地震　M5.3



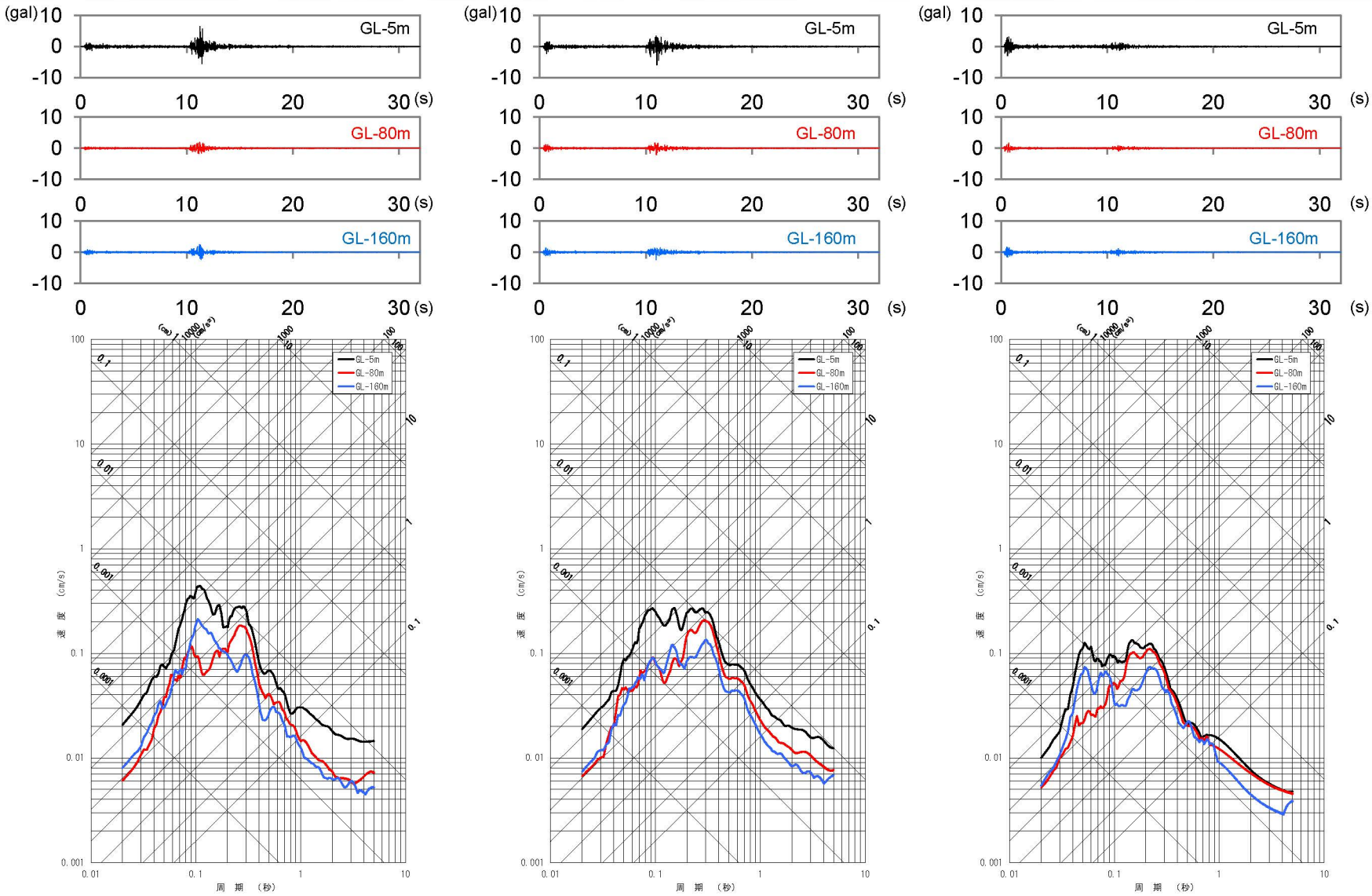
No.22 2006.11.19 豊後水道の地震 M4.2



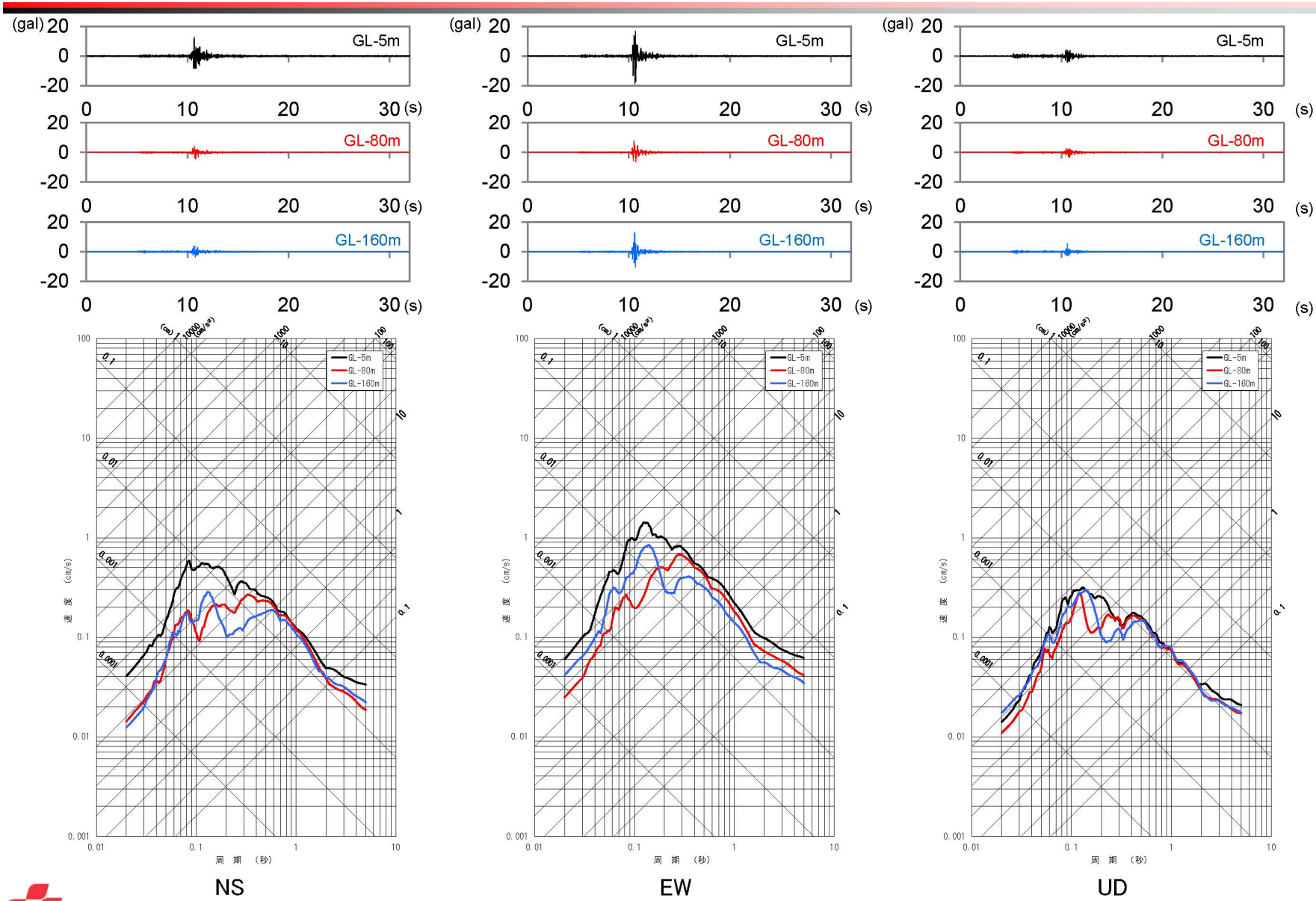
No.23　2009.1.25　伊予灘の地震　M4.4



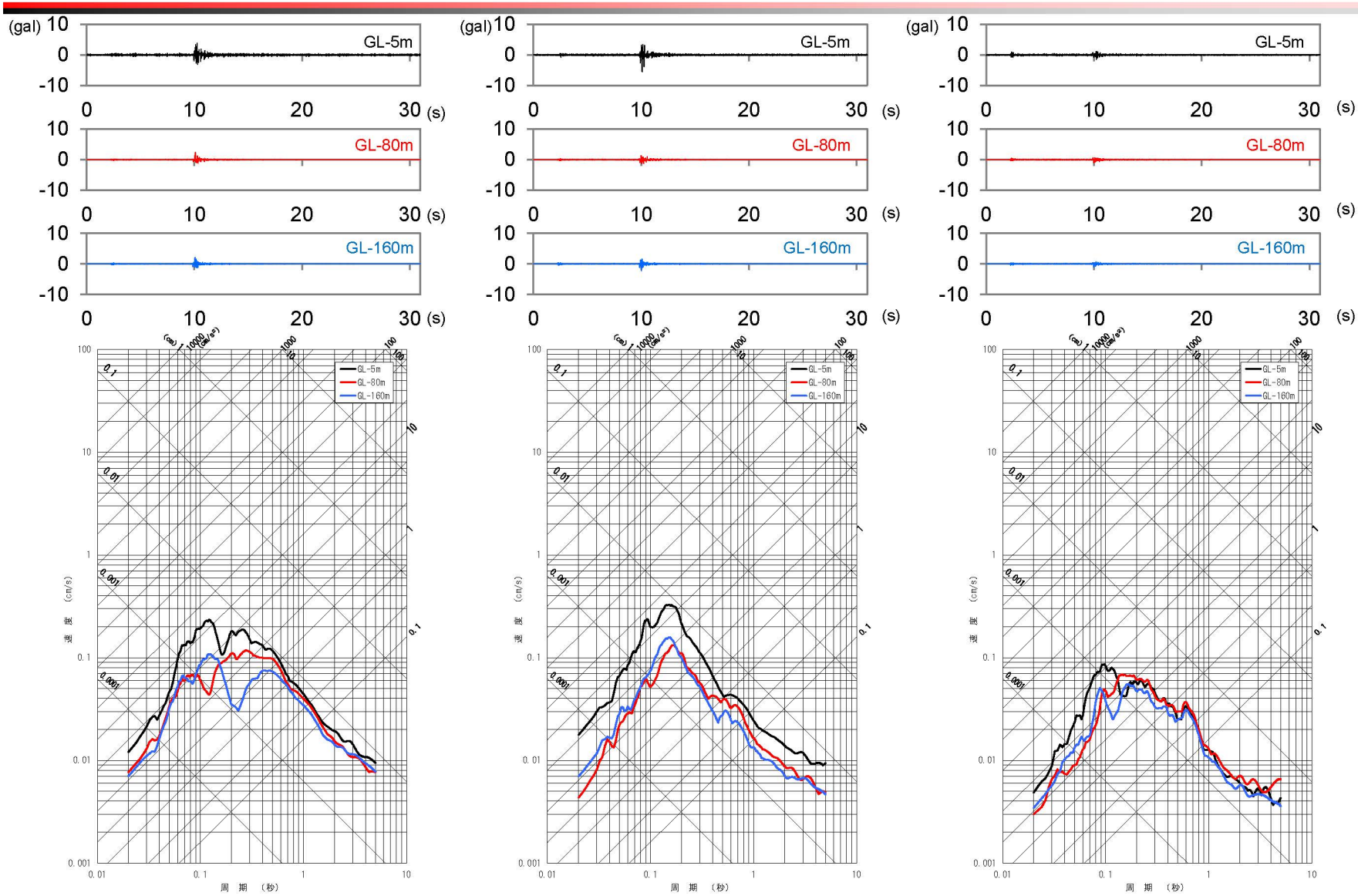
No.24　2009.3.28　伊予灘の地震　M3.9



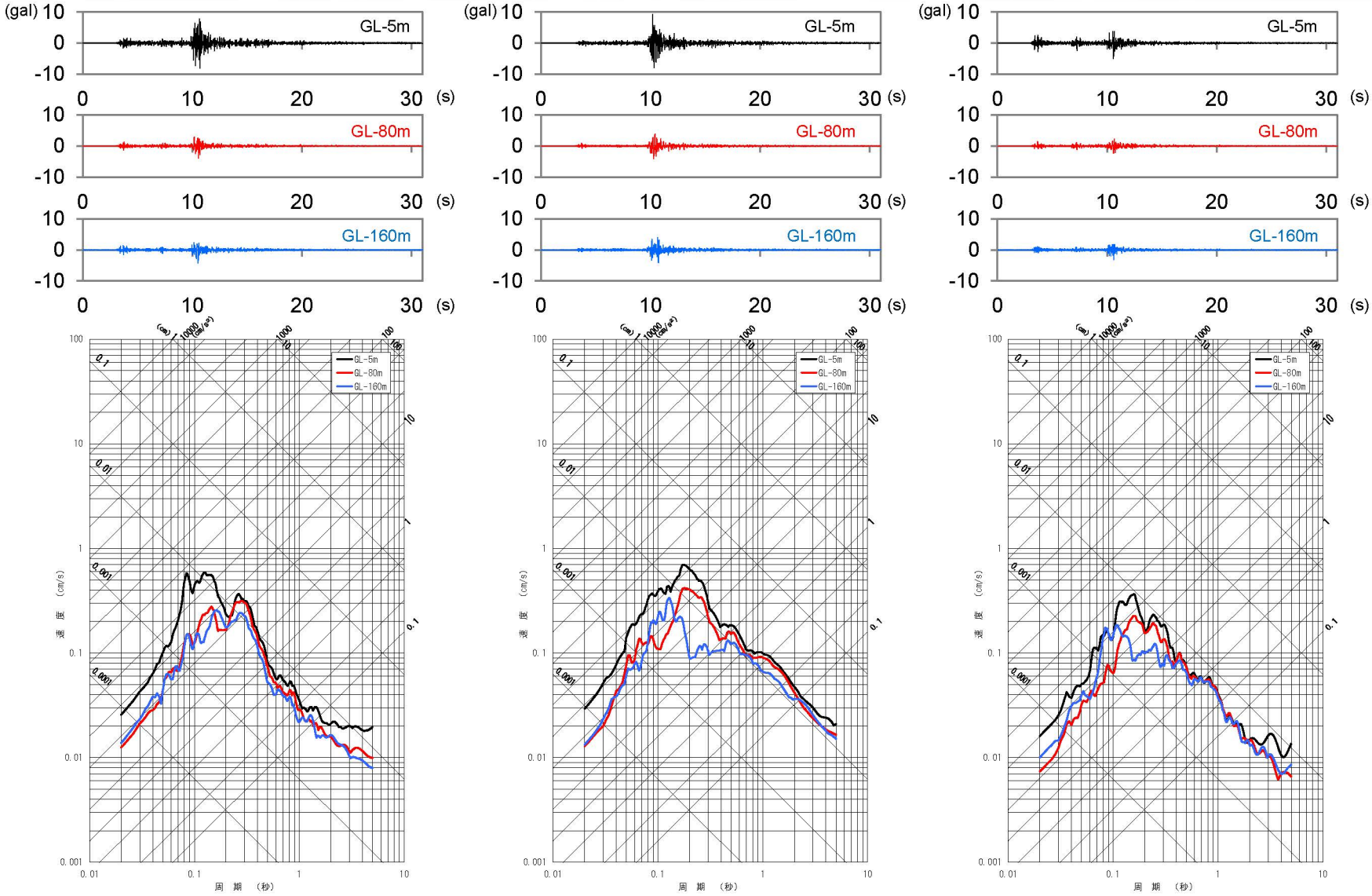
No.25 2010.4.17 南予の地震 M4.3



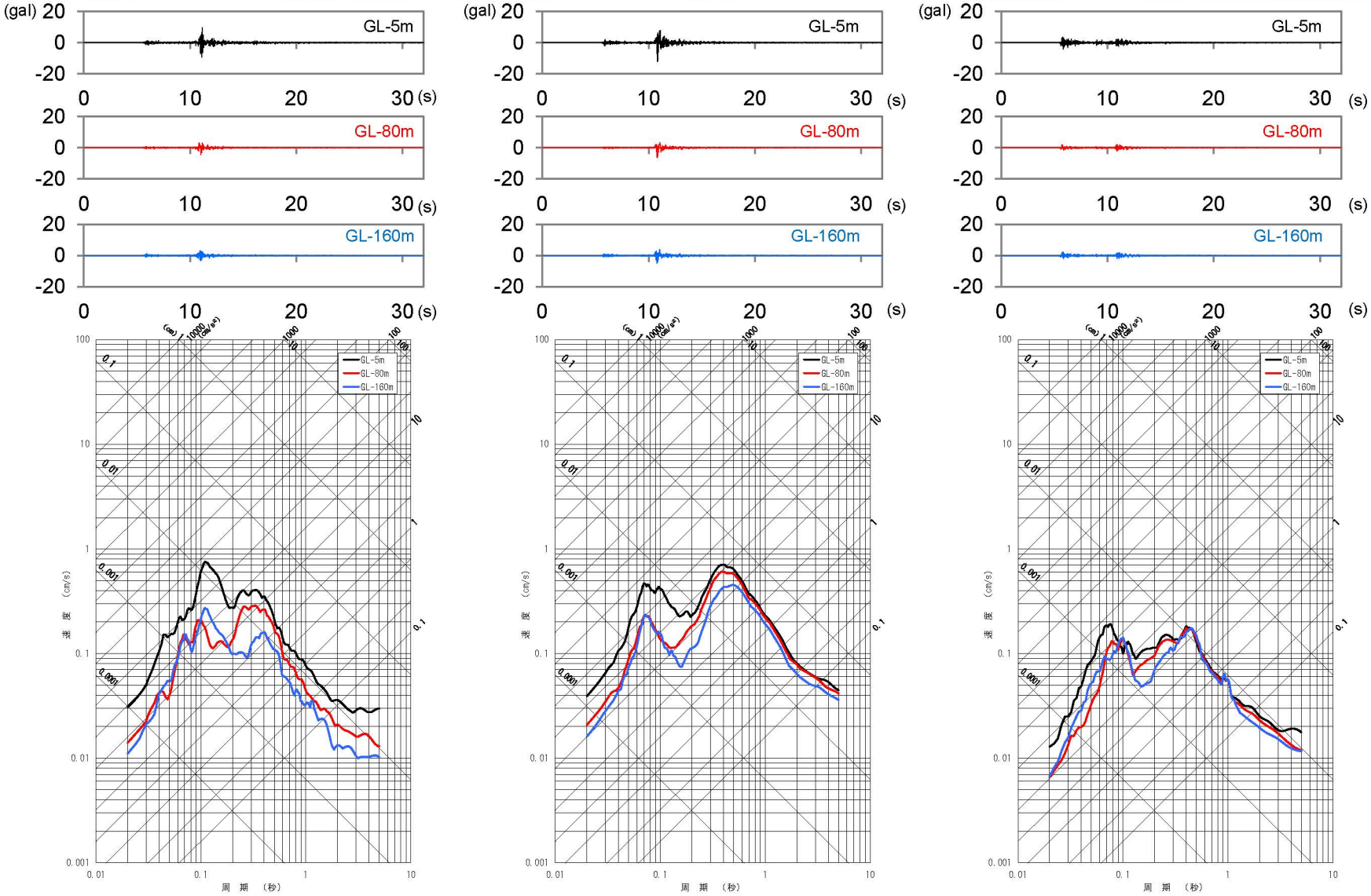
No.26 2011.6.29 伊予灘の地震 M3.8



No.27 2012.9.8 伊予灘の地震 M4.5

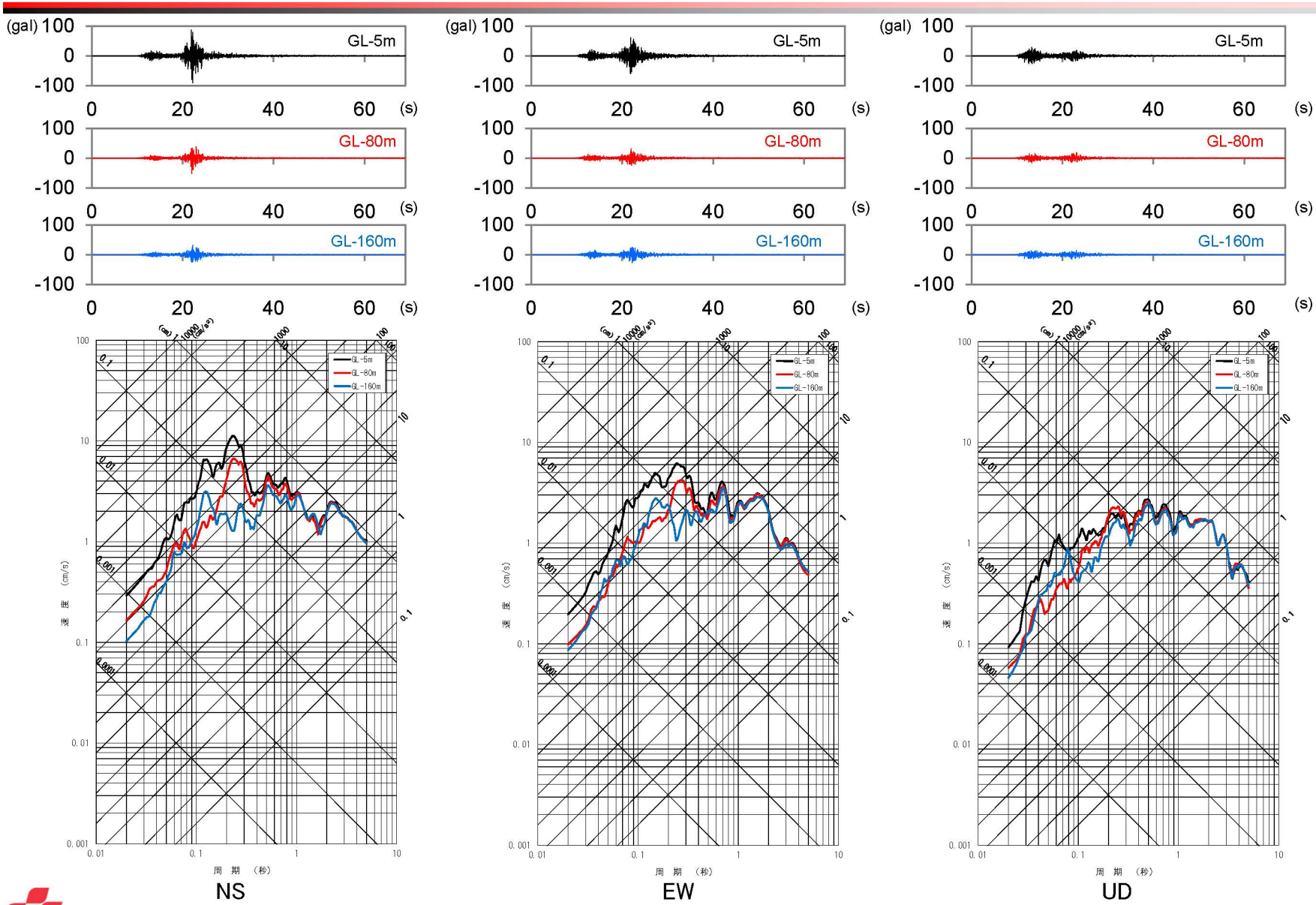


No.28 2012.12.22 伊予灘の地震 M4.5

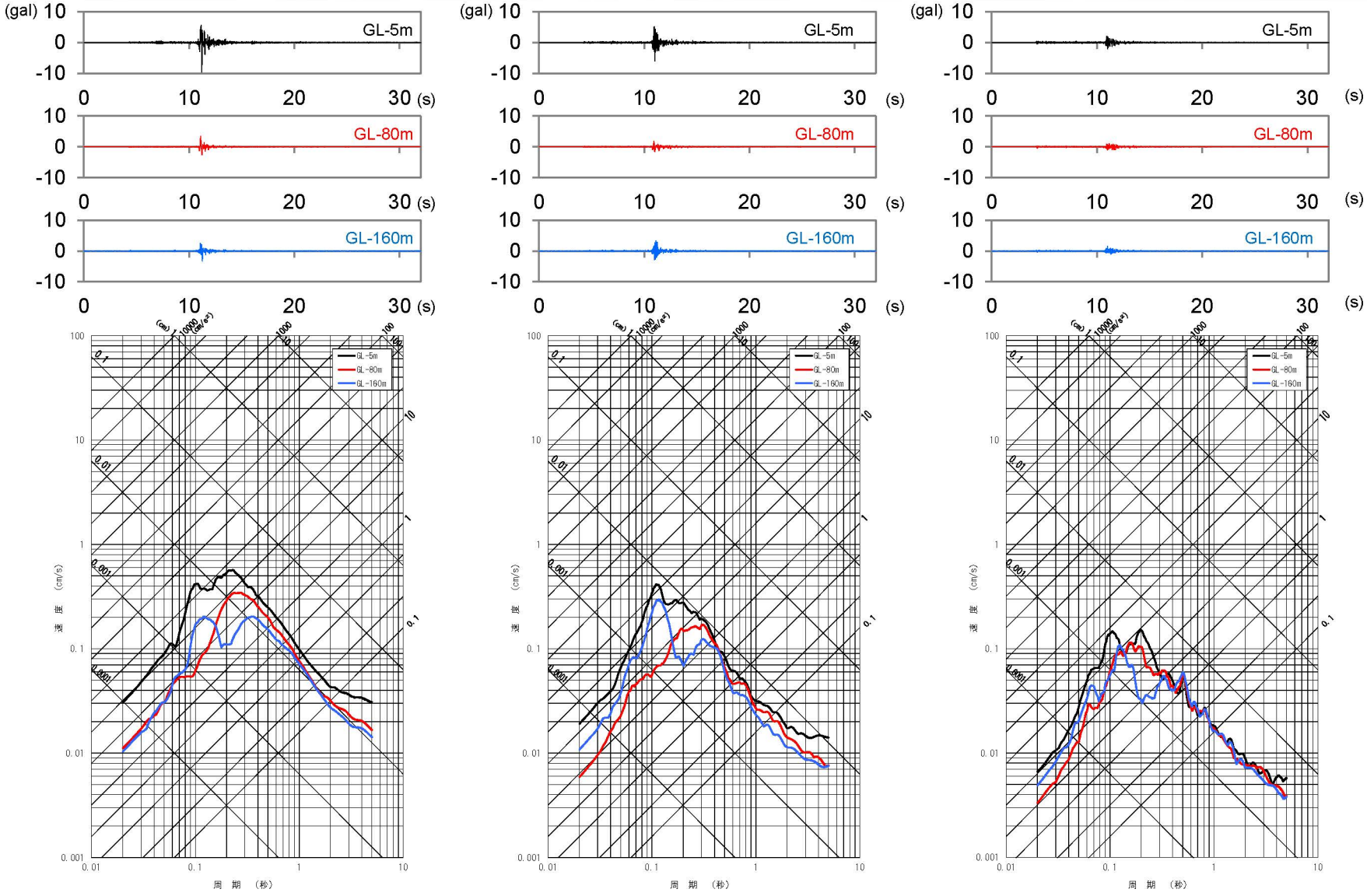


NS EW UD

No.29 2014.3.14 伊予灘の地震 M6.2

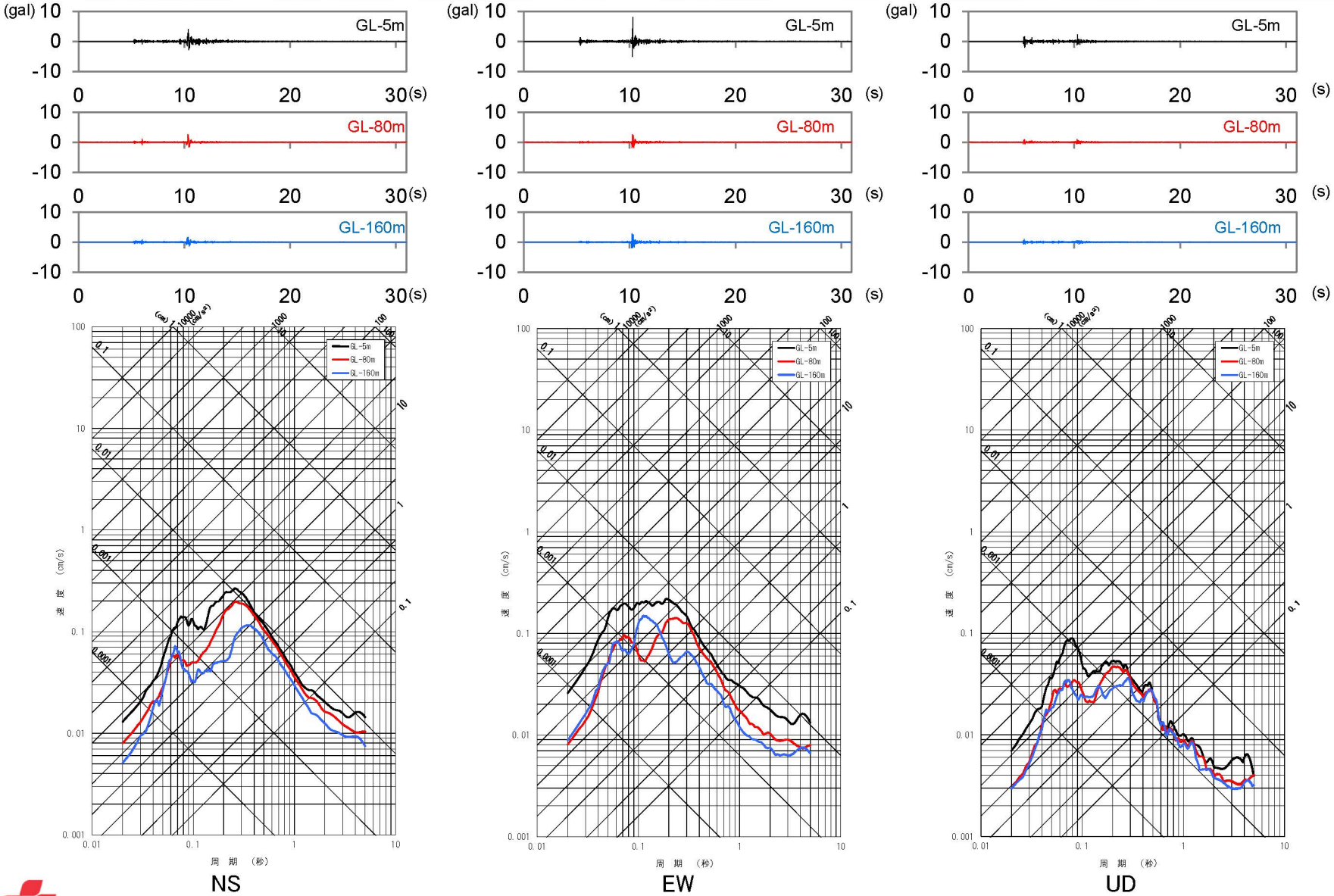


No.30 2015.2.3 南予の地震 M3.9

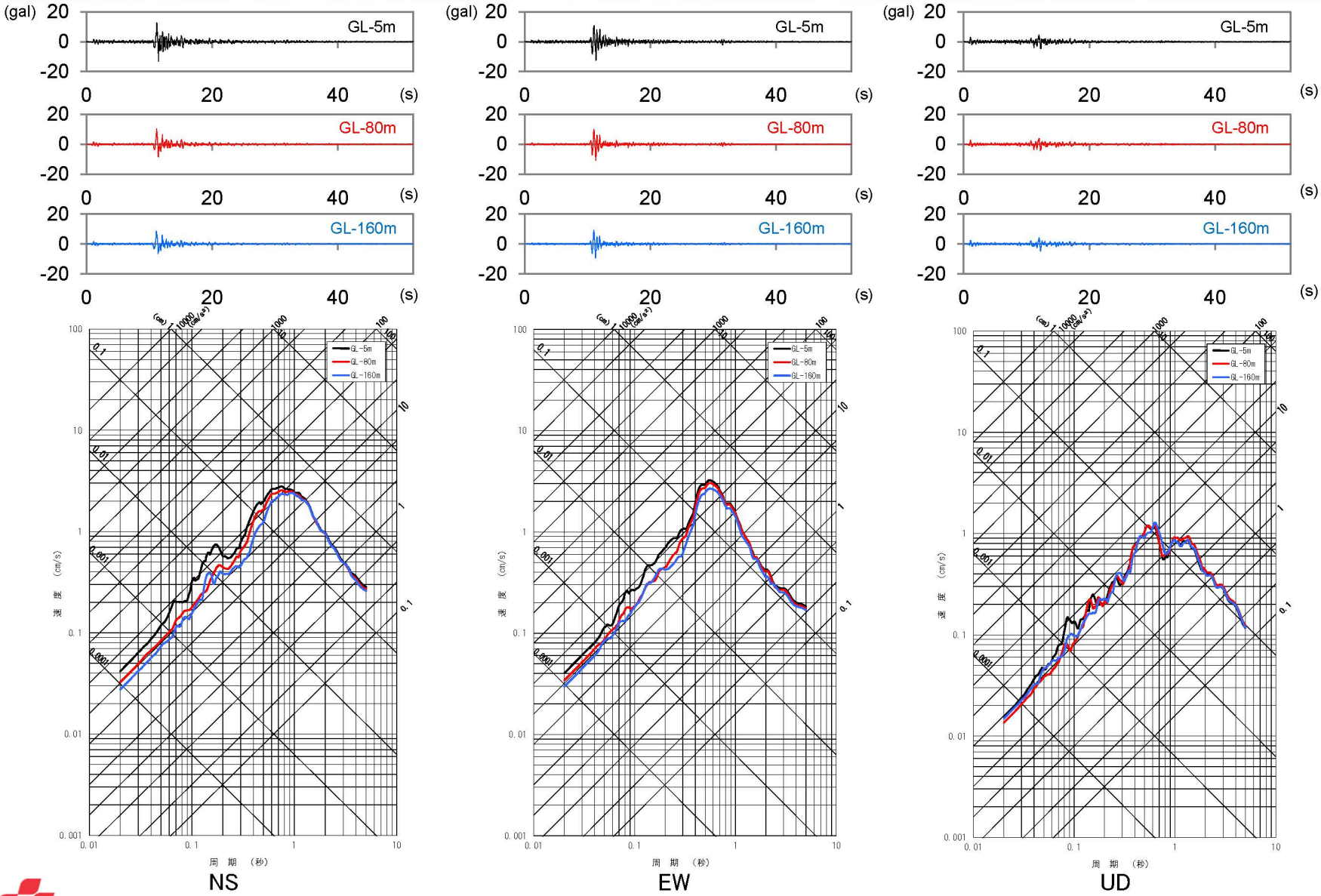


NS EW UD

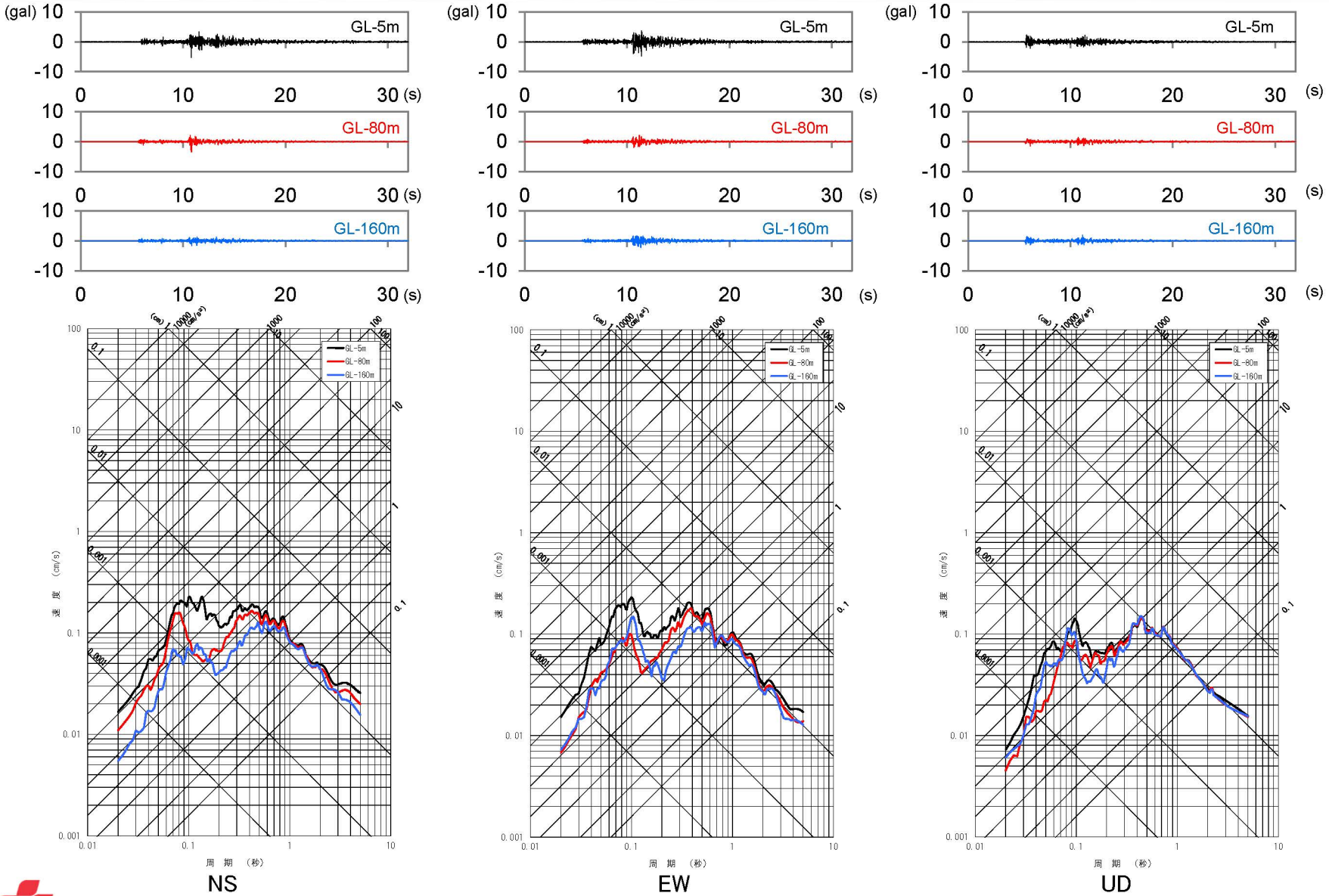
No.31　2015.7.3　伊予灘の地震　M3.9



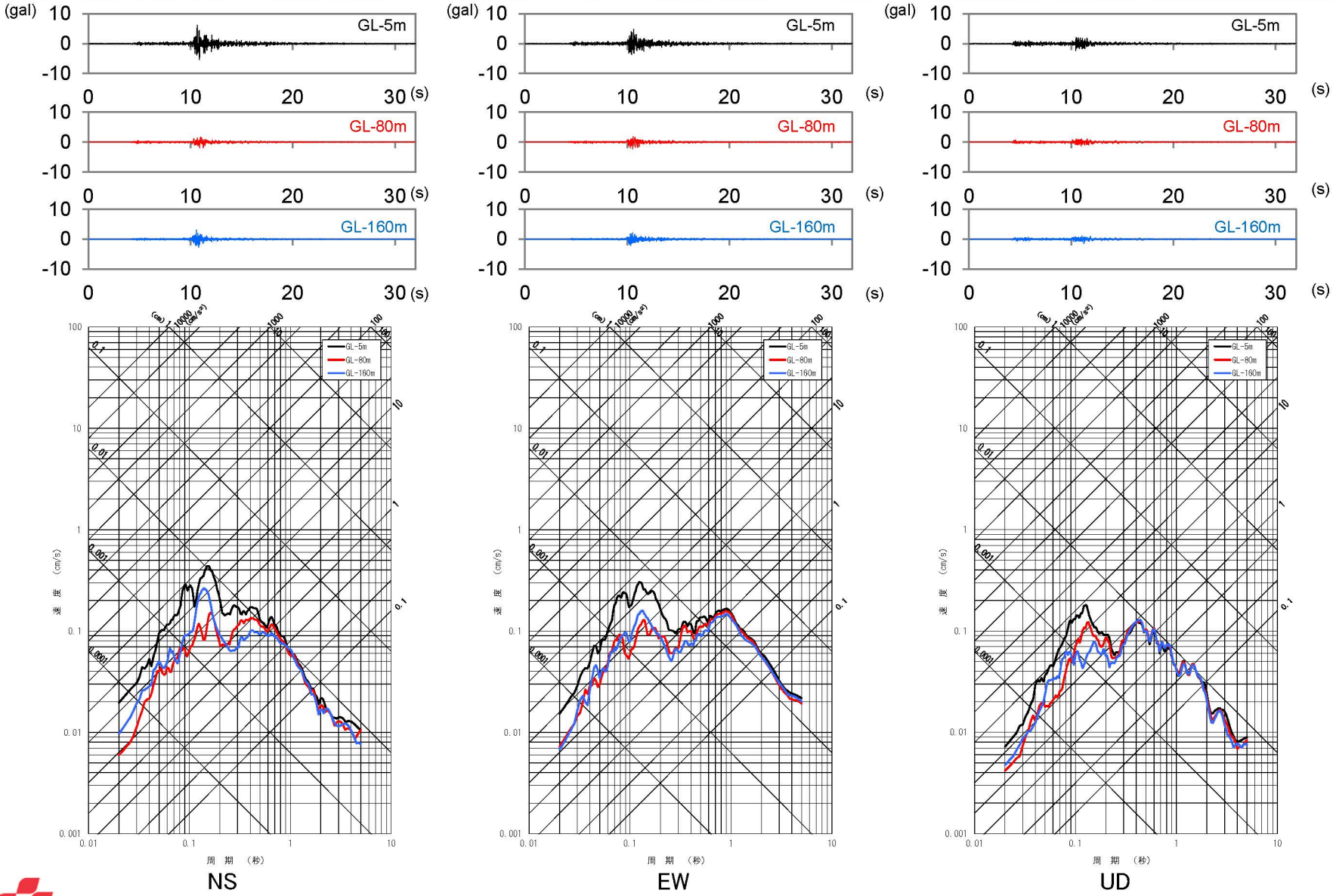
No.32 2015.7.13 大分県南部の地震 M5.7



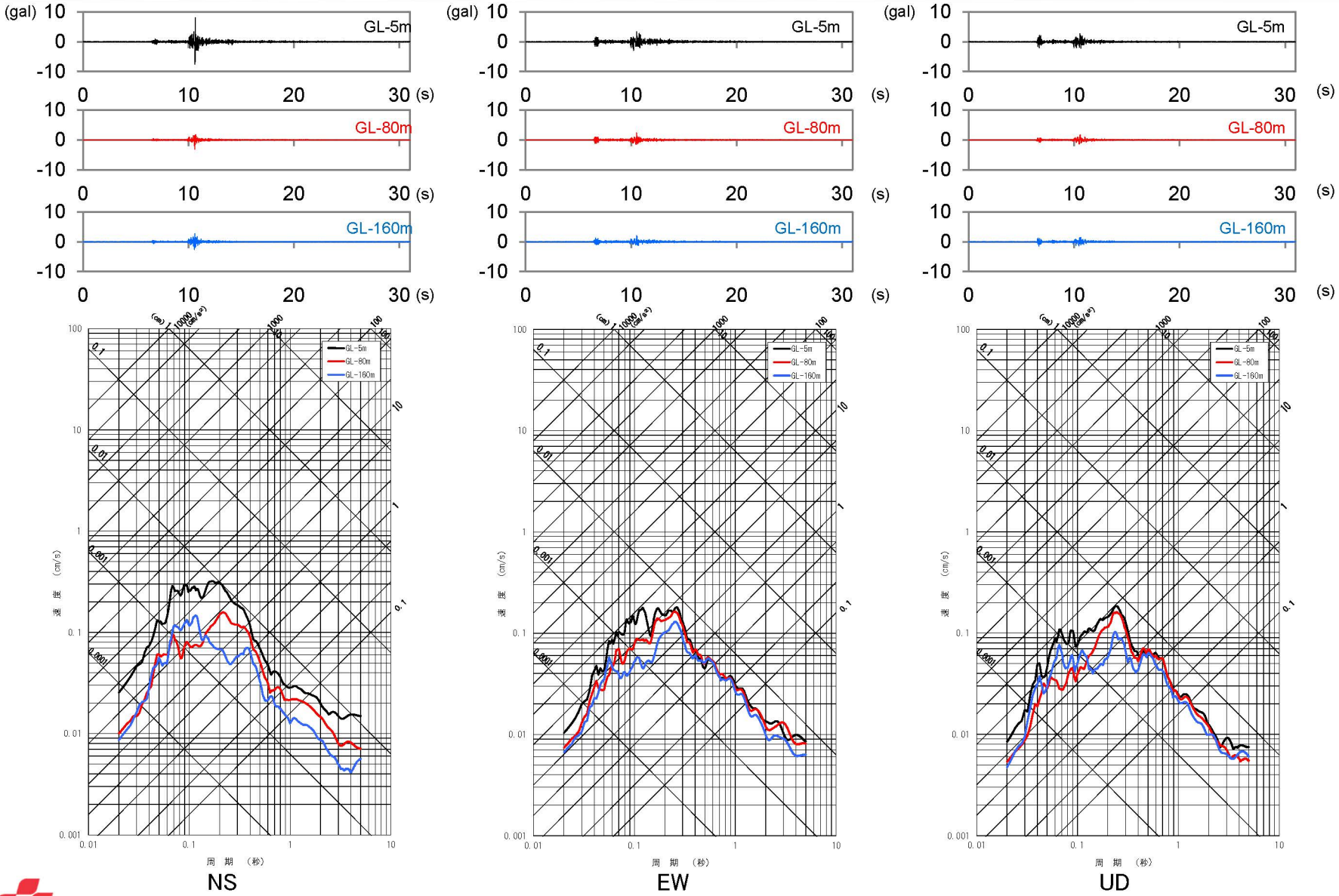
No.33　2015.7.24　南予の地震　M4.6



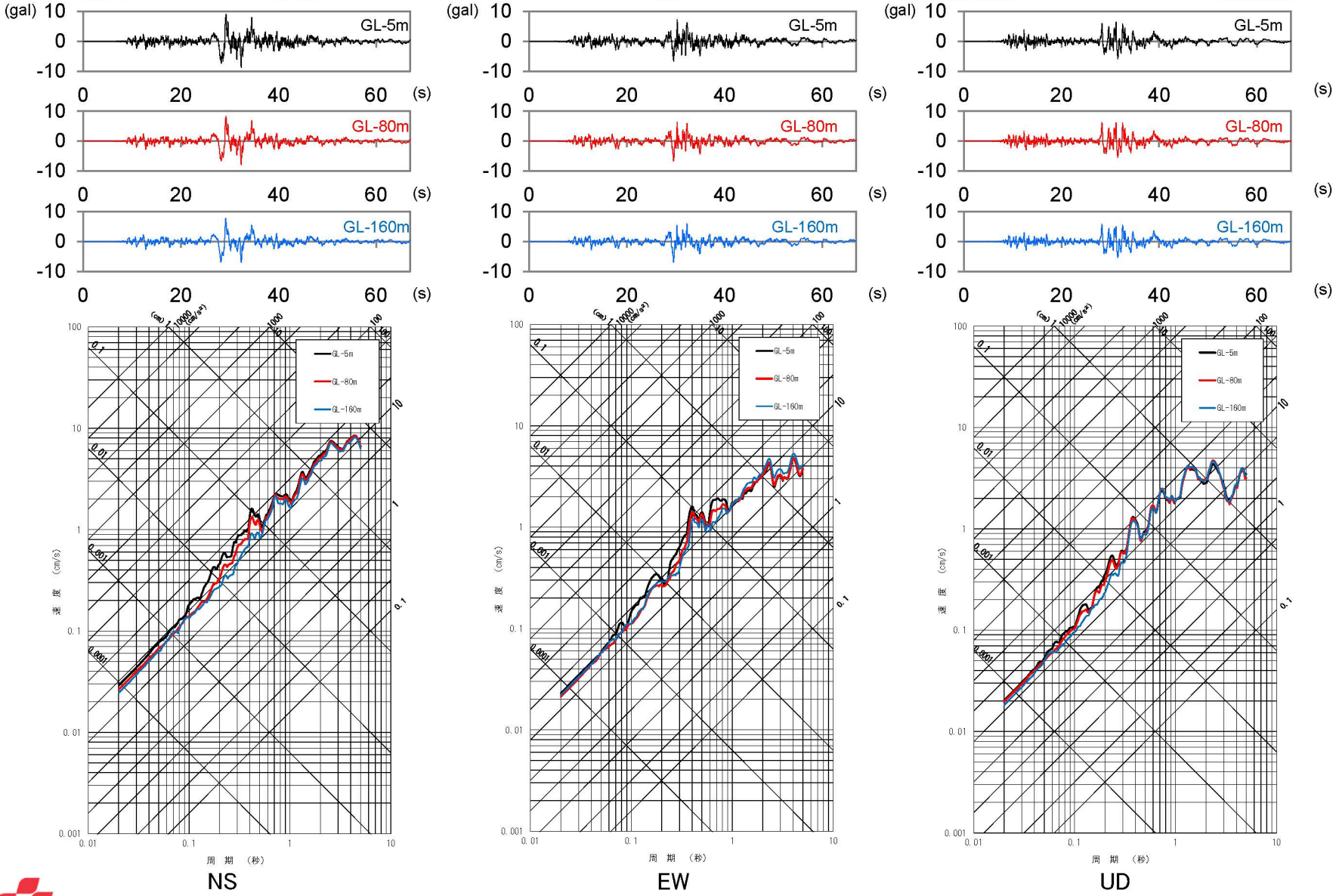
No.34 2015.8.21 豊後水道の地震 M4.3



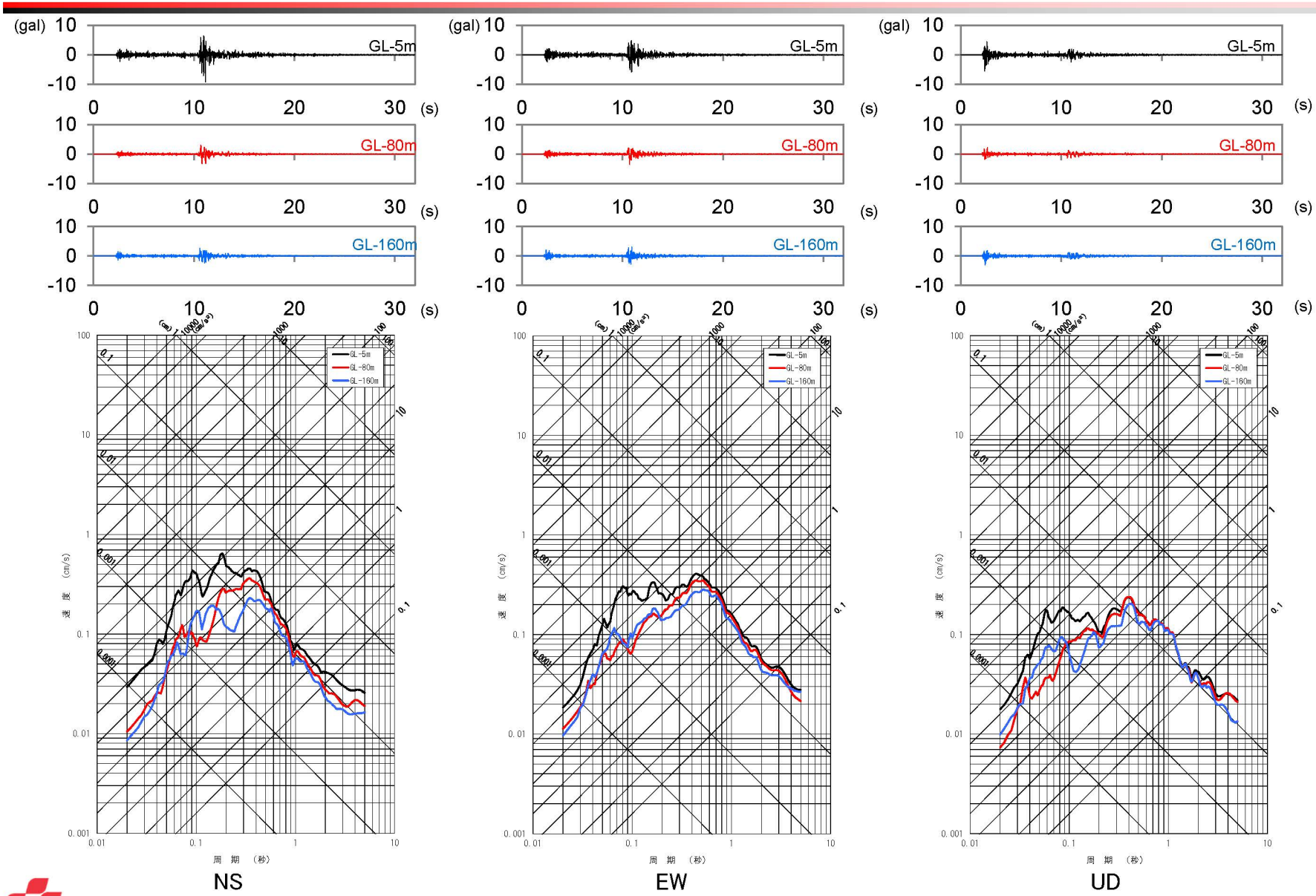
No.35 2016.2.12 南予の地震 M3.8



No.36 2016.4.16 熊本地震 M7.3

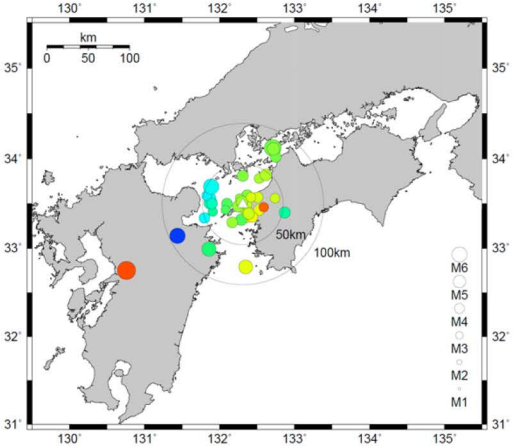


No.37 2016.8.15 伊予灘の地震 M4.3

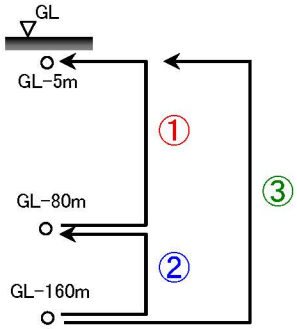


最大加速度5Gal以上の観測記録における伝達関数

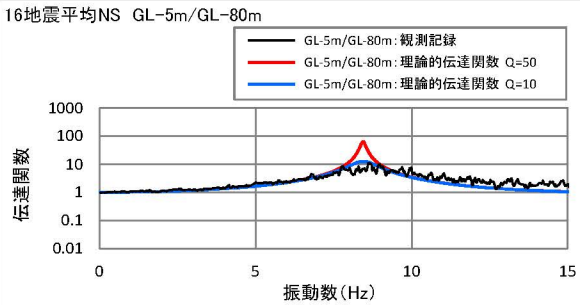
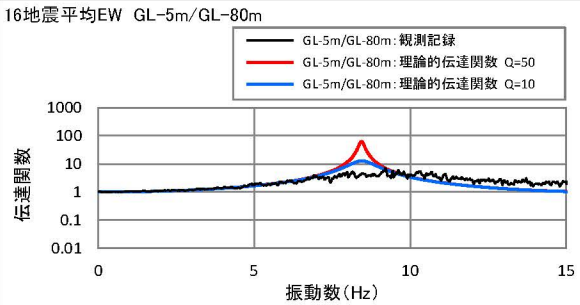
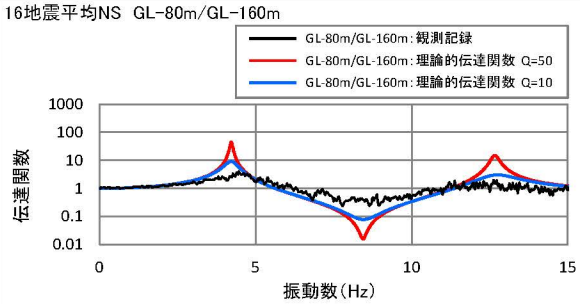
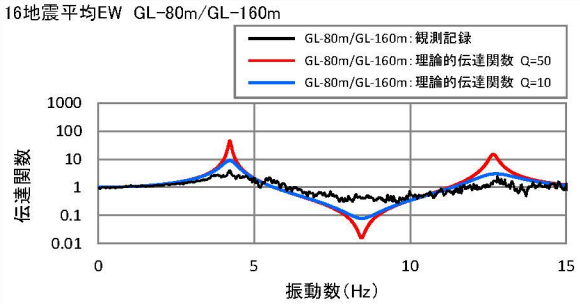
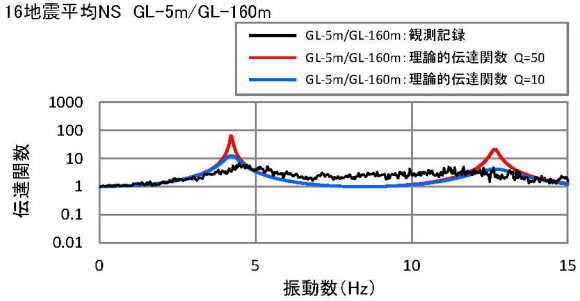
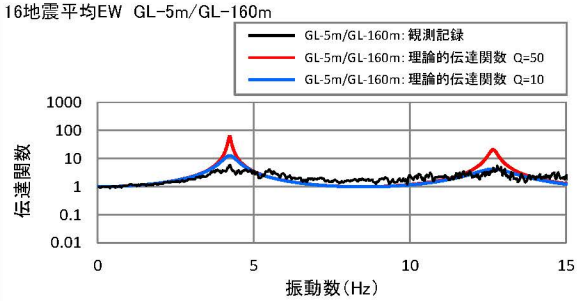
Transfer function (maximum acceleration : 5gal or more)



地震位置図



伝達関数検討位置

	NS方向	EW方向
①		
②		
③		

5Gal以上の観測記録による伝達関数は，10Gal以上の観測記録による伝達関数とほぼ同様の傾向を示し，10Gal以上の観測記録のみで伝達関数を評価することは妥当と考えられる。

（参考資料2）

Appendix 2

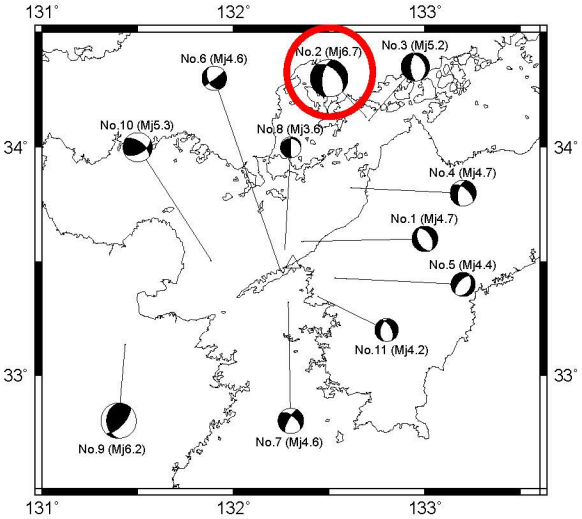
芸予地震に関連する補足

Support documentation related with the Geiyo earthquake

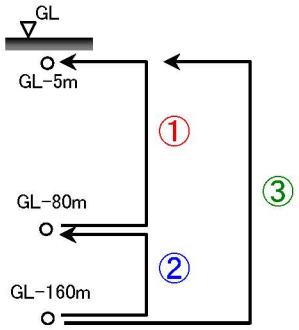
2001年芸予地震における伝達関数の分析

Analysis of transfer function in 2001 Geiyo Earthquake, 2001.3.24 (M6.7)

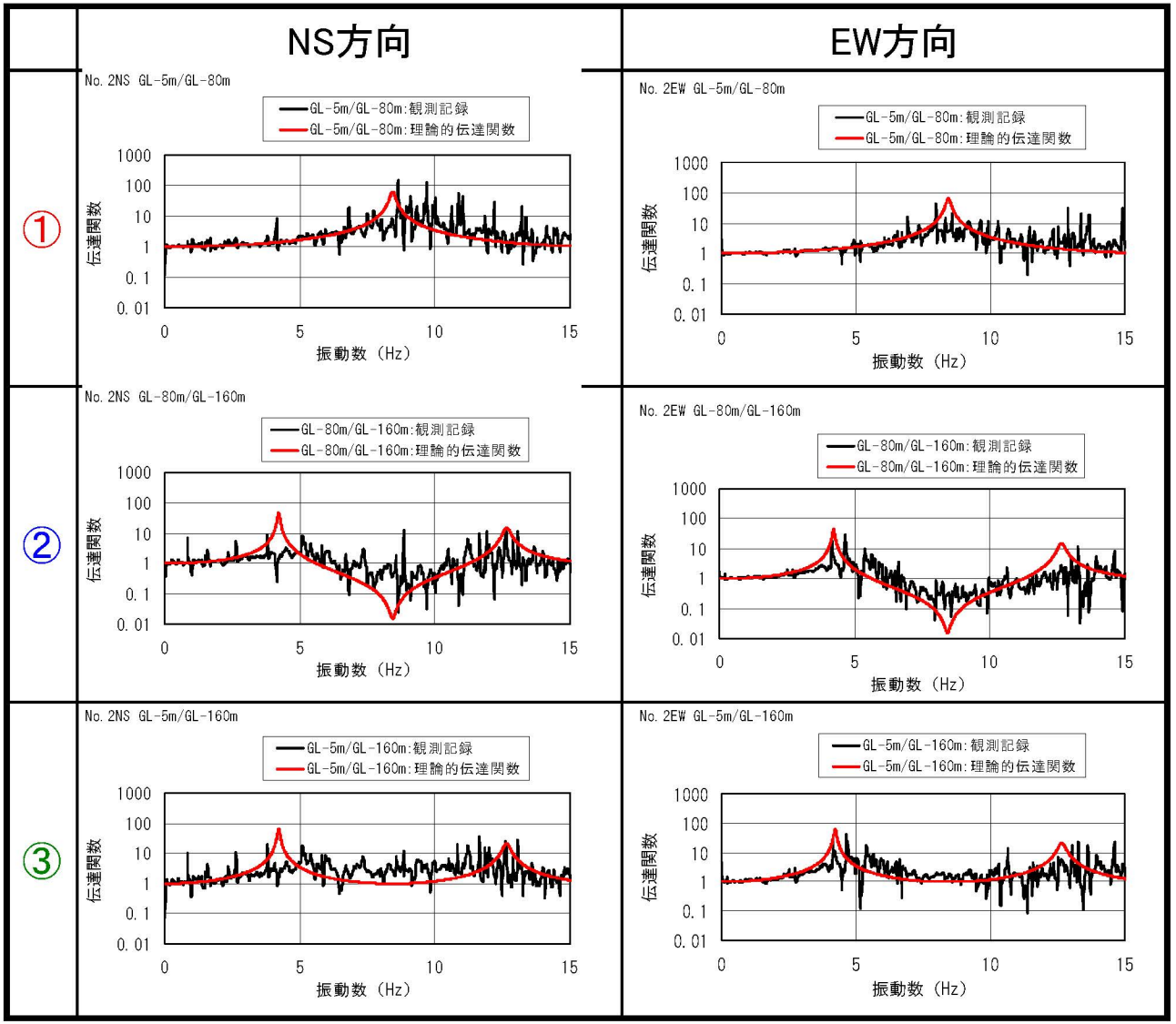
2001.3.24　Mj6.7 安芸灘（2001年芸予地震）



地震位置図



伝達関数検討位置



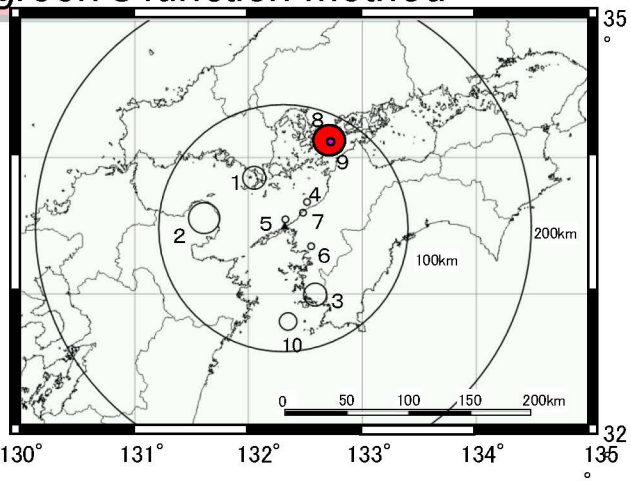
理論的伝達関数は，地盤構造モデルの表層2層から算定した

2001年芸予地震の観測記録のシミュレーション（経験的グリーン関数法）

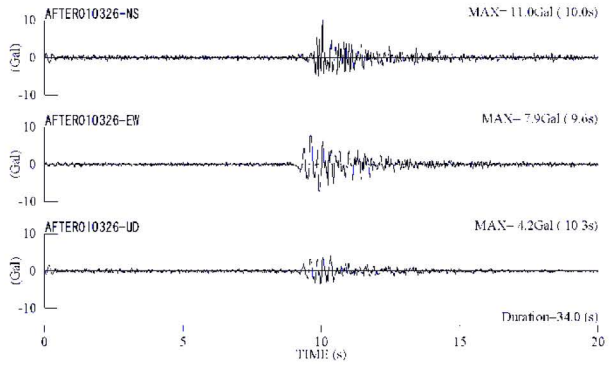
Simullation of the 2001 Geiyo Earthquake using the empirical green's function method

3月26日の余震記録を用いて本震のシミュレーションを行った。
地震動は解放基盤表面（標高+10m，Vs=2600m/s）で算定した。

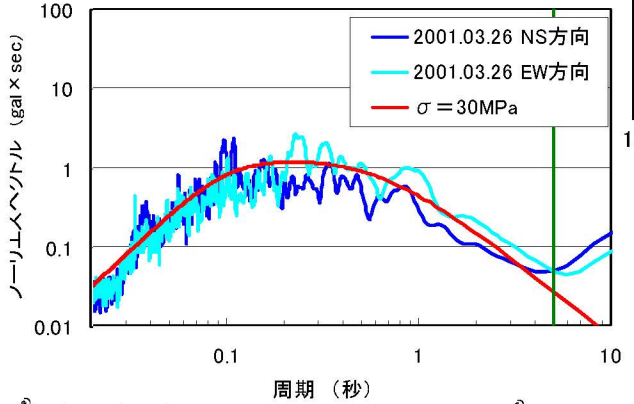
No.		日時	M	深さ(km)	震央距離(km)
8	本震	2001年3月24日15:28	6.7	46	80
9	余震	2001年3月26日 5:41	5.2	46	78

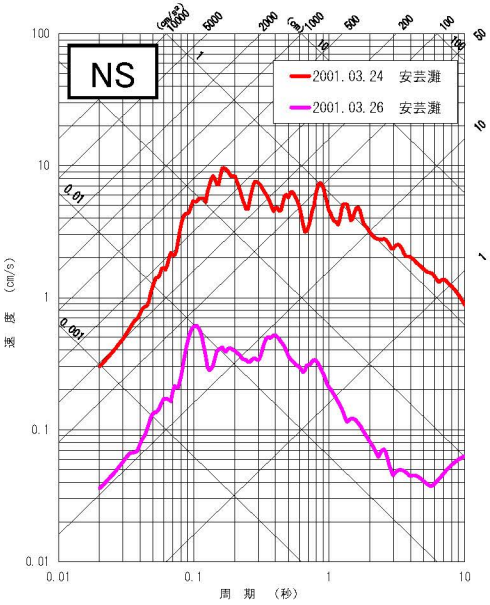


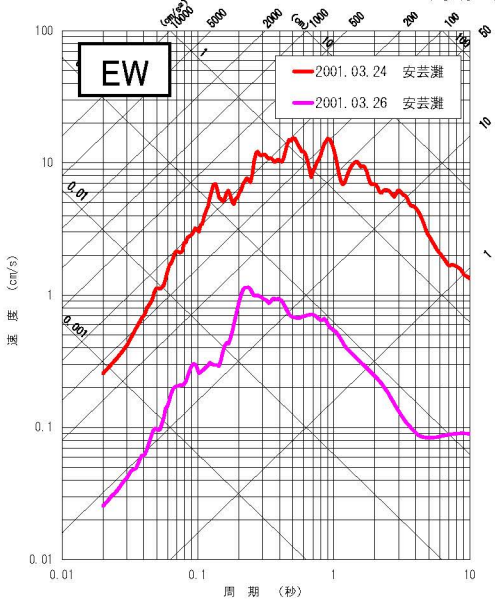
○余震の時刻歴波形

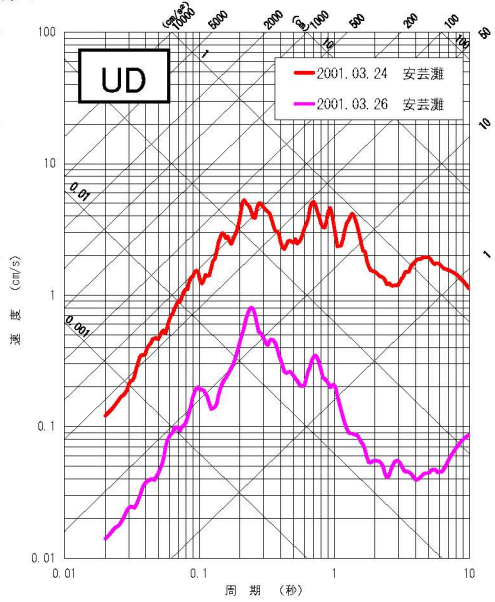


○余震のフーリエスペクトル

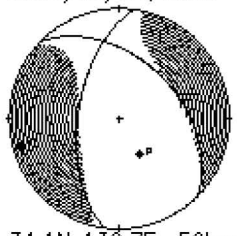






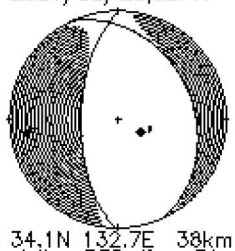


2001/03/24,15:28



34.1N 132.7E 50km Mw6.8
strike: 315 dip: 45 slip:-133
mxx:-0.38 mxy: 0.63 mxz: 0.30
myy: 1.43 myz:-0.48 mzz:-1.04
unit:1e+19 moment:1.51e+19Nm

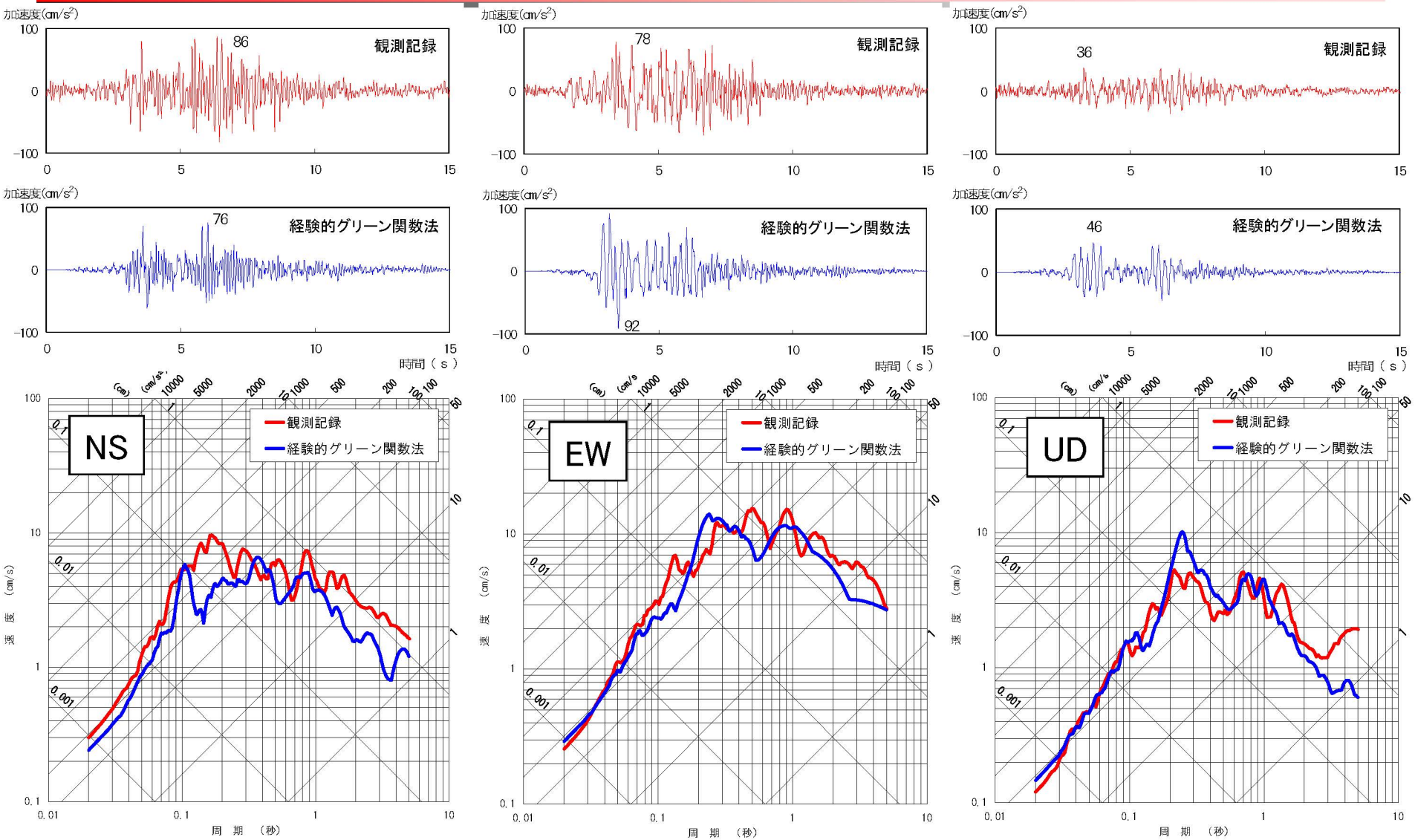
2001/03/26,05:41



34.1N 132.7E 38km Mw5.1
strike: 335 dip: 31 slip:-113
mxx:-0.36 mxy: 0.91 mxz: 0.45
myy: 4.07 myz:-2.55 mzz:-3.71
unit:1e+16 moment:4.76e+16Nm

2001年芸予地震の観測記録のシミュレーション（経験的グリーン関数法）

Simullation of the 2001 Geiyo Earthquake using the empirical green's function method



経験的グリーン関数法によるシミュレーション結果は，スペクトルレベルや継続時間，最大値，振幅包絡線の形状等，観測記録と整合的であると考える。

（参考資料3）

Appendix 3

熊本地震に関連する補足

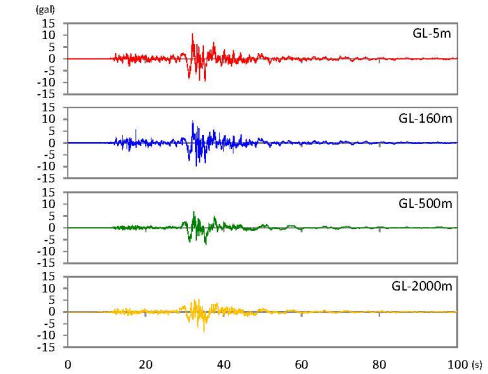
Support documentation related with the Kumamoto earthquake

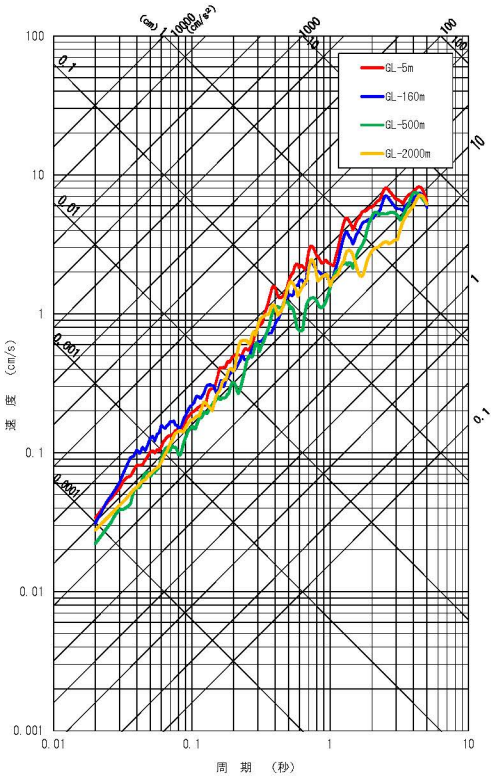
伊方発電所における熊本地震の地震記録

Seismic observation record of the Kumamoto earthquake in Ikata NPP

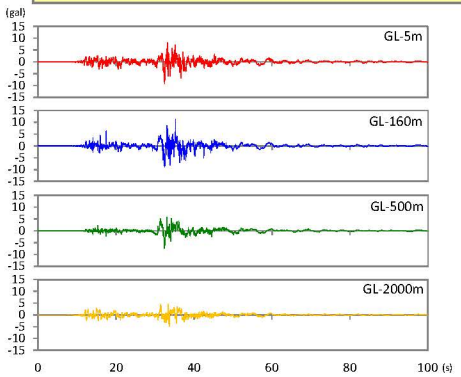
■2016年4月16日(M7.3)

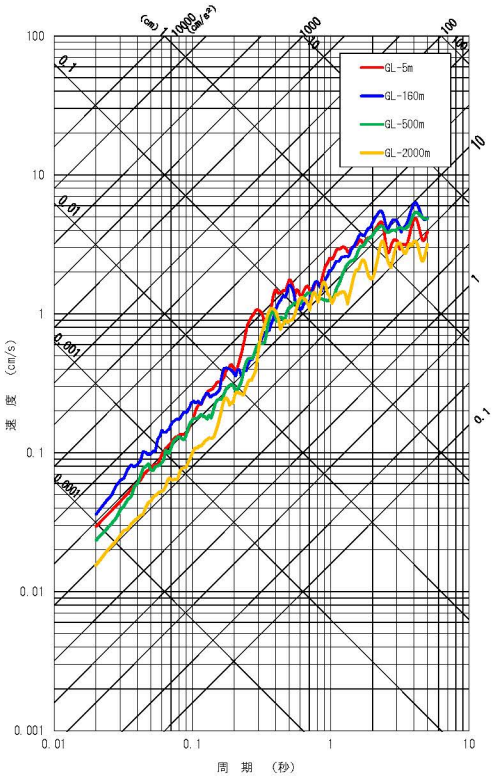
GL-2000mからGL-5mの観測記録において顕著な増幅は見られない



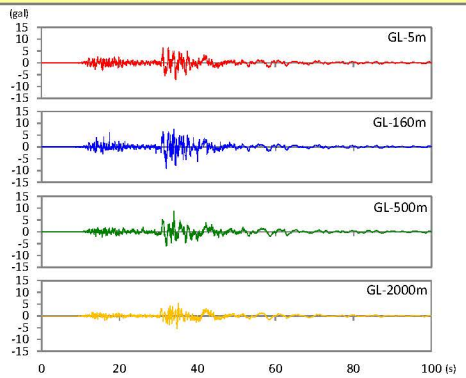


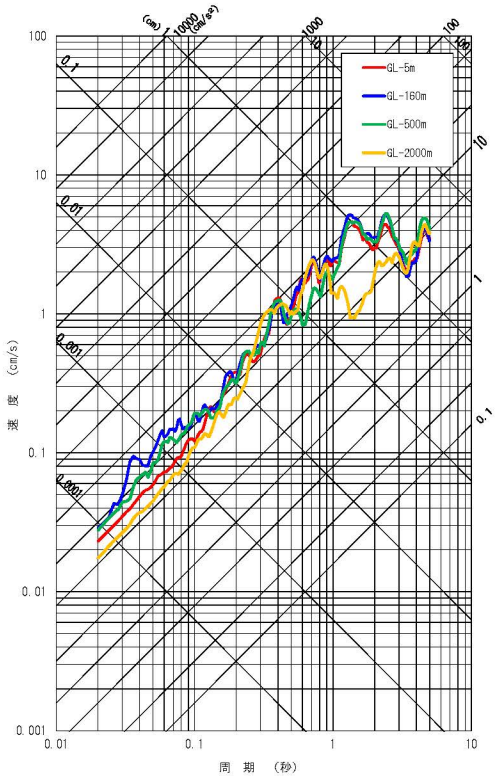
NS





EW





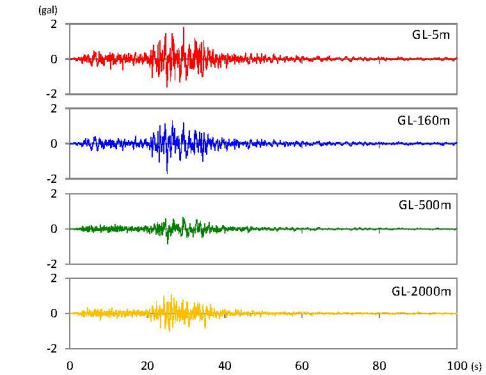
UD

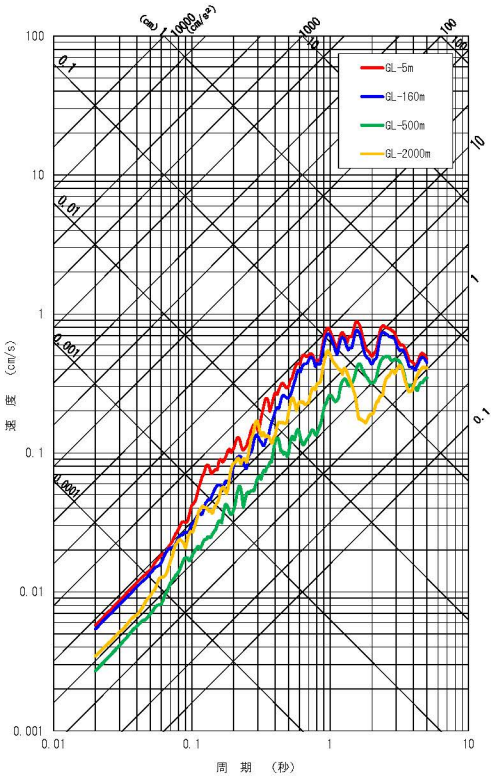
伊方発電所における熊本地震の地震記録

Seismic observation record of the Kumamoto earthquake in Ikata NPP

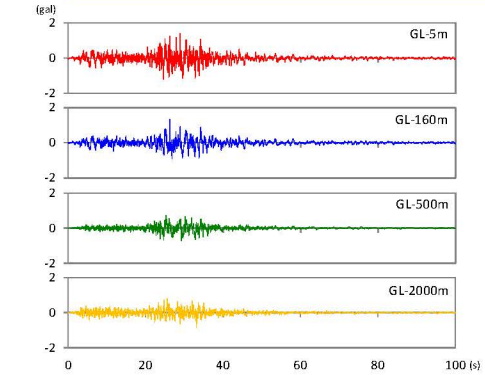
■2016年4月14日(M6.5)

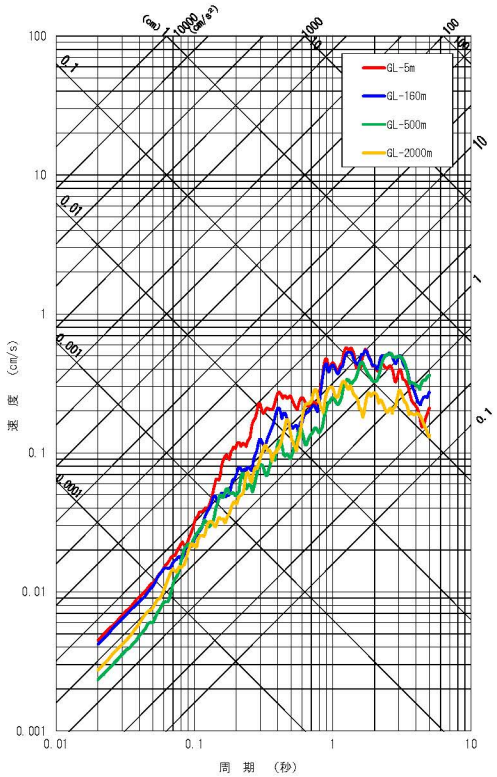
GL-2000mからGL-5mの観測記録において顕著な増幅は見られない



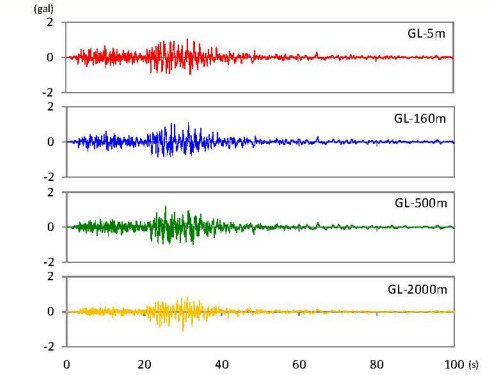


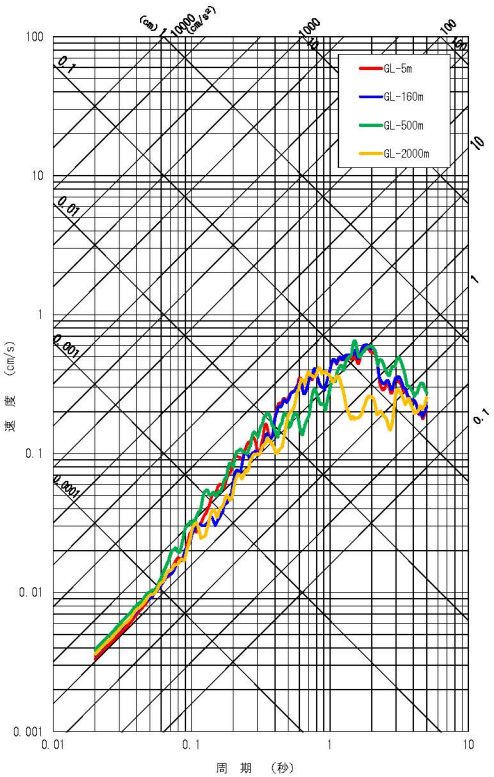
NS





EW





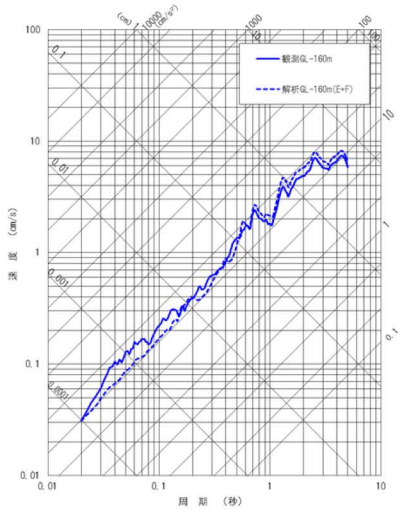
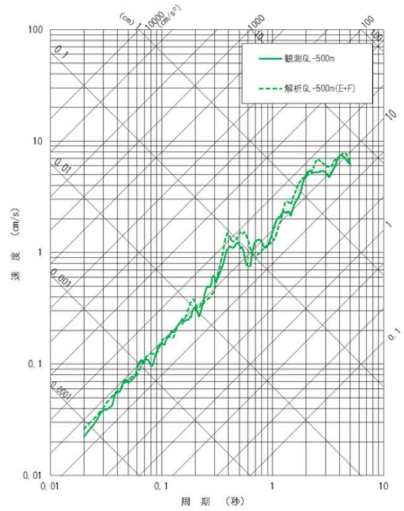
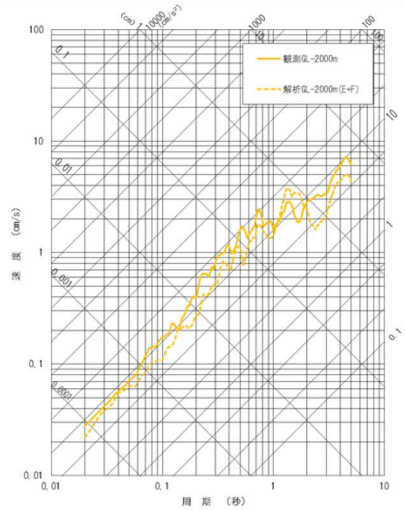
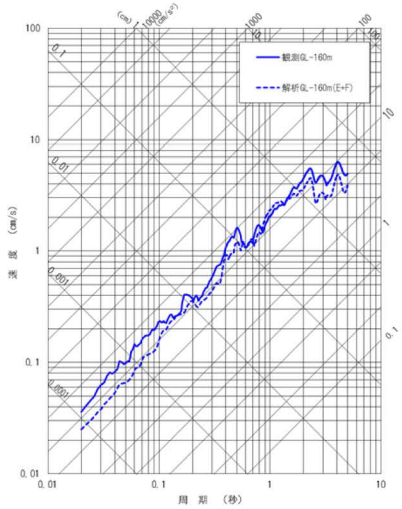
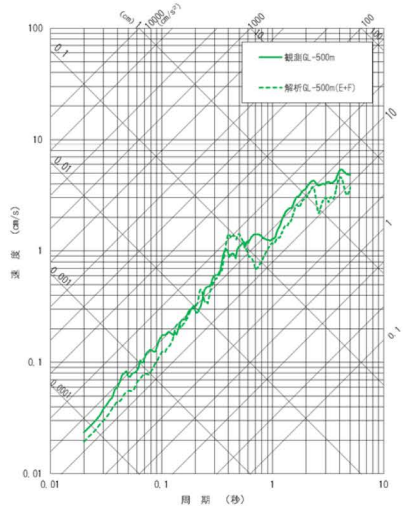
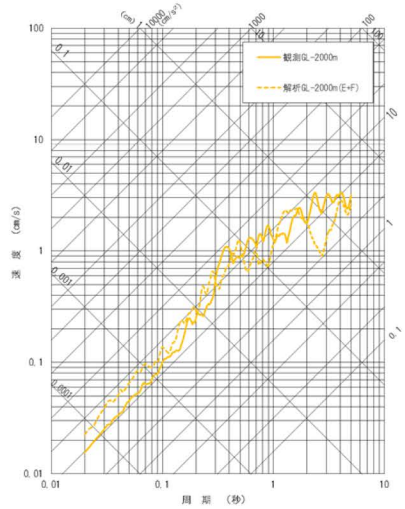
UD

伊方発電所における熊本地震の地震記録

Seismic observation record of the Kumamoto earthquake in Ikata NPP

■2016年4月16日(M7.3)の観測記録を用いた一次元応答解析

GL-5mの記録を用いて、各深度のE+F波を一次元応答解析にて求め、観測波と比較した。

	GL-160m	GL-500m	GL-2000m
NS			
EW			

（参考資料4）

Appendix 4

数値解析による増幅特性の検討に関する補足

Support documentation of site amplification characteristics by numerical analysis

2号炉心位置の伝達関数の比較

Transfer function at the reactor core

●SV波について

○鉛直入射の伝達関数はほぼ1前後を推移しており，顕著な地盤増幅は見られない。

○斜め入射の場合，入射時点で水平成分が0.643倍となるが，入力波に対する伝達関数は，伊予灘側からで概ね0.8以下，宇和海側からで概ね1以下となっており，顕著な地盤増幅は見られない。

○水平成分に対する増幅をみると，伊予灘側からの場合，概ね1程度以下であり，顕著な地盤増幅は見られない。

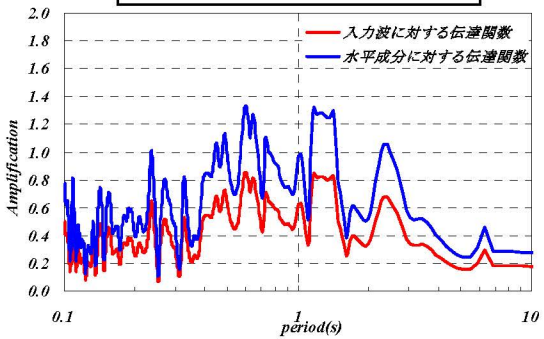
○宇和海側からについては，ばらつきがやや大きく，伊予灘側からよりもやや大きく見えるものの，平均的には1.0～1.2程度であり，顕著な増幅はない。

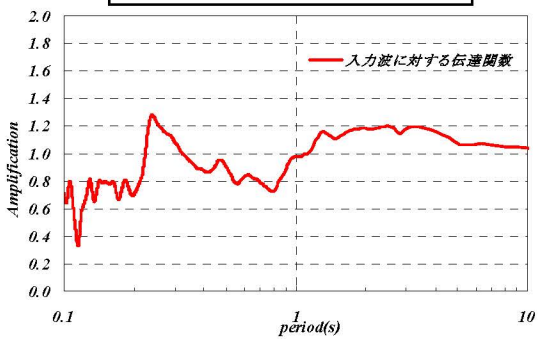
●P波について

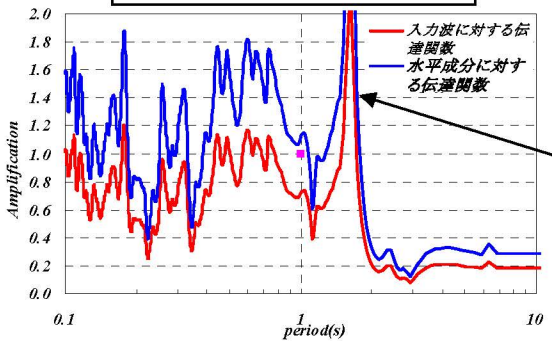
○P波による上下の伝達関数については，到来方向による差はみられない。

伊予灘側からの斜め入射　　鉛直入射　　宇和海側からの斜め入射

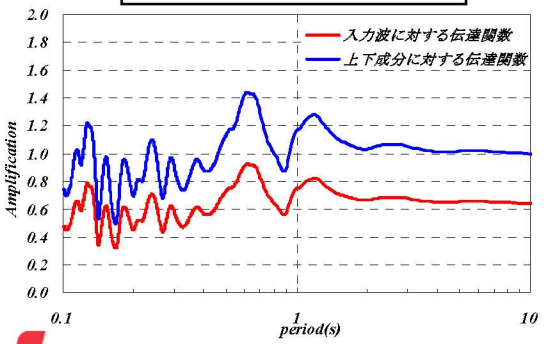
SV波による水平の伝達関数

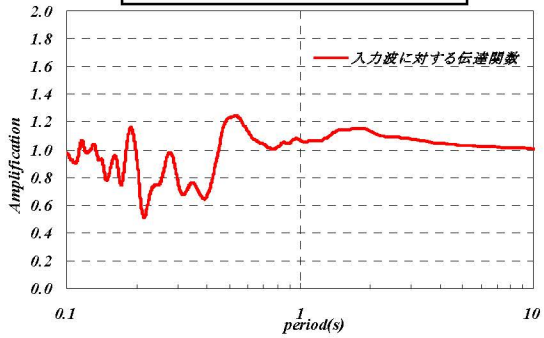


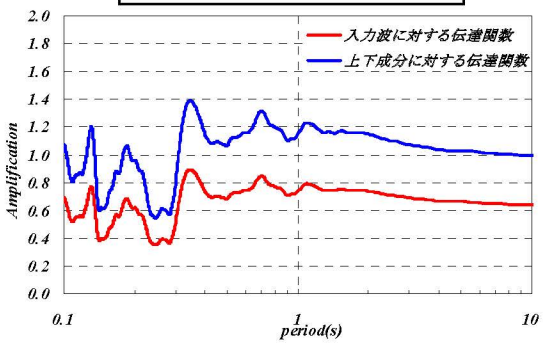




P波による上下の伝達関数







宇和海では基盤岩の凹凸が著しいことを地質調査で把握しているが，モデルとしては成層構造としたことが影響したものであり，周期2秒付近の結果の信頼性は低い。

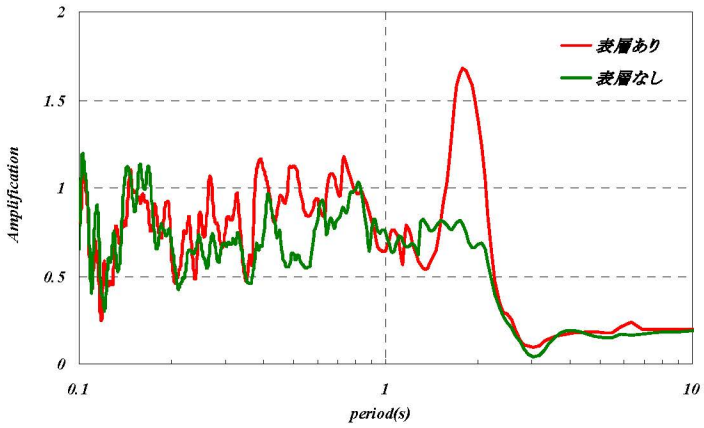
宇和海側からの斜め入射における周期2秒付近の増幅の理由

Reason of the amplification at period two seconds - Oblique incidence from UwaKai

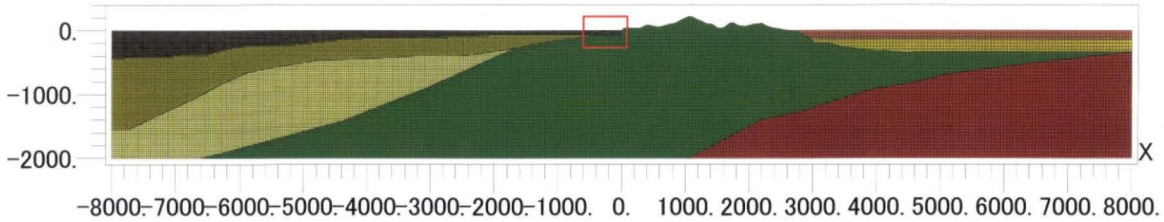
■増幅理由

SV波の斜め入射において，周期2秒付近に比較的大きな増幅が生まれたのは，宇和海側の表層地盤のモデル化に起因している。宇和海では基盤岩の凹凸が著しいことを地質調査で把握しているが，本検討における解析モデルとしては成層構造としてモデル化したことが影響したものでる。

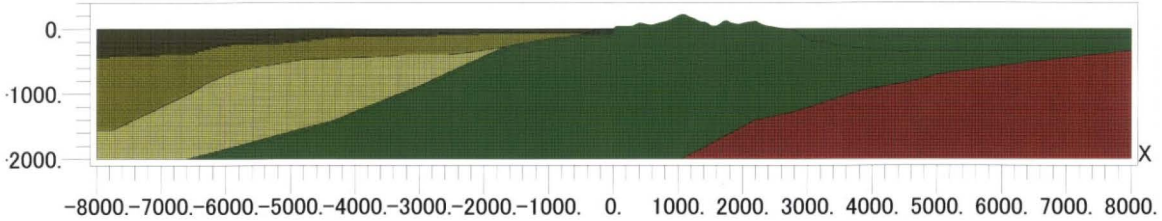
本検討で用いた深部ボーリング結果を反映した地下構造モデルではなく，従来想定していた地下構造モデルを用いた検討ではあるが，宇和海の表層の影響を検討した結果を以下に示す。宇和海の表層2層（沖積層～更新統および下部更新統～鮮新統）に下位の塩基性片岩と同じ物性値を設定し解析を行ったところ，周期2秒付近のピークが消えることを確認した。したがって，周期2秒付近の増幅は，成層構造を仮定したために周期2秒付近の波が励起されたものであり，実際にこのような増幅が生じるものではないと考えている。



伝達関数の比較



宇和海表層ありモデル

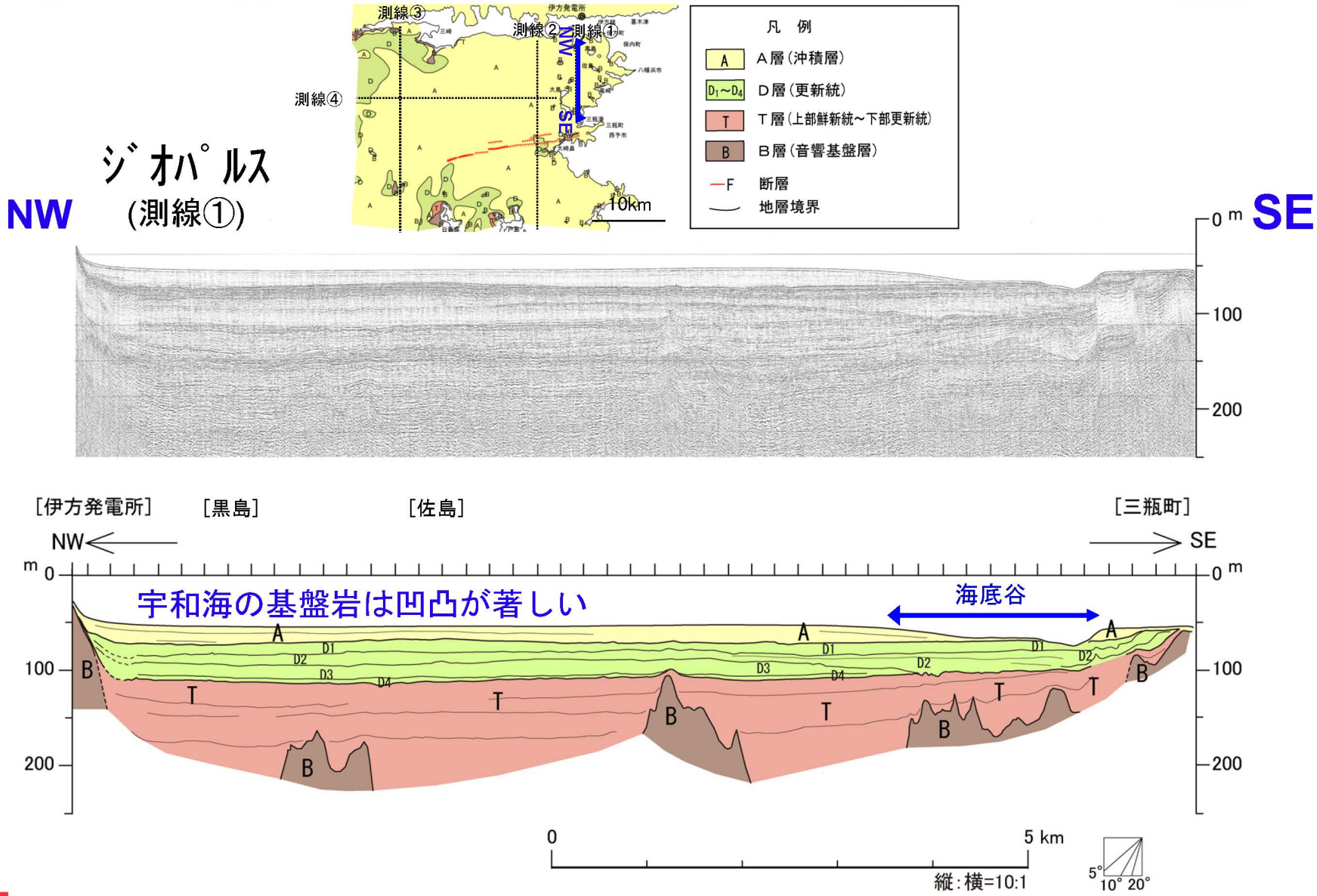


宇和海表層なしモデル

区分		岩種
1		沖積層～更新統
2		下部更新統～鮮新統
3		和泉層群
4		塩基性片岩
5		泥質片岩～泥質岩

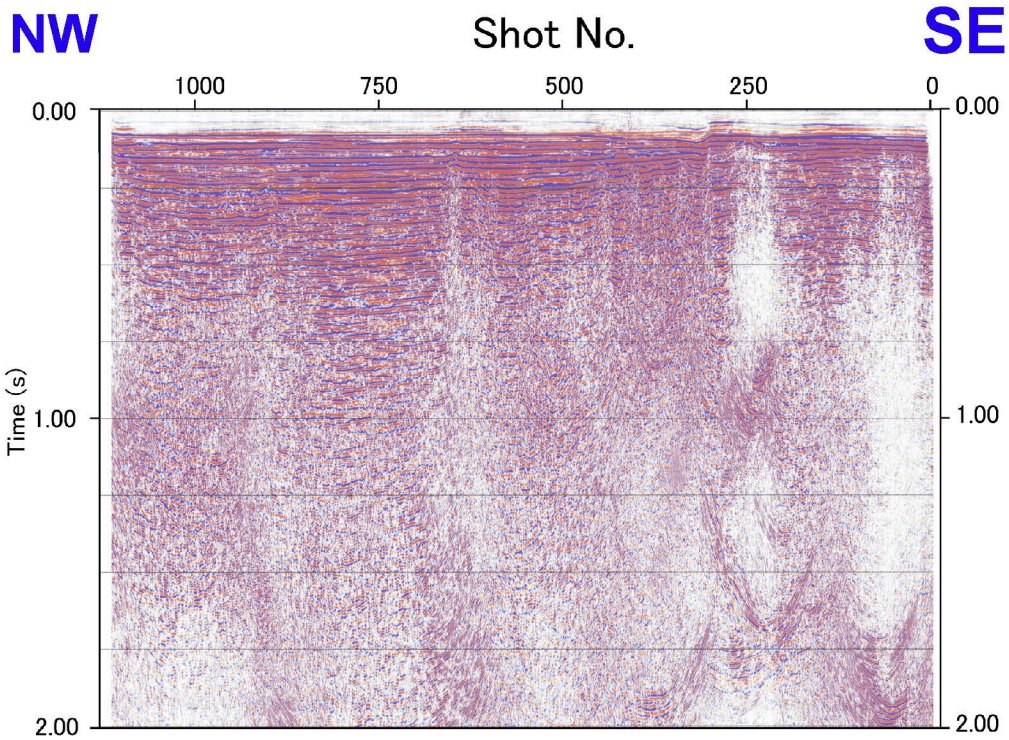
宇和海の海底地質断面図（伊方発電所南方断面）

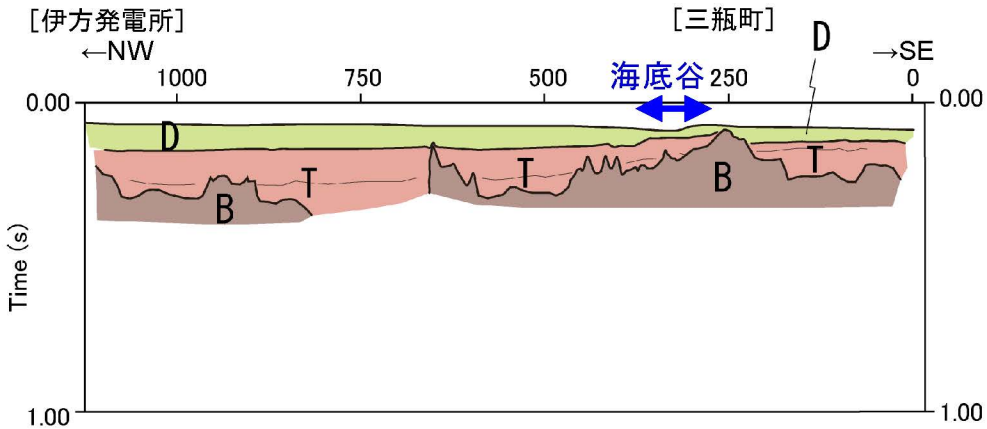
Cross-section of seabed in Uwakai (south of Ikata NPP)

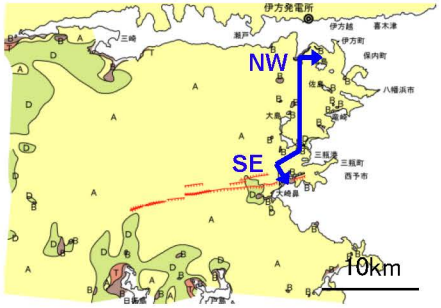


エアガンによる探査断面図（伊方発電所南方断面）

Cross-section of acoustic exploring result by airgun (south of Ikata NPP)







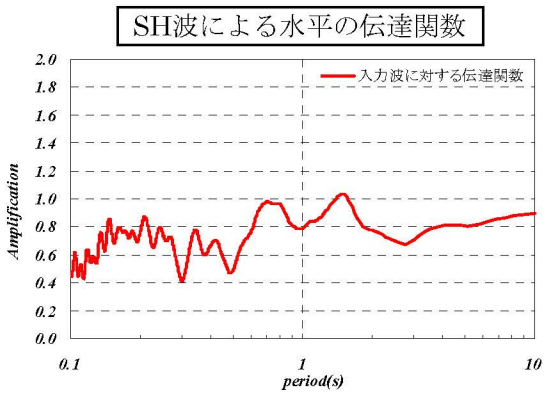
宇和海では基盤岩の深度が全般に浅く，凹凸が著しい。

SH波の伝達関数

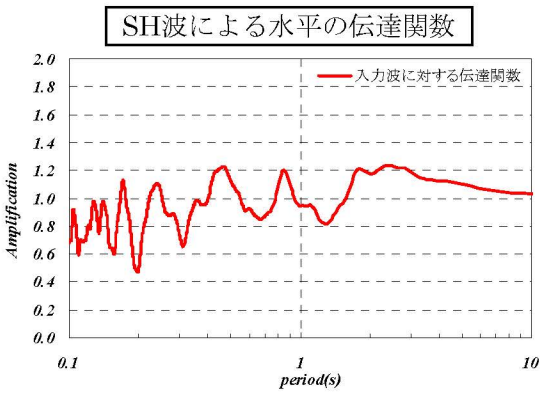
Transfer function of SH waves

SH波による2号炉心位置での伝達関数を示す。
SH波の伝達関数は，鉛直，伊予灘側，宇和海側ともに増幅率が概ね1程度以下である。
したがって，SH波については，入射角の影響はあまりないと判断する。

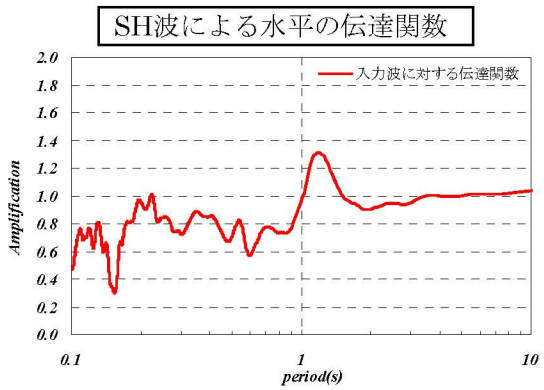
伊予灘側からの斜め入射



鉛直入射



宇和海側からの斜め入射

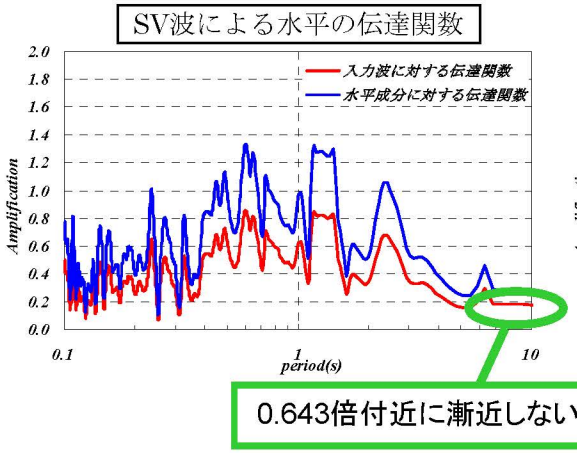


SV波の斜め入射による長周期側の伝達関数①

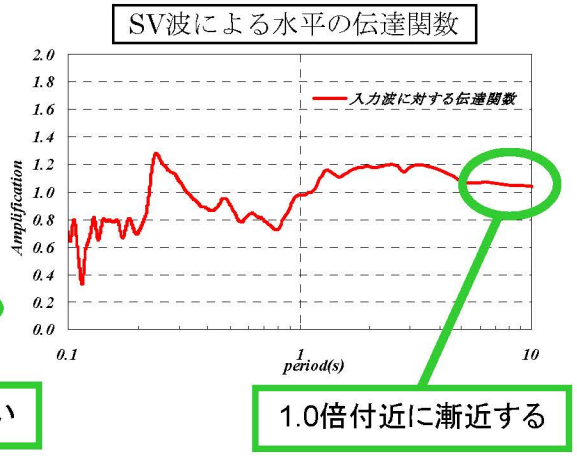
Transfer function at long period by oblique incidence of SV-waves ①

○SV波を鉛直入射した場合、伝達関数は長周期側で1.0倍に漸近する。
○SV波を斜め入射(±50°)した場合、入射時点で水平成分が0.643倍となるが、長周期側で0.643倍付近に漸近しない。

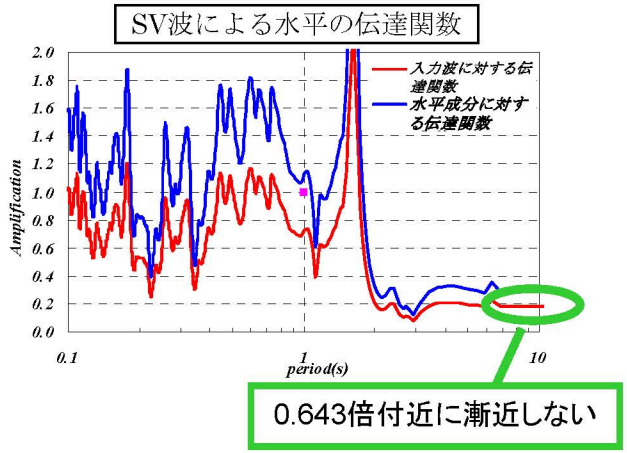
伊予灘側からの斜め入射



鉛直入射

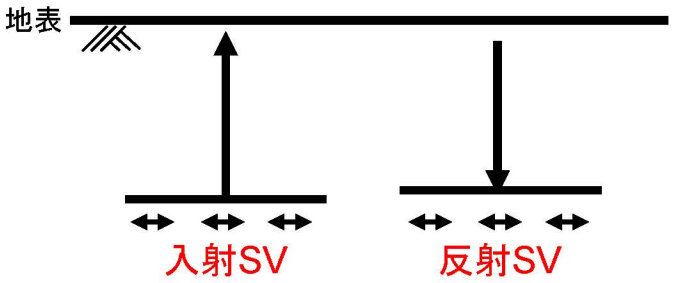


宇和海側からの斜め入射



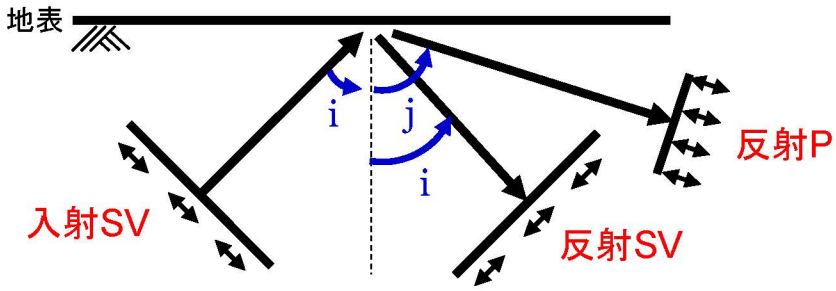
地表面におけるSV波の反射のイメージ

鉛直入射の場合



入射SV波は反射SV波として反射される

斜め入射の場合



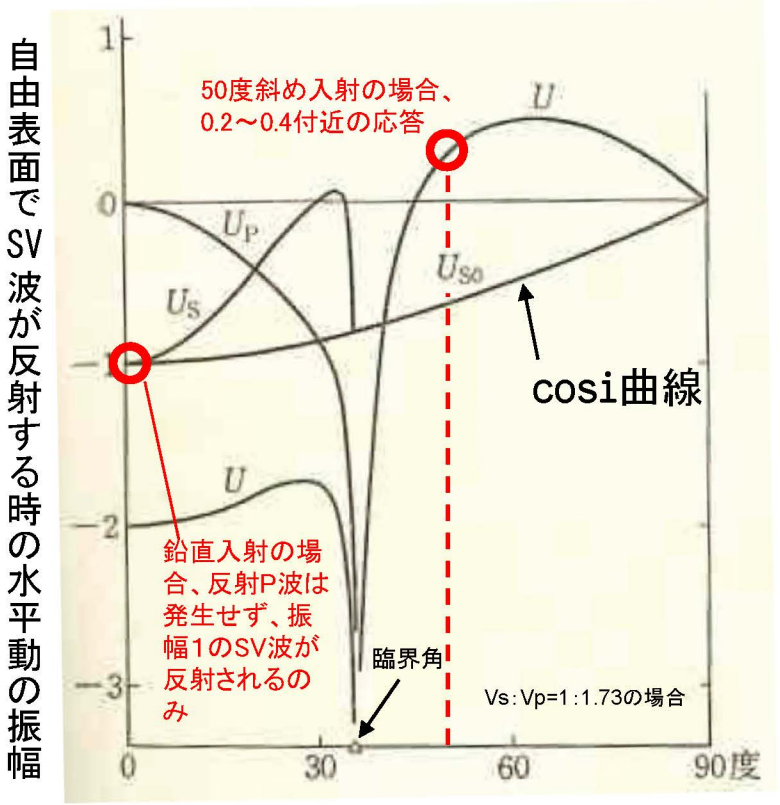
反射P波が生成される

SV波の斜め入射による長周期側の伝達関数②

Transfer function at long period by oblique incidence of SV-waves ②

○弾性波動論（佐藤泰夫）によると、自由表面（地表面）でSV波が反射する時の水平動の振幅は下図のようになる。

弾性波動論（佐藤泰夫）より



$$U = U_{S0} + U_S + U_P$$

U ：反射する時の水平振幅

U_{S0} ：入射SV波の水平振幅

U_S ：反射SV波の水平振幅

U_P ：反射P波の水平振幅

鉛直入射時

U_{S0}=cos0°　＝1であり、U_P＝0、U_S＝1なので、地表面の応答（2E）はU＝2となる。
（入力波2Eに対して1倍の応答となる）

斜め入射時（+50度）

U_{S0}=cos50°　＝0.643であり、反射波としてP波が発生するため、地表面の応答Uは0.2～0.4付近となり、倍率は1よりも小さくなる。

※ここでは単純化のため位相の概念は考えず、振幅の絶対値についてのみ考えている

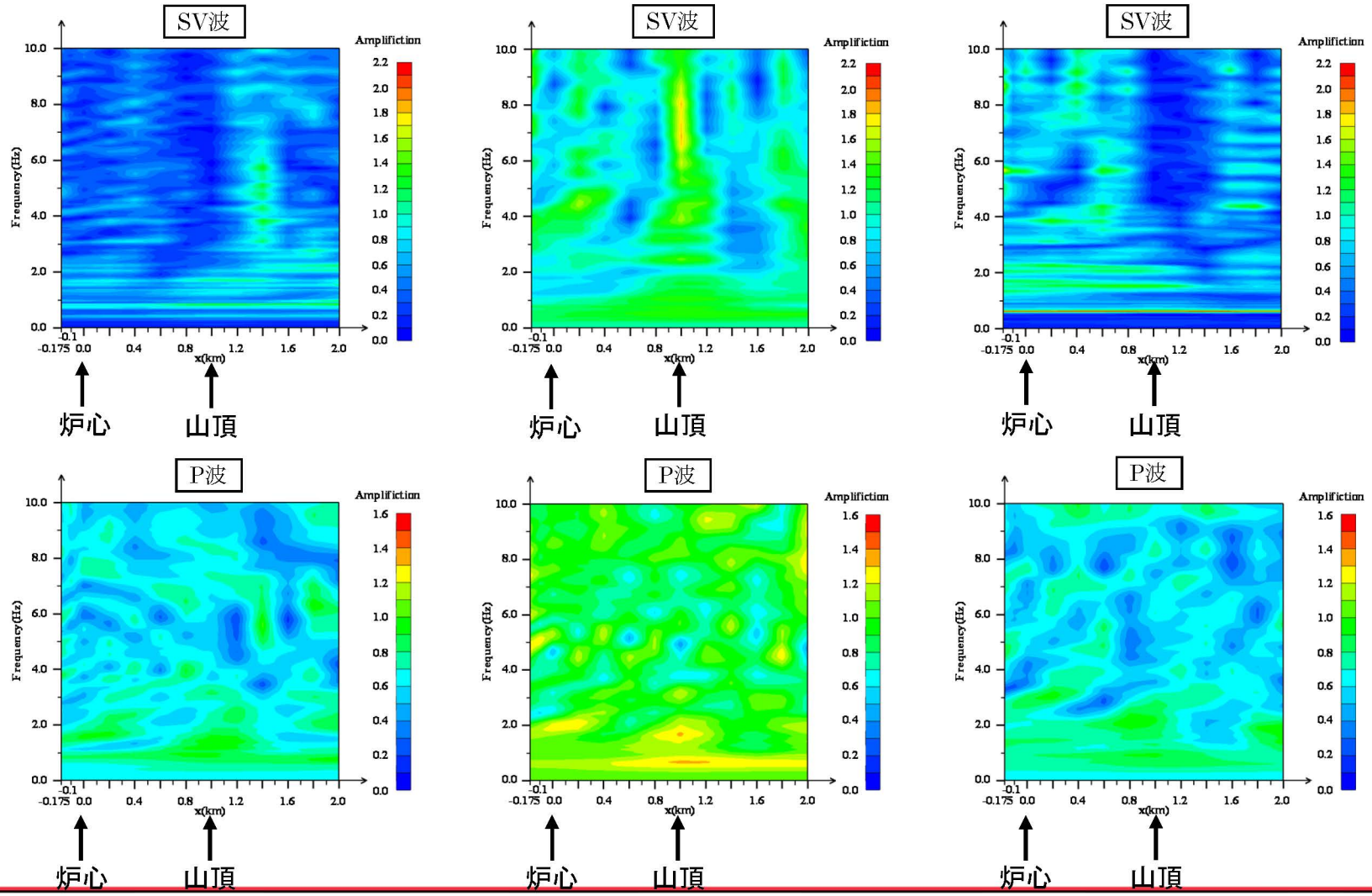
**よってSV波が斜め入射する場合には、
反射P波の発生によって伝達関数が1に漸近するとは限らない。**

伝達関数の分布の比較

Comparison of distribution of transfer function

○炉心付近に着目すれば，到来方向によって増幅特性に顕著な差異は見られない。

伊予灘側からの斜め入射　　鉛直入射　　宇和海側からの斜め入射



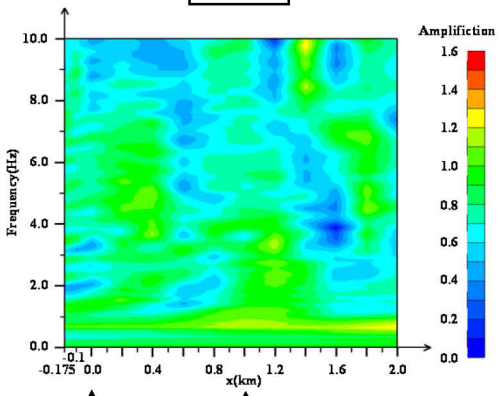
伝達関数の分布の比較

Comparison of distribution of transfer function

○炉心付近に着目すれば，到来方向によって増幅特性に顕著な差異は見られない。

伊予灘側からの斜め入射

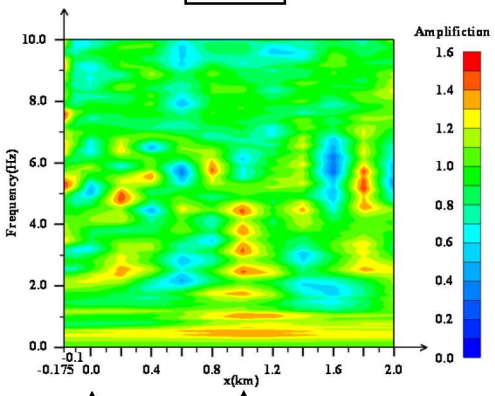
SH波



炉心　山頂

鉛直入射

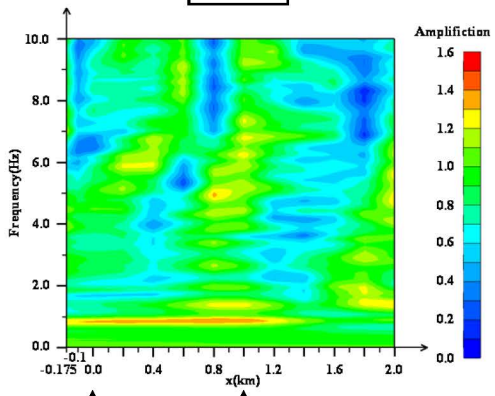
SH波



炉心　山頂

宇和海側からの斜め入射

SH波



炉心　山頂

Ricker波を用いた伝播特性の検討

Examination of radio propagation characteristics using the Ricker-waves

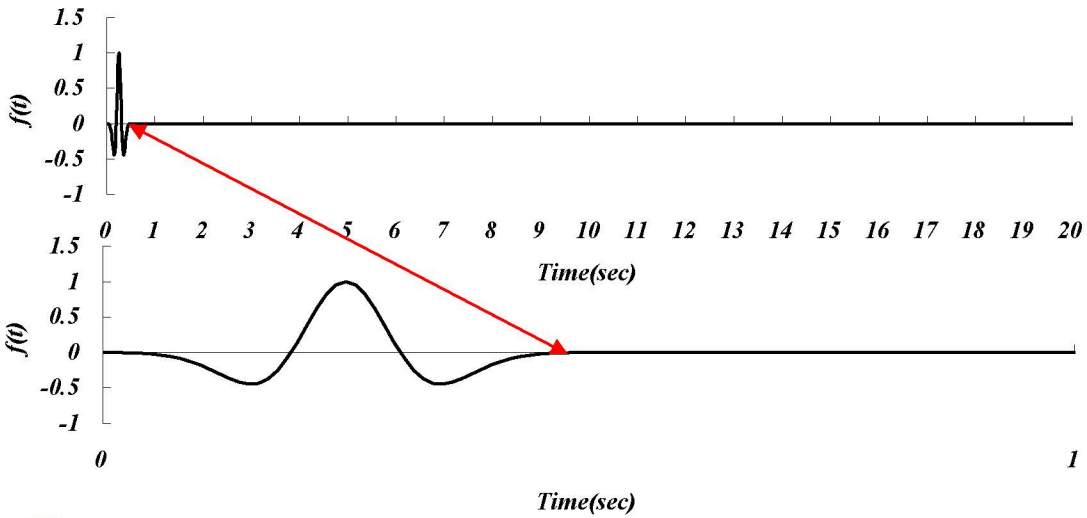
■解析条件

入力波として、最大加速度が1.0となる右式に示すRicker波（中心振動数4.0Hz、最大生起時刻0.25sec）をメッシュ下端から面内方向（SV波）に入射した場合の検討を行う。入射角は0度（鉛直入射）および±50度について検討する。

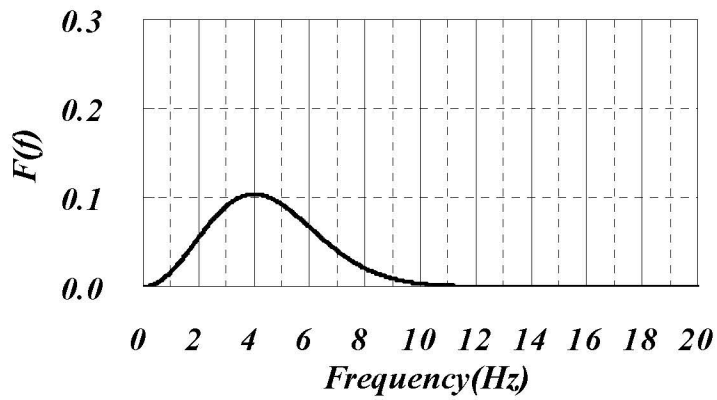
$$f(t) = (2T^2 - 1)\exp(-T^2)$$

ここで、 $T = \dfrac{\pi(t - t_m)}{t_c}$

tc：中心周期　tm：最大値生起時刻



リッカー波の時刻歴波形



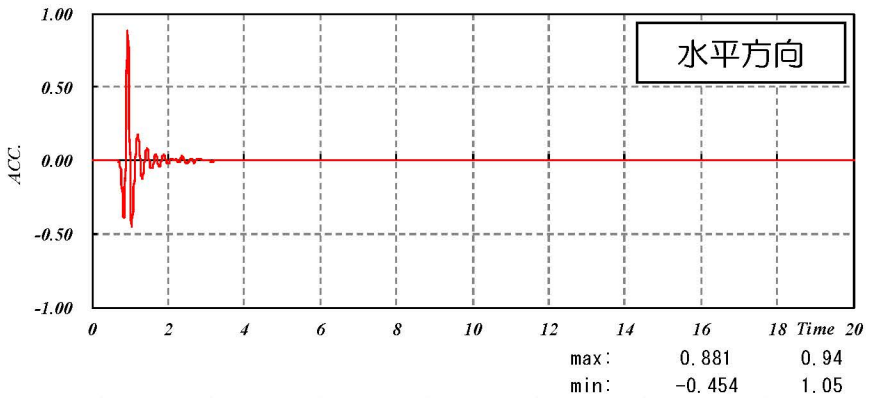
リッカー波のフーリエスペクトル

解析結果　鉛直入射

Result of response acceleration (incident direction : vertical)

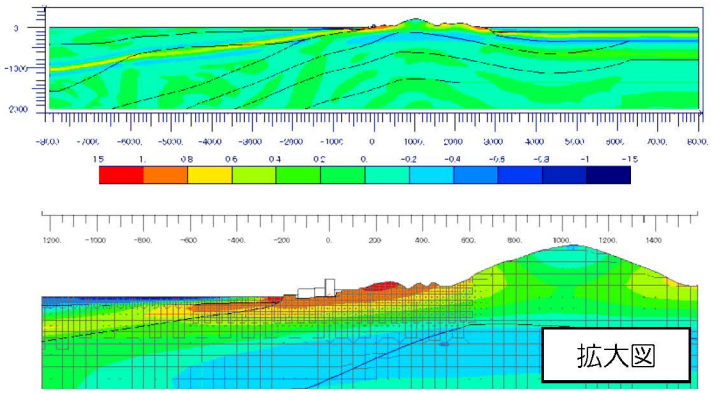
■2号炉心位置における時刻歴応答加速度（鉛直入射）

Ricker波（鉛直入射）の応答波形（2号炉心位置）と応答分布を示す。
応答波の振幅の最大値は入射波とほぼ同じであり，顕著な増幅はみられない。また応答分布でも炉心付近では一様に1程度であり、局所的な増幅は見られない。

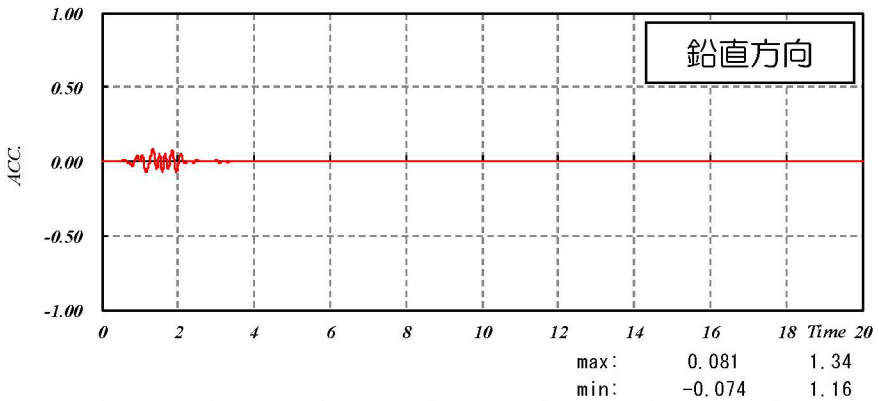


時刻歴応答加速度（水平方向）

max:1.248　min:-0.942

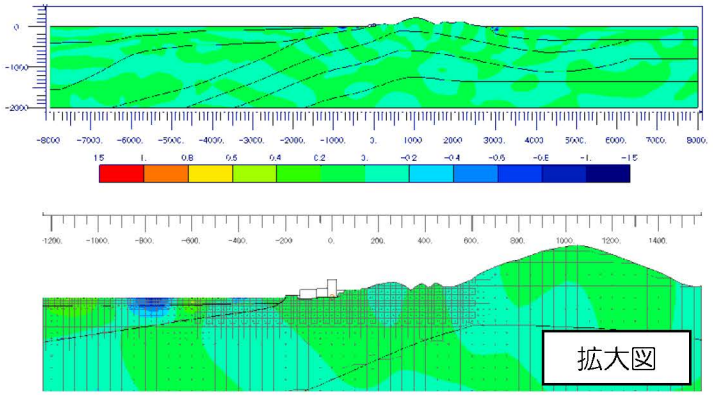


最大応答加速度発生時の加速度応答分布（水平方向）



時刻歴応答加速度（鉛直方向）

max:0.412　min:-1.046



最大応答加速度発生時の加速度応答分布（鉛直方向）

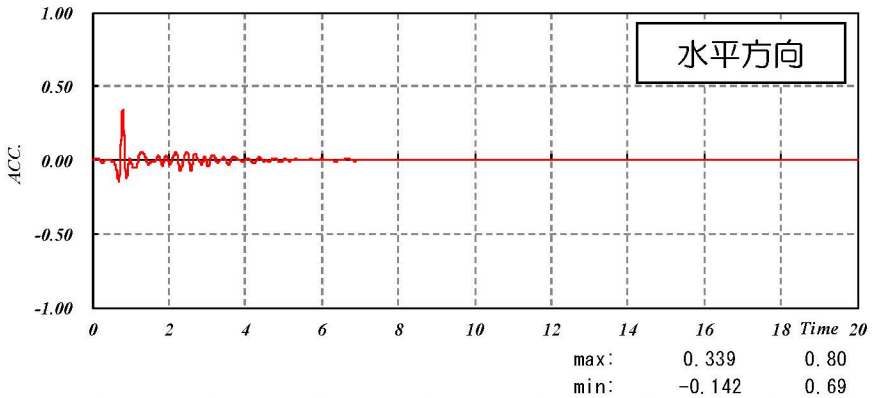
解析結果　伊予灘側からの斜め入射(＋50度)

Result of response acceleration (incident direction : oblique from north(Iyo-Nada) (+50°))

■2号炉心位置における時刻歴応答加速度(入射角+50°)

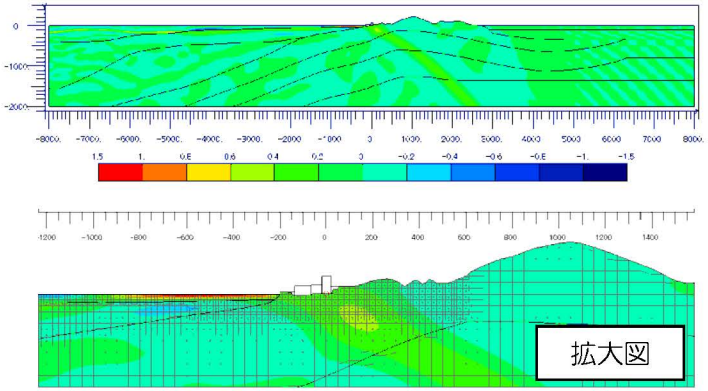
Ricker波(入射角+50°)の応答波形(2号炉心位置)と応答分布を示す。

50度入射の場合，入射波の水平成分の最大値は0.643となるが，応答波の振幅の最大値は入射波よりも小さくなっている。また応答分布でも炉心付近では一様であり、局所的な増幅は見られない。

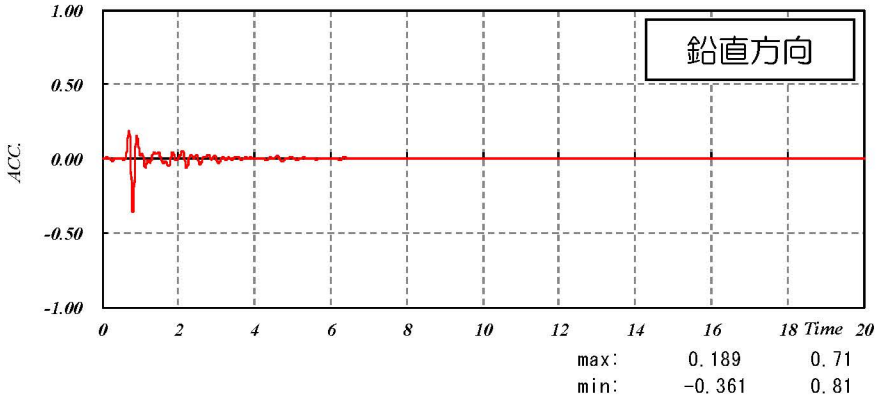


時刻歴応答加速度(水平方向)

max:1.176　min:-0.606

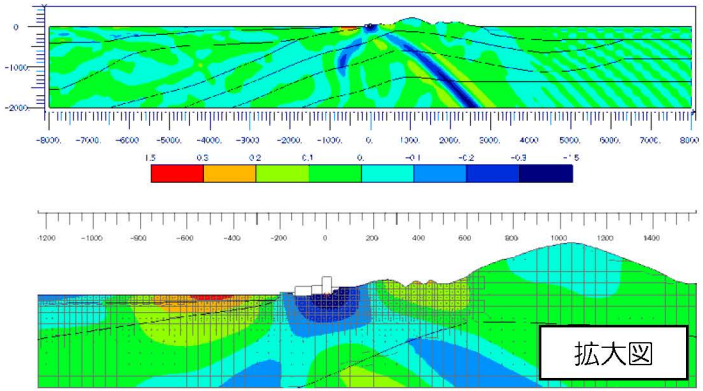


最大応答加速度発生時の加速度応答分布(水平方向)



時刻歴応答加速度(鉛直方向)

max:0.337　min:-0.367



最大応答加速度発生時の加速度応答分布(鉛直方向)

YONDEN

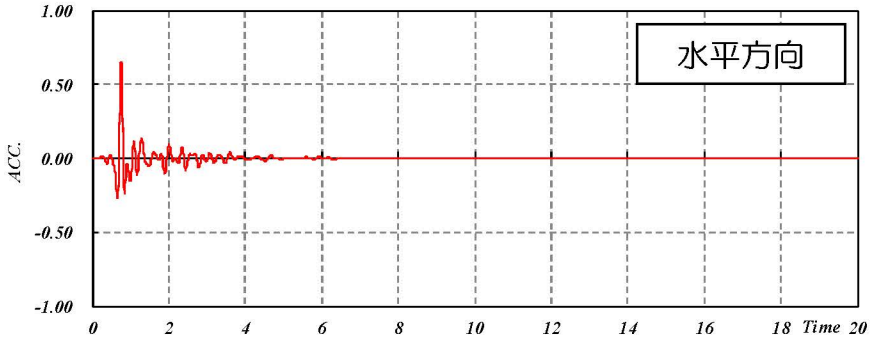
解析結果　宇和海側からの斜め入射(－50度)

Result of response acceleration (incident direction : oblique from south(Uwakai) (-50°))

■2号炉心位置における時刻歴応答加速度(入射角-50°)

Ricker波(入射角-50°)の応答波形(2号炉心位置)と応答分布を示す。

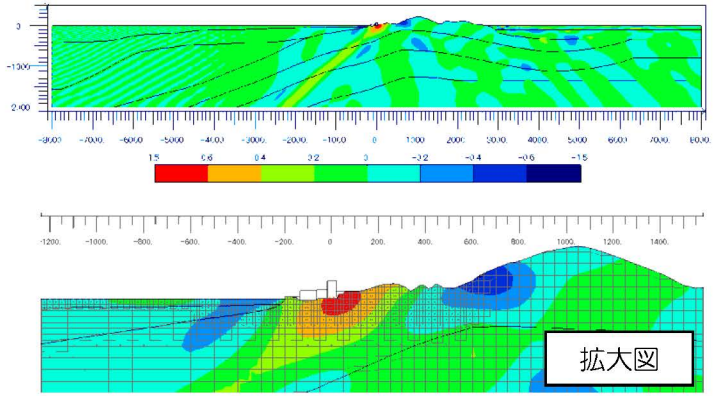
50度入射の場合，入射波の水平成分の最大値は0.643となるが，応答波の振幅の最大値は入射波と同程度であり，顕著な増幅は見られない。また応答分布でも炉心付近の最大値は0.7程度であり、顕著な増幅は見られない。



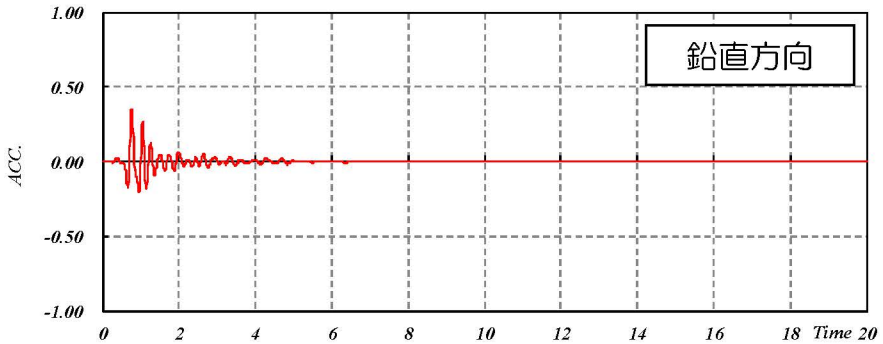
max:	0.646	0.75
min:	-0.264	0.66

時刻歴応答加速度(水平方向)

max:0.676　min:-0.735



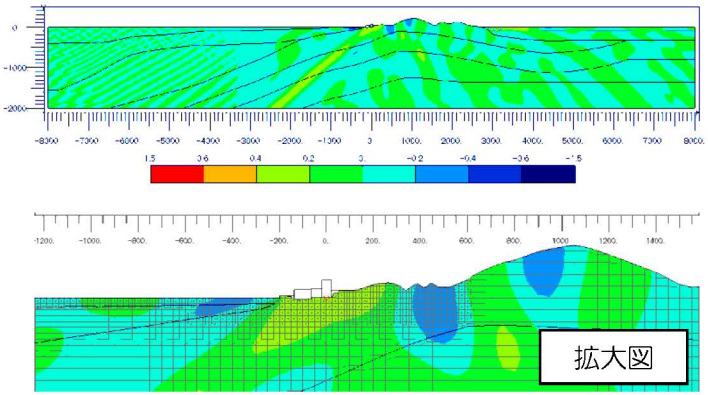
最大応答加速度発生時の加速度応答分布(水平方向)



max:	0.354	0.77
min:	-0.202	0.96

時刻歴応答加速度(鉛直方向)

max:0.650　min:-0.364



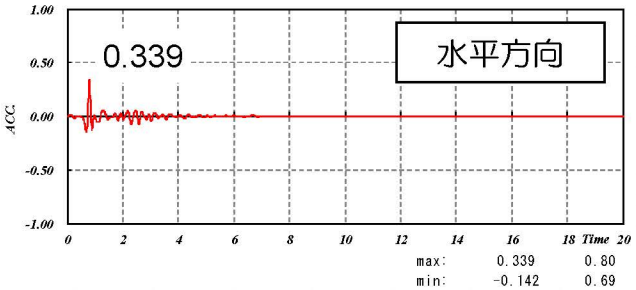
最大応答加速度発生時の加速度応答分布(鉛直方向)

Ricker波入力による2号炉心の応答加速度の比較

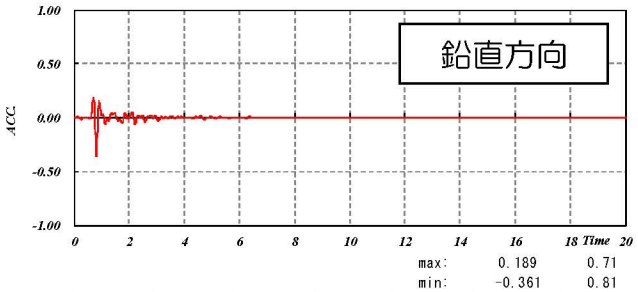
Response acceleration at the reactor core

○鉛直入射については，入力振幅1.0に対して応答値は0.881であり，増幅はない。
○宇和海側からの入射は入力水平振幅0.643に対して0.646であり，増幅はない。
○伊予灘側からの入射では，0.339とやや小さくなっている。

伊予灘側からの斜め入射

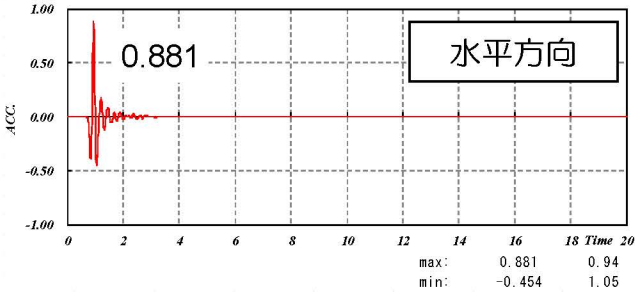


時刻歴応答加速度（水平方向）

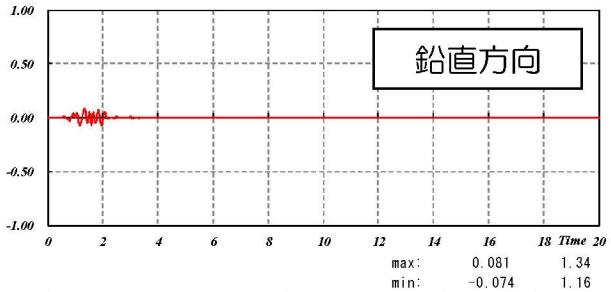


時刻歴応答加速度（鉛直方向）

鉛直入射

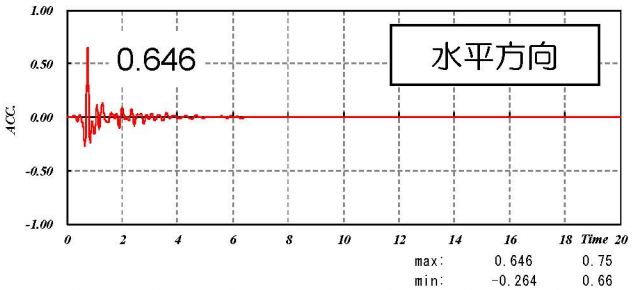


時刻歴応答加速度（水平方向）

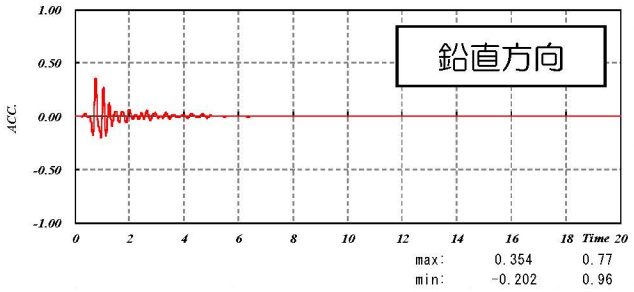


時刻歴応答加速度（鉛直方向）

宇和海側からの斜め入射



時刻歴応答加速度（水平方向）



時刻歴応答加速度（鉛直方向）

Ricker波入力による応答加速度分布の比較

Distribution of response acceleration

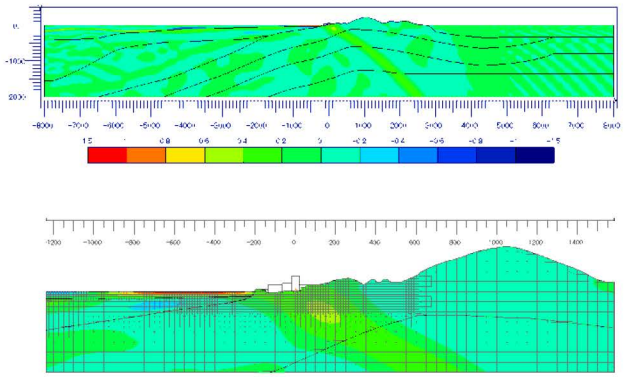
○2号炉心において水平方向の最大応答加速度が発生した時刻における水平最大応答加速度分布を下に示す。

○伊予灘側からと宇和海側からを比較すると，宇和海側からの方が最大加速度が大きいように見えるが，炉心の最大値は0.646，領域の最大値も0.676であり，水平入力値0.643に対して増幅をしたものではない。

○逆に，伊予灘側からの入射の場合，最大加速度が小さくなる傾向を示している。

○鉛直入射については，2号炉心で0.881，炉心周辺の概ね1程度であり，増幅はない。

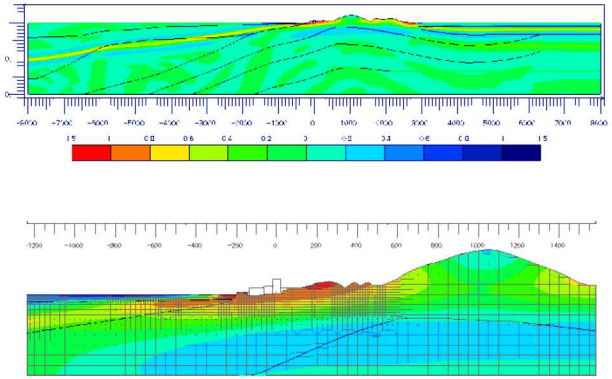
伊予灘側からの斜め入射



拡大図

2号炉心の最大加速度：0.339
領域のmax:1.176　min:-0.606

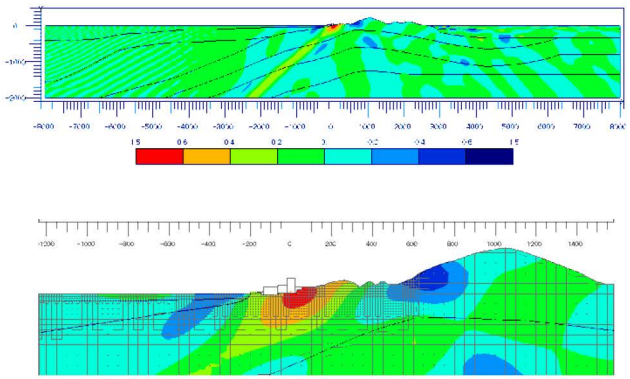
鉛直入射



拡大図

2号炉心の最大加速度：0.881
領域のmax:1.248　min:-0.942

宇和海側からの斜め入射



拡大図

2号炉心の最大加速度：0.646
領域のmax:0.676　min:-0.735

最大応答加速度発生時の応答加速度分布（水平方向）

以上の2次元FEM解析の結果，到来方向によって顕著な増幅はないと考えられる。

Ricker波の周波数について
Frequency of Ricker-waves

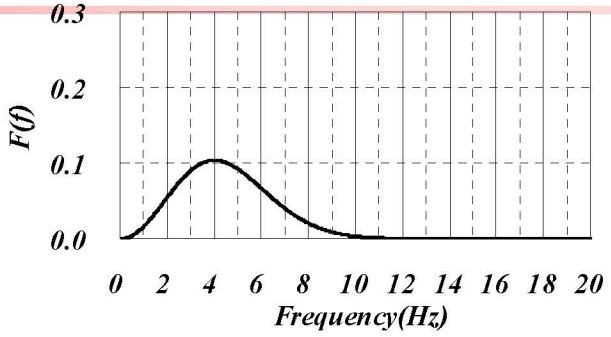
■検討にリッカー波を用いた理由

そもそも，リッカー波は，

・振幅が特定の周波数帯に比較的均一に分布している。

・波が単純な形状のため、波形の比較に適している。

ことから検討に用いている。



リッカー波のフーリエスペクトル

■リッカー波の中心振動数と周波数

今回の検討に用いたリッカー波の中心振動数は4.0Hzであり，リッカー波の周波数は概ね0～10Hzの範囲で分布している。リッカー波の中心振動数を4Hzとした理由は，0～10Hzまでの振動数を綺麗に含んでいるため，影響を見るのに適しているためである。

■リッカー波の周波数の上限を10Hzとした理由

今回の2次元モデルは非常に大きな領域をモデル化しているが，解析上は現実的な解析時間で収める必要があるため解析メッシュサイズに上限を設け，建屋の主要振動領域である0.1秒～0.8秒をカバーするよう，10Hzの精度を有するメッシュサイズとし，リッカー波の上限もこれにあわせて10Hzとしたものである。

■異なる周波数のリッカー波での検討

リッカー波の中心振動数を変えた場合の影響は，伝達関数の分布図から簡便に予測できると考えている。2号炉心付近の伝達関数に着目すると，今回の検討で用いた4Hzとそれ以外の周波数とで，伝達関数に大きな差はない。したがって中心振動数を変えたリッカー波で検討を行っても，増幅特性が顕著に異なることはないと予想される。