

伊方発電所の基準地震動の問題点 ー南傾斜の問題を中心としてー

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
港湾空港技術研究所 野津 厚

謝辞：東北工業大学のSmall-Titan, 防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの記録を利用しています。心より御礼申し上げます。

自己紹介

私は土木工学の立場から、強震動予測に係る研究と実務に20年ほど携わってきている者です（経歴については次頁参照）。土木構造物であれ建築物であれ、耐震設計を行うときに、どのような揺れを想定するかは根本的に重要な課題です。このようなことから、土木工学、建築学、地震学の各分野出身の研究者が強震動予測に係る研究に従事しています。そもそもこの分野に携わるきっかけとなったのは1995年兵庫県南部地震です。この地震による土木構造物の大被害をもたらしたのは、アスペリティの破壊に起因する周期1-2秒のパルス状の地震動でした。当時京都大学防災研究所におられた入倉孝次郎先生のグループが、断層面上に複数のアスペリティを置いた震源モデルにより、このパルス波を精度良く再現できることを示されました。事後の解析とは言え、実際に起きた現象を見事に説明できる強震動地震学という分野に大きな未来を感じ、この学問を土木工学の中でも活用すれば、土木構造物の安全に寄与できるのでは無いかと考えたのが、この分野に入ったきっかけです。以来、強震動研究の分野で一定数の論文を執筆してきました。実務では港湾構造物の耐震設計基準の策定等に関わってきました。

強震動研究の成果を社会に活用していくにあたり、私が心がけていることは、その限界にもきちんと目を向けていくということです。強震動研究は、実際に起こった地震に関する事後の分析という点では大きく発展してきましたが、今後起こりうる事象の予測という点においては、まだまだ発展途上の段階にあり、強震動研究の成果によって原子力発電所の安全性が保証できるほどこの分野の研究が成熟しているとは考えていません。今日はこのような立場から率直にお話ししたいと思います。

自己紹介

なお、本日の証言を行うにあたり、一点、裁判所に御理解いただきたいことがあります。それは、私は電力会社との間に利益相反がない数少ない強震動研究者であるという点です。利益相反として、例えば、特定の薬品会社と金銭的に関係のある研究者は、その薬品会社の製品に都合の良い結論を導く場合が多いといったようなことが挙げられます。このようなことから、海外の論文集では、論文を執筆する際、利益相反について自己申告することが義務づけられるようになってきています。

日本の強震動研究者の多くは、電力会社や、電力会社と契約関係にあるゼネコンやコンサルタント会社に席を置いている方が多いのが実情です。これらの方々は、原子力発電所にとって不利となるような意見の表明は控えてしまう傾向があることは間違いないところです。また、大学に席を置く研究者の中にも、電力会社は学生さんの有力な就職先の一つであることから、やはり原子力発電所にとって不利となるような意見の表明は控えてしまう方は多いのではないかと考えられます。それに対して、私自身は、電力会社との間にいかなる利益相反も無いため、自分が信じることであれば、原子力発電所にとって不利となるようなことでも、逆に有利となるようなことでも、率直に発言することができます。そのような者の発言としてお聞きいただければと思います。

経歴

生年月日 昭和43年1月6日

学歴

平成3年3月 京都大学工学部土木工学科卒業

平成5年3月 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了

平成16年9月 博士（工学）東京工業大学

職歴

平成5年4月 運輸省港湾技術研究所 構造部地震防災研究室 研究官

平成11年4月 運輸省港湾技術研究所 構造部主任研究官

平成13年4月 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官

平成22年4月 独立行政法人港湾空港技術研究所 地震動研究チーム チームリーダー

平成26年4月 独立行政法人港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 領域長

平成27年4月 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 領域長

平成28年4月 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 領域長

主な研究業績

1. 港湾地域強震観測の運営

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所が国土交通省の各地方整備局等と連携して実施している港湾地域強震観測の運営において、2001年以降18年以上にわたり主要な役割を果たしている。観測の成果は広く一般に公開されている。

(<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>)

2. 港湾・空港を含む全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価

港湾・空港を含む全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価を行い、その成果を広く公表 (https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/siteamplification_jpn.html) している。この結果は港湾・空港構造物の設計入力地震動の策定に活用されている。

3. 断層モデルを用いた強震動シミュレーション手法の開発と普及

断層モデルを用いた強震動シミュレーション手法の開発と普及に努めており、その成果を学術誌などで公表している。この成果は港湾・空港構造物の設計入力地震動の策定に活用されている。

4. 技術基準策定への参画

『港湾の施設の技術上の基準・同解説』『海岸保全施設の技術上の基準・同解説』の改訂にあたり分担執筆者として参画している。

5. 学会活動

最近では日本建築学会刊行『地盤震動研究とその応用』の「6.2 半経験的手法」を執筆し、この中で、伊方発電所の基準地震動策定にも用いられている経験的グリーン関数法等について解説している。

1. 内陸地殻内地震に関する地震動評価の問題点
2. 南傾斜の断層を考慮していないことの問題点
3. プレート間地震に関する地震動評価の問題点

1. 内陸地殻内地震に関する地震動評価の問題点
2. 南傾斜の断層を考慮していないことの問題点
3. プレート間地震に関する地震動評価の問題点

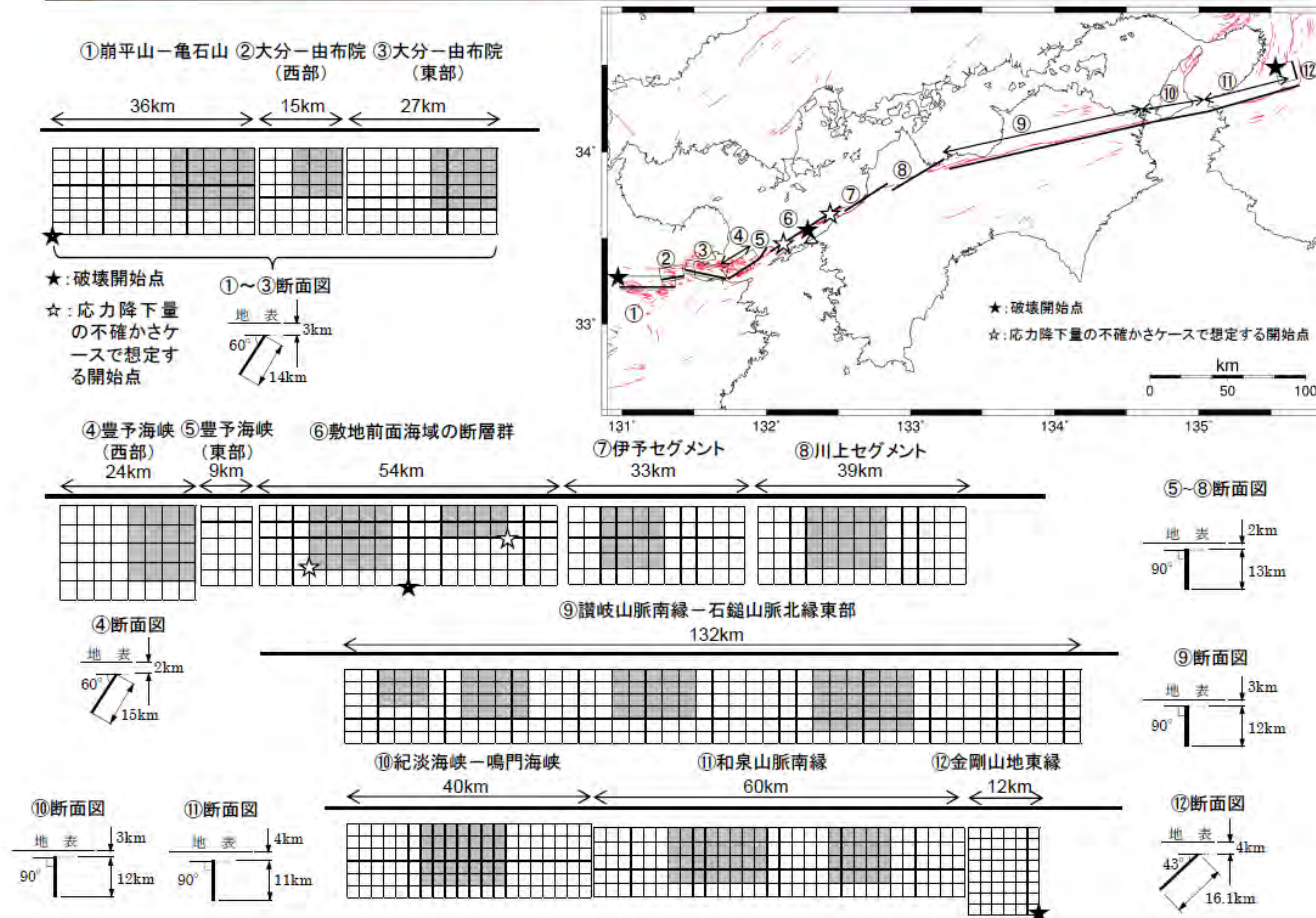
内陸地殻内地震の地震動評価に関して、南傾斜の断層を考慮していないことについては2. で論じることとし、ここでは以下の3点を論じる

- ①震源断層面上での短周期地震動の生成に偏りがある場合が取り上げられていない点について
- ②敷地正面に応力降下量の高いアスペリティを置いていないことについて
- ③アスペリティの応力降下量として20MPaまでしか考えないという現状の方法では、応力降下量の大きな不確実性に全く対応できていないことについて

①震源断層面上での短周期地震動の生成に偏りがある場合が取り上げられていない点について

○特に480km等の長大な断層のケースにおいて、短周期地震動が西から東までほぼ均等に生成されるケースしか取り上げられていない。

3.1.4 断層モデルとパラメータ
基本、不確かさ考慮①(応力降下量)、不確かさ考慮④(破壊伝播速度) by 壇の手法



四国電力株式会社(2014)より

○内陸地殻内地震に対する地震動評価では、壇ほか(2011)の方法またはFujii and Matsu'ura(2000)の方法で、断層面全体としての短周期レベル(断層面から放射される短周期地震動の総量とお考えください)が設定されます。

○いま仮に、壇ほか(2011)の方法またはFujii and Matsu'ura(2000)の方法で断層面全体としての適切な短周期レベルが設定できているとしましょう(実際にはそれさえ確かではないのですが、仮にできているとします)。

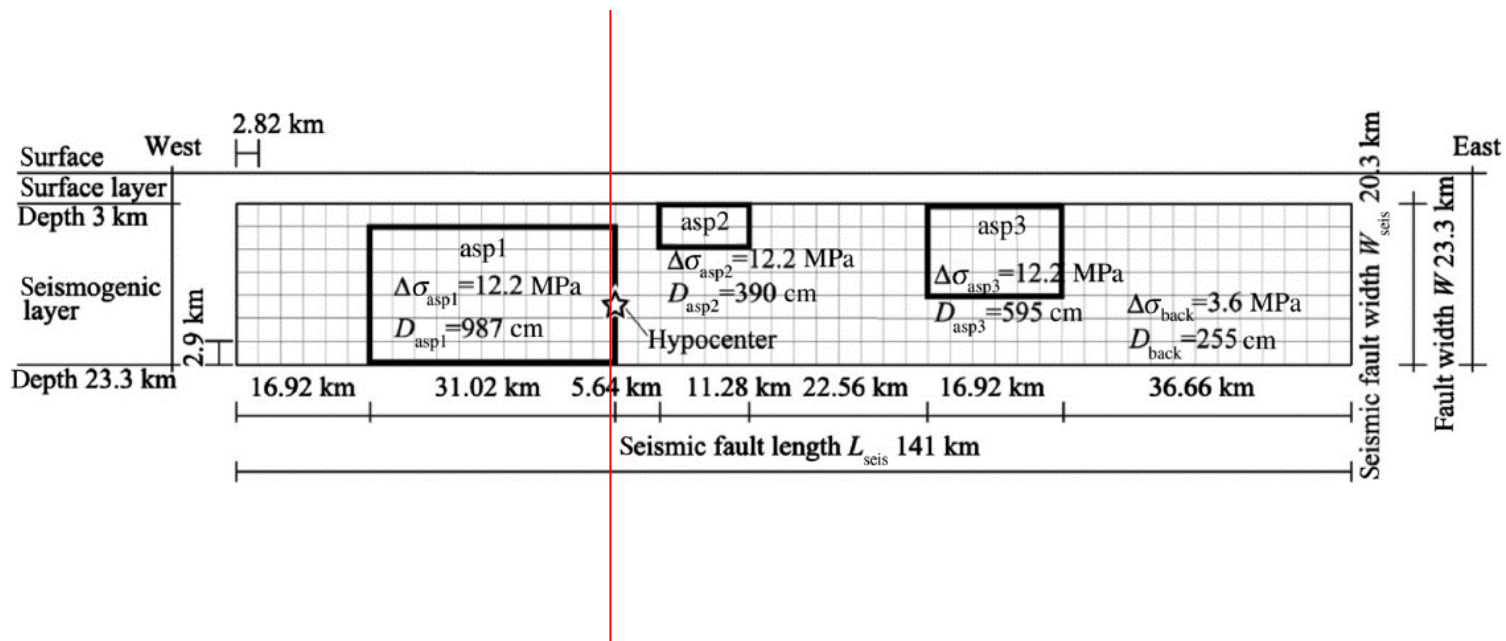
○しかし、その短周期レベルを分担するアスペリティが断層面の西から東までどのように分布しているかについては、西側に偏っているケース、概ね均一なケース、東側に偏っているケースなど、実際には様々なケースがあり得ます。

○ところが、四国電力は、壇ほか(2011)の方法を用いたケースにおいても、Fujii and Matsu'ura(2000)の方法を用いたケースにおいても、近畿地方から四国を通して九州に至るまで480kmに及ぶ中央構造線沿いの断層について、概ね均一にアスペリティを配置したケースしか取り上げていません。ここに、基準地震動を小さく抑えるための一つのトリックがあります。

○実際の震源断層ではむしろほとんどの場合、なんらかの片寄りがあります。従って、均一なケースだけを考えるということは、非常に特異な条件だけを考えていることになります。

○以下、内陸地殻内地震の例をお示します。

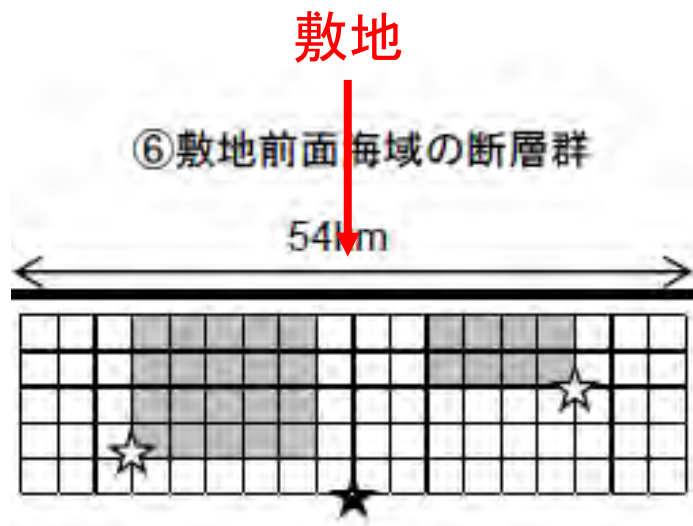
○1999年トルコKocaeli地震の震源モデル(Danほか, 2019). 図の右が東.
 図の左方にある観測点での記録を再現するために, 破壊開始点(☆)より左側の1/3ほどの部分に短周期側のエネルギーの約67%を放射するアスペリティを割り当てる必要があった. 短周期レベルで言えば, 全断層の短周期レベルに約0.8を乗じた値を破壊開始点(☆)より左側の1/3ほどの部分に割り当てたことになる. アスペリティを断層面上に均等に配分する方法では観測地震動の再現に成功していない.



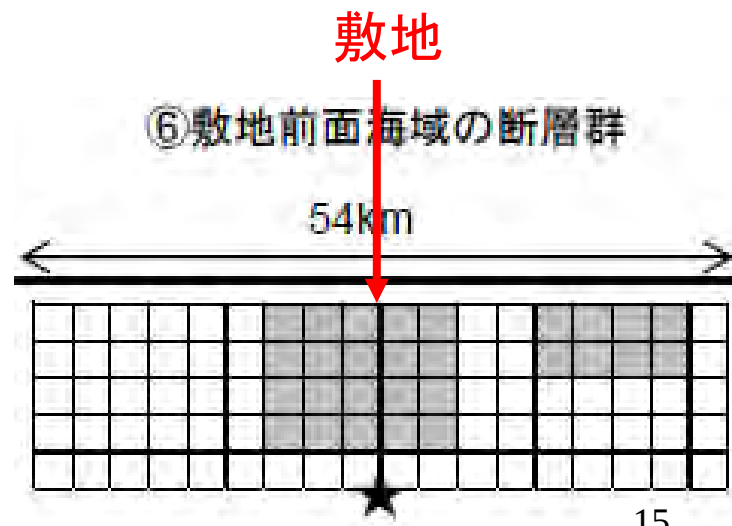
②敷地正面に応力降下量の高いアスペリティを置いていないことについて

★四国電力は、伊方発電所の敷地正面にはジョグという断層破壊の末端（活動セグメントの境界）を示唆する地質構造が存在するとの考えに基づき、敷地正面ではすべり量が小さいと主張し、そのことを理由に、基本ケースでは、敷地正面にアスペリティを置くことを避けています。それにより、敷地正面に応力降下量の高いアスペリティを置くことを巧妙に避けています。

基本ケースにおけるアスペリティ
応力降下量20MPaのケースも考慮



敷地正面のアスペリティ
応力降下量は12.2MPaまで



★四国電力ではジョグの両側ですべりが大きくジョグではすべりが小さいと考えています。しかし、こうした現象が毎回繰り返し生じると考えると矛盾が生じます。すなわち、地震の繰り返しとともに、中央構造線断層帯の南側の地塊は次第に西に動いていき、北側の地塊は次第に東に動いていくはずなので、ジョグの部分で毎回すべりが小さいと仮定すると、ジョグの部分で次第に応力が蓄積していき、最終的にはジョグの部分でも破壊が生じるはずです。その場合の破壊は大きな応力降下を伴うはずであり、むしろジョグの部分にこそアスペリティを想定して強震動評価を行うべきです。

★地震学における著名な教科書である”Modern Global Seismology”(p.423)では

”The only thing that is certain is that, averaged over long periods of time, the entire faults must slip equal amounts”

と述べられています。これを訳せば

「一つだけ確かなことは、長期間の平均をとれば、断層面全体が同じだけすべるということである」

となります。このように、敷地正面だけ地震の度にすべりが小さいということはありません。

★四国電力では、ジョグは衝撃に対して強く、破壊を終息させるバリアと対応していると考えているようです（四国電力，2013）。しかしながら，Lay, Kanamori and Ruff (1982)は

”...in the barrier model the rupture initiates in the weaker zone and propagates into an area of high breaking stress which may or may not remain unbroken. Clearly, if a barrier ruptures, it is behaving very much like an asperity...”

と述べています。これを訳せば

「バリア・モデルでは、破壊は弱い部分から始まり、破壊強度の高い部分（訳者注：バリア）に伝播する。その際、破壊強度の高い部分は、破壊するかも知れないし、破壊しないかも知れない。明らかに、もしバリアが破壊すれば、それはアスペリティのように振る舞う」

となります。

★地震学における著名な教科書である”Modern Global Seismology”(p.422)では

”A strength barrier that terminates rupture from an earthquake on one segment of the fault may serve as an asperity for a future earthquake”

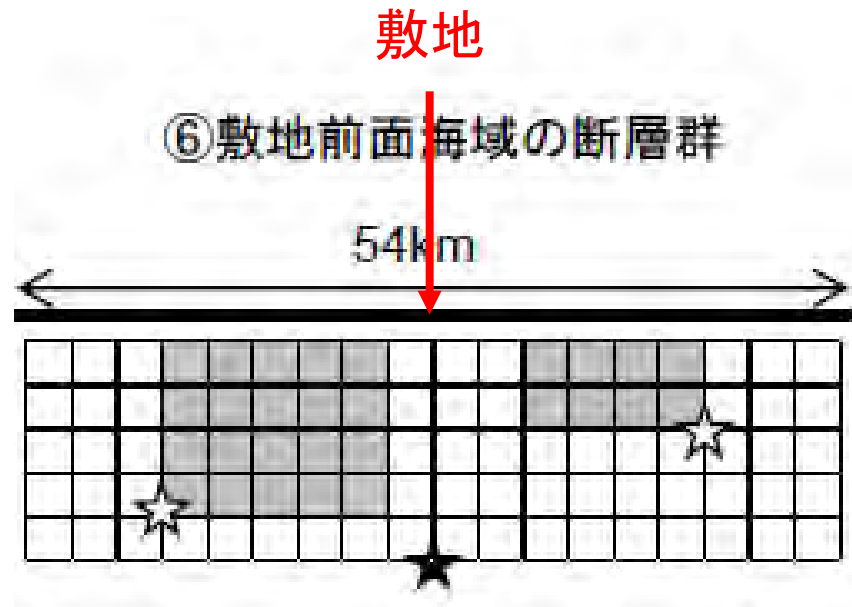
と述べられています。これを訳せば

「断層の一つのセグメントで起こる地震の破壊を停止させる強度の高いバリアは、将来の地震においてアスぺリティとなる可能性がある」

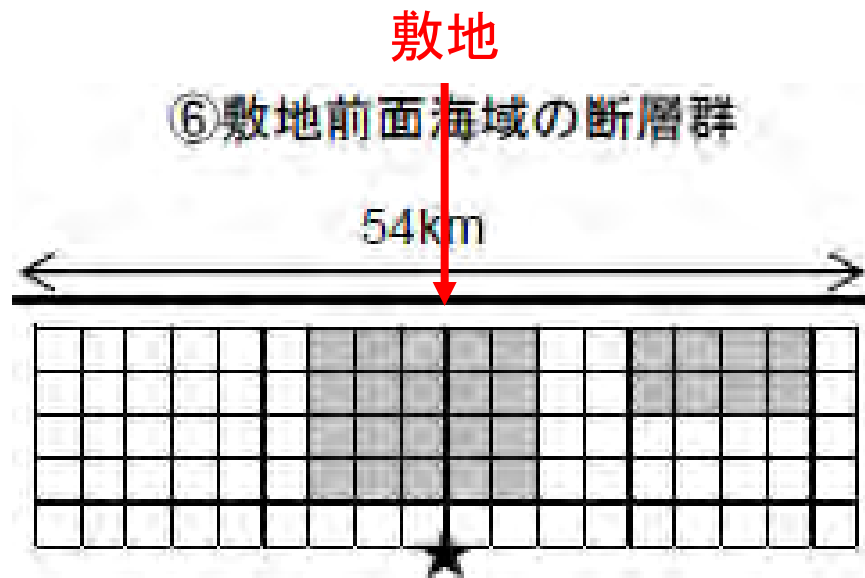
となります。このように、敷地正面にバリアとなる可能性のあるジョグがあれば、むしろその場所にこそ、大きな応力降下量を伴うアスぺリティを想定すべきです。

③アスペリティの応力降下量として20MPaまでしか考えない
という現状の方法では、応力降下量の大きな不確実性に全く
対応できていないことについて

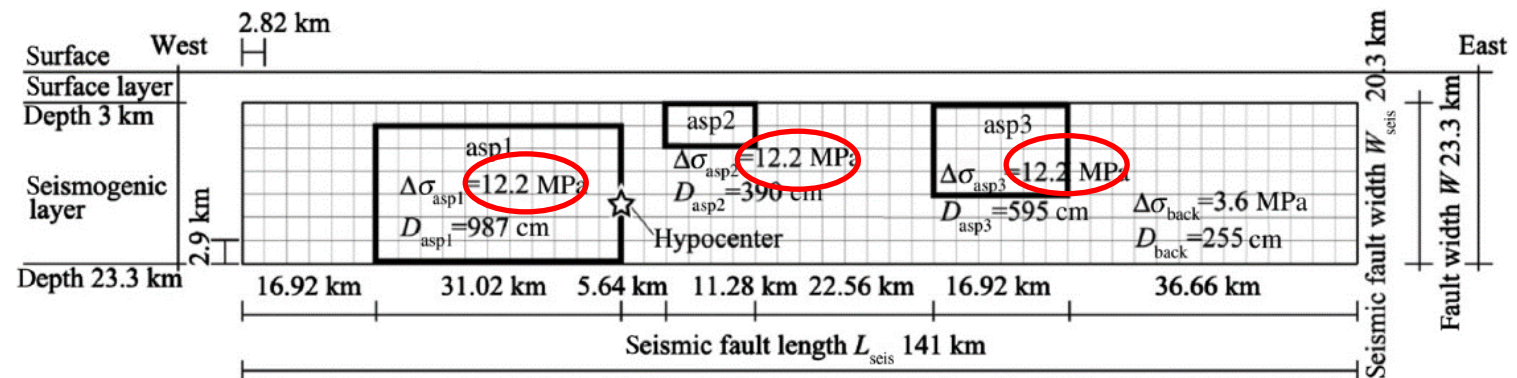
基本ケースにおける
アスペリティ
応力降下量 20MPa
のケースも考慮

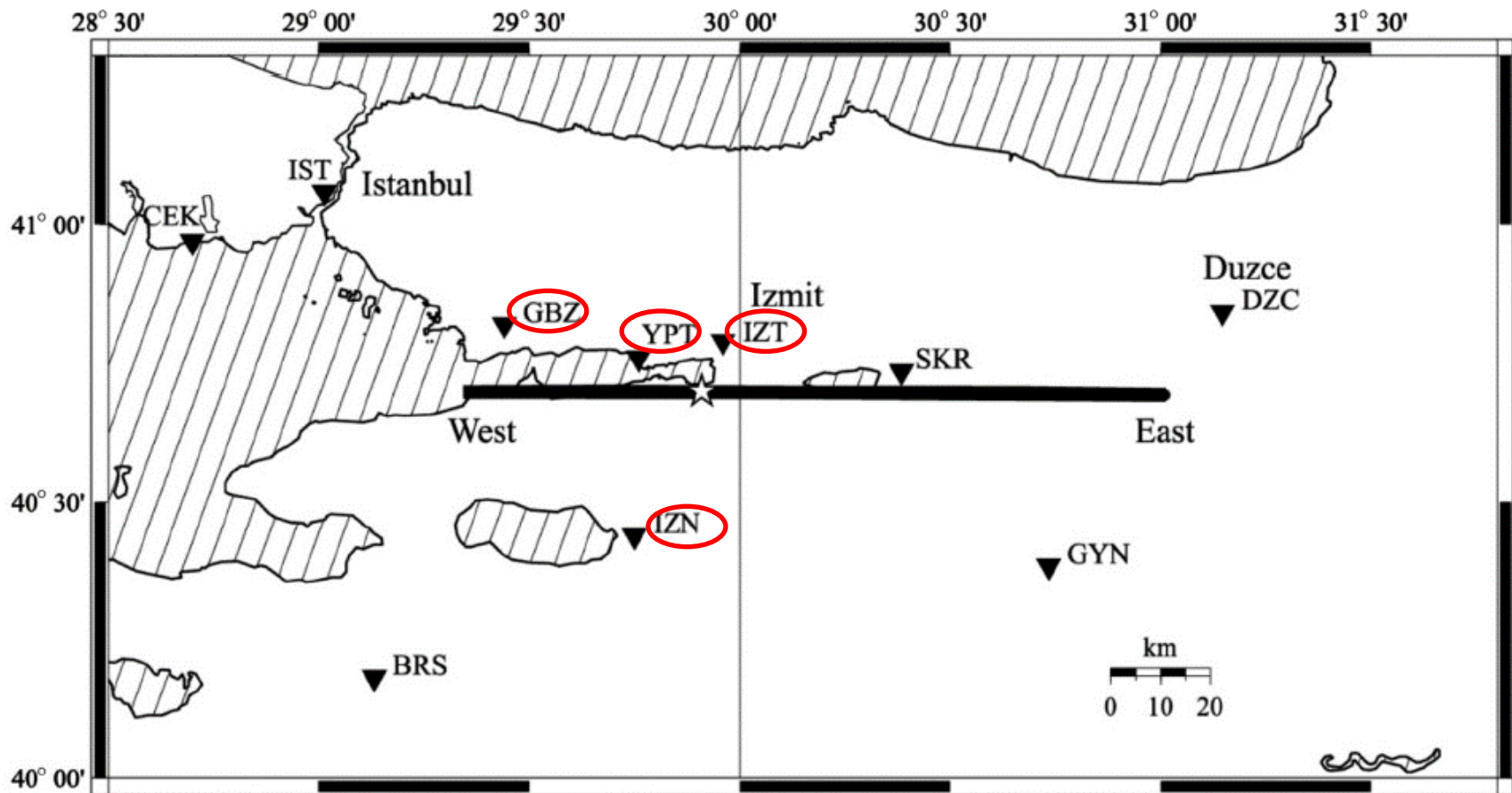


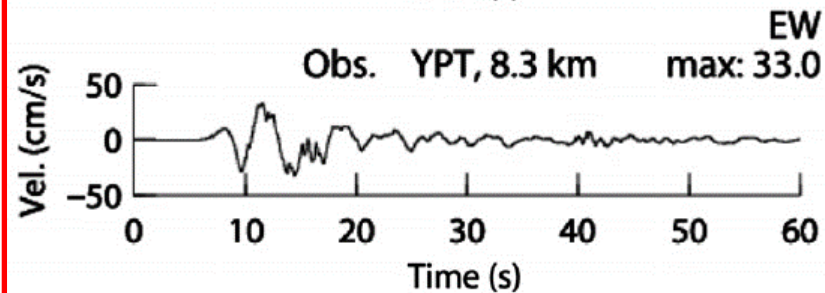
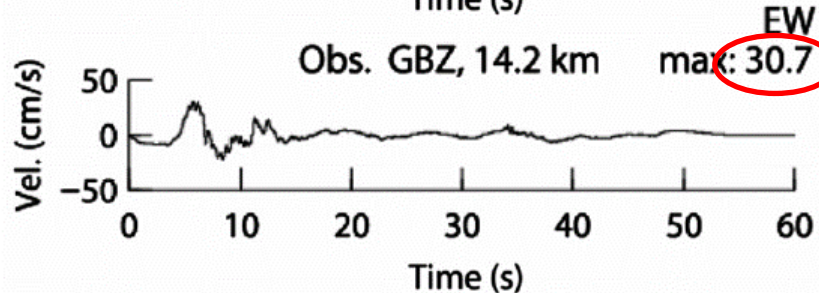
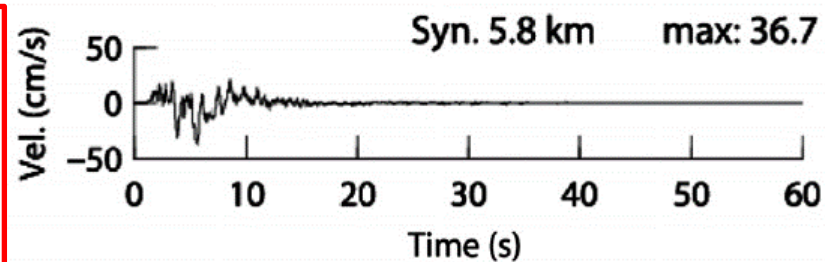
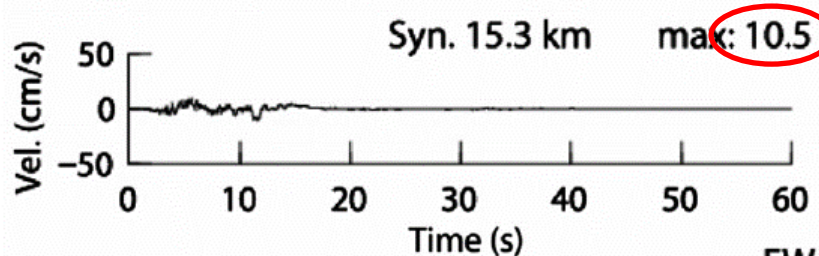
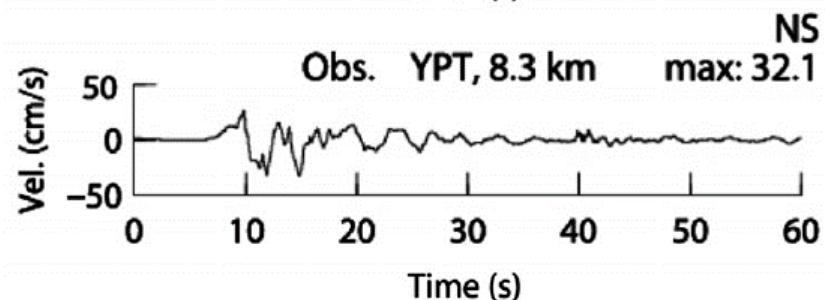
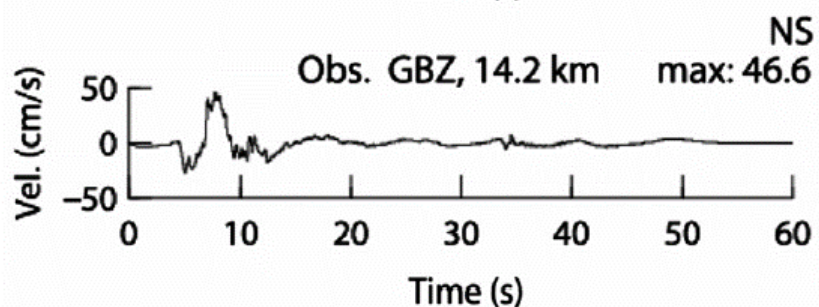
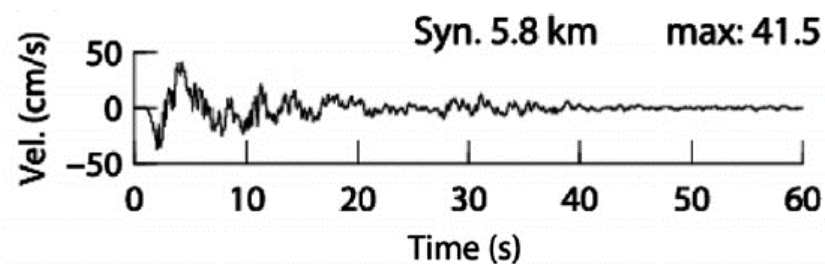
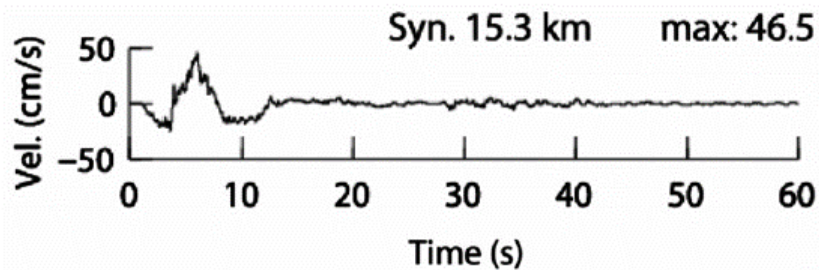
敷地正面のアスペリ
ティ
応力降下量は
12.2MPaまで



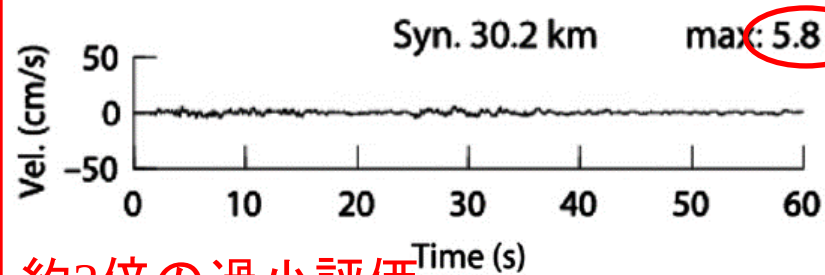
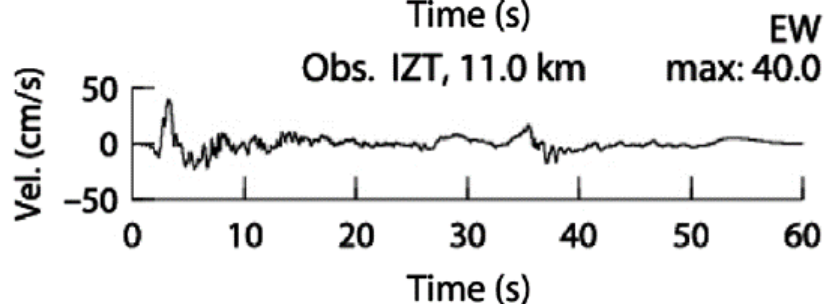
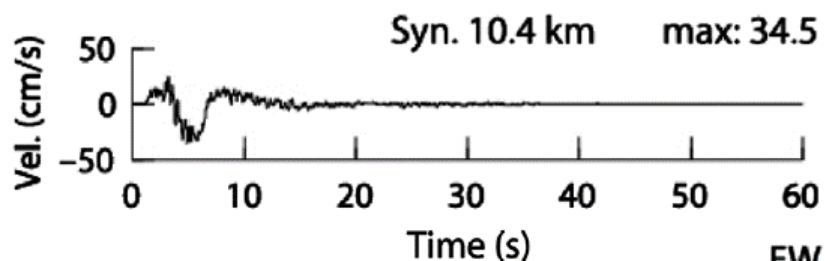
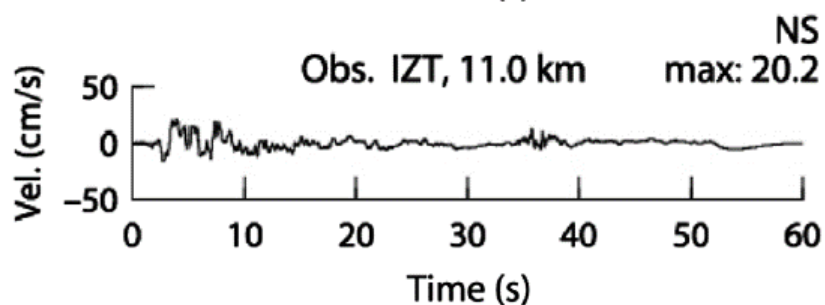
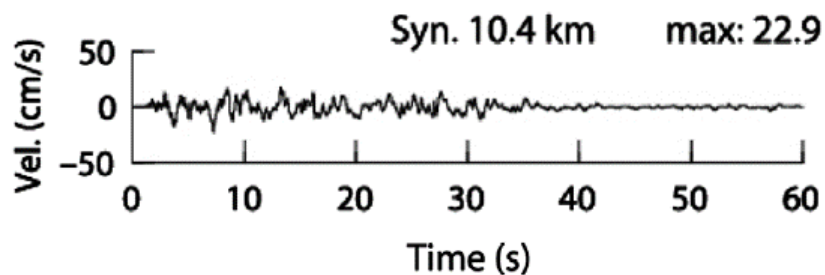
○長大断層の断層パラメタ設定法の妥当性を検証したとする論文として、Danほか(2019)がある。そこでは、1999年トルコKocaeli地震を対象として、応力降下量12.2MPaのアスペリティが設定されている。



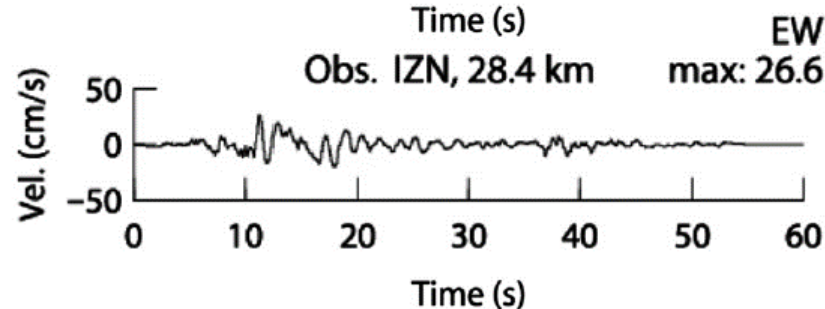
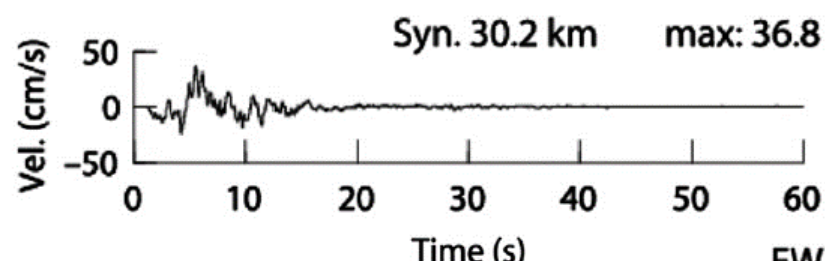
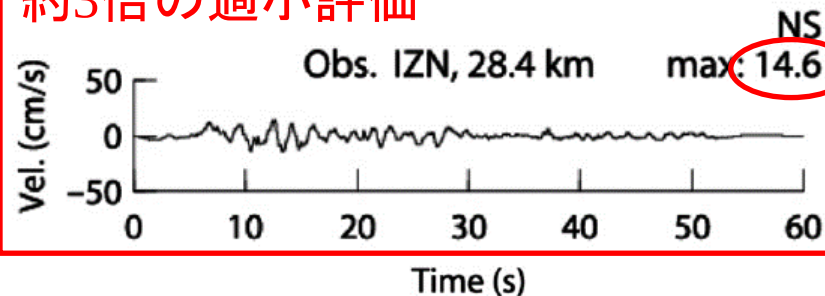




約3倍の過小評価



約3倍の過小評価

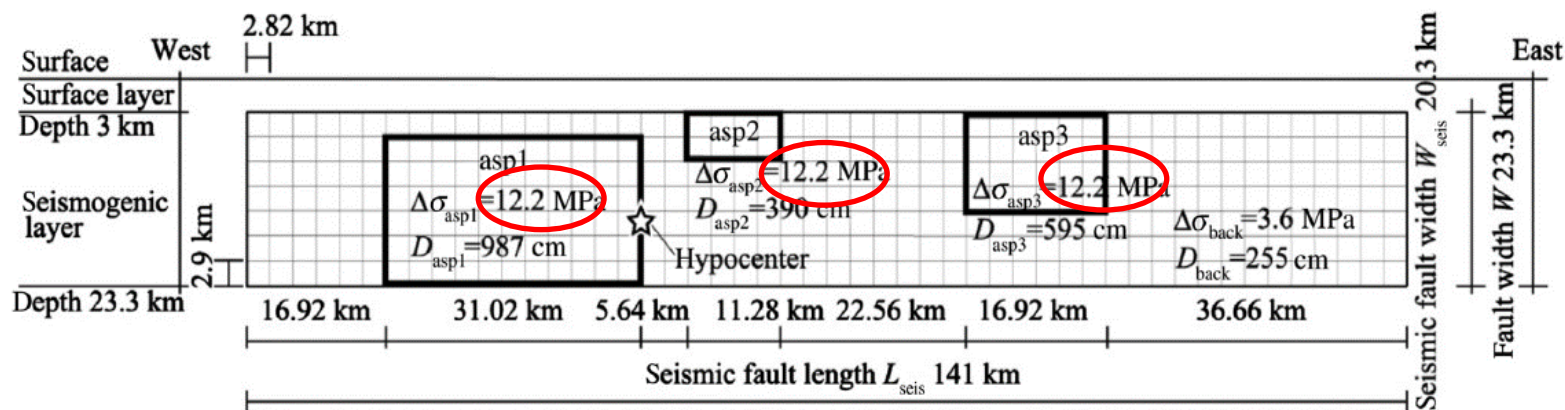


※事後の解析であり，観測に合わせるような努力は払われていると考えられるにも関わらず，8波形のうち2波形で3倍程度の過小評価が生じている

※すなわち，**事後の解析でも，実際の振幅が計算より3倍程度大きいという現象が25%もの割合で生じる**ということである．残念ながらこれが現在の強震動研究の実力であり，応力降下量は高い精度で決定できているわけではない．

※このような大きな不確実性を前にすると，不確実性の考慮として「応力降下量を1.5倍すること」あるいは「20MPaを用いること」は全く不十分である．

※トルコのケースを考えるだけでも，3倍の過小評価を防止するためには，応力降下量を3倍程度，すなわち36MPaとしなければならない．



※加えて、アスペリティの応力降下量の上限を20MPaとすることを正当化するようないかなる物理的理由も存在しない。

※既往の岩石実験の結果に基づいて岩盤の強度 $|\tau|$ (単位はMPa)を推定するための式としてByerlee(1978)の式がある。

$$|\tau| = \begin{cases} 50 + 0.6\sigma_n & \sigma_n > 200\text{MPa} \\ 0.85\sigma_n & \sigma_n < 200\text{MPa} \end{cases}$$

※ここに σ_n は断層面に対して垂直な方向の応力です(単位はMPa)。一般に岩盤の密度は2700kg/m³ですので、深さ10kmにおける鉛直方向の有効応力(水圧の分を差し引いた応力のこと) σ_v' は166MPa程度となります。応力が等方的であることを仮定し、 σ_n も166MPa程度であるとすれば、岩盤の強度 $|\tau|$ は140MPa程度となります。つまり深さ10km付近の岩盤は140MPa程度の応力をため込むことができるのです。

※この応力が、たまたま一部しか解放されなければ、20MPa程度の地震になります。しかし、応力が全て解放されれば140MPa程度の地震にもなり得ます。

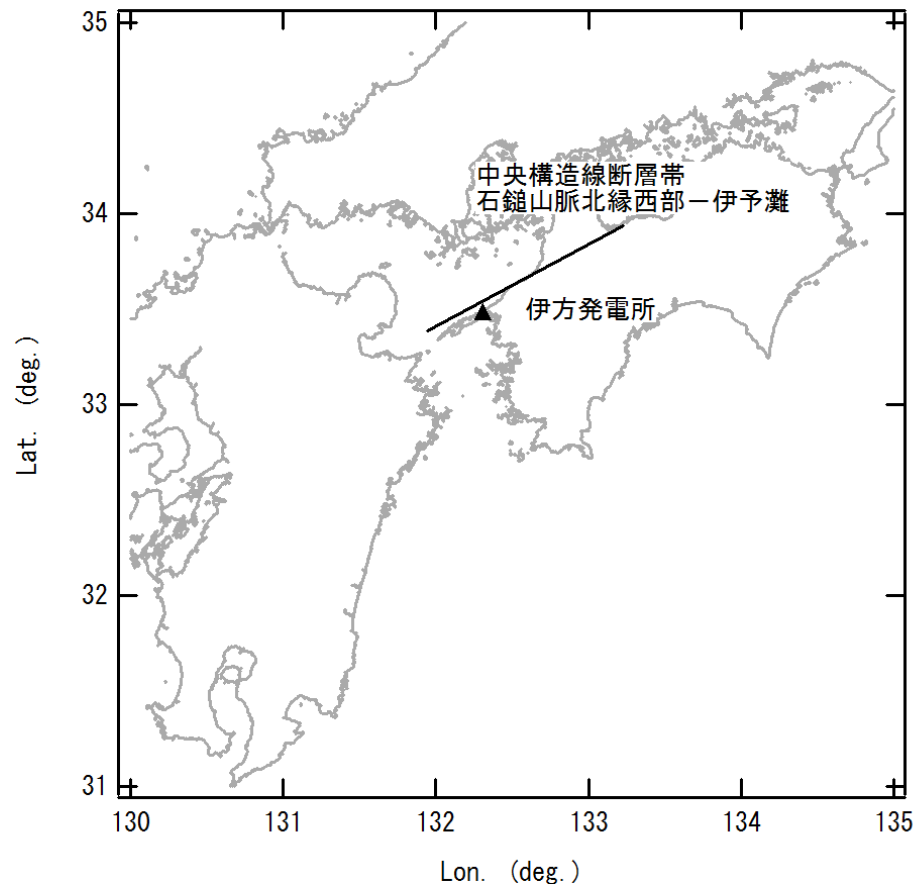
※通常考えられているよりもワンオーダー大きい140MPa程度の応力降下量を考えなければ十分な保守性は担保されない。

内陸地殻内地震に関する地震動評価の問題点のまとめ

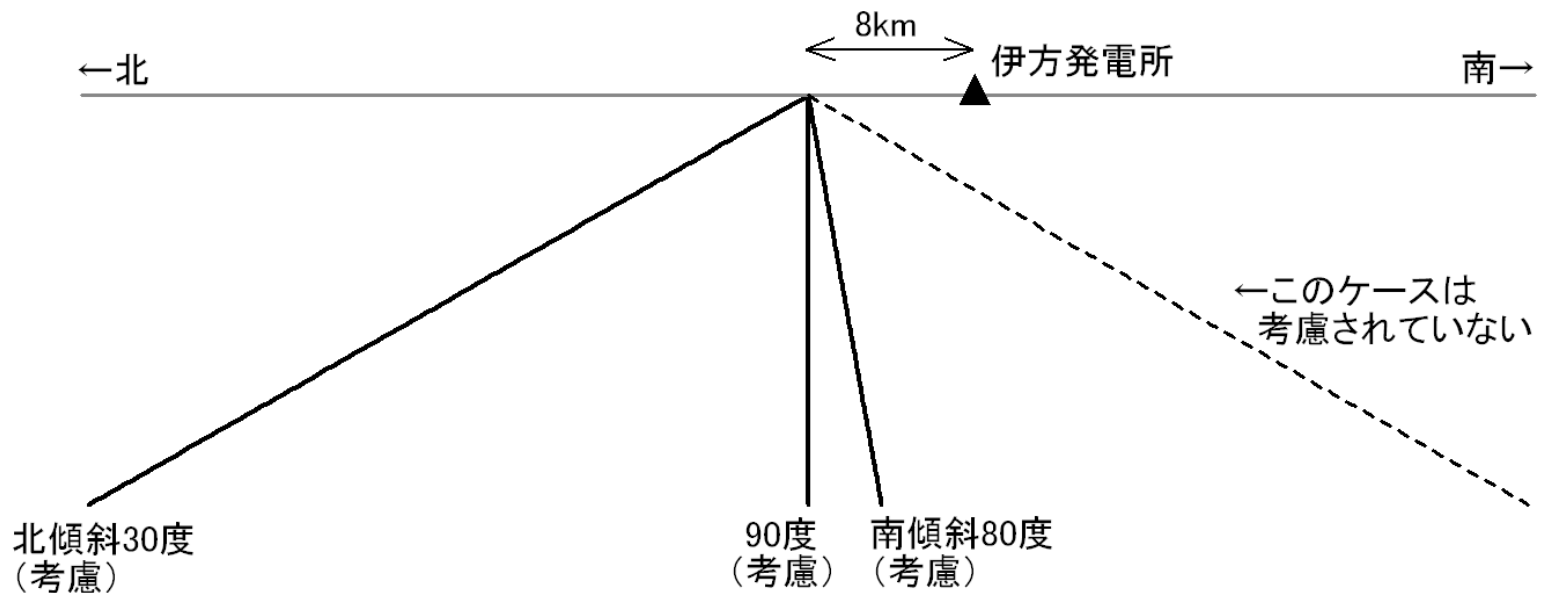
- ①長大な断層のケースにおいて、短周期地震動が西から東までほぼ均等に生成されるケースしか取り上げられていないが、実際の地震ではアスペリティを断層面上に均等に配分する方法では観測地震動の再現に成功していない場合も多いため、アスペリティを断層面の発電所に近い側に偏在させたケースも考慮すべき。
- ②敷地正面にバリアとなる可能性のあるジョグがあるのであれば、”Modern Global Seismology”に示される地震学の標準的な考えからしても、敷地正面のジョグがアスペリティとして振る舞い、大きな応力降下量を伴う破壊が生じる可能性があるため、そのようなケースを考慮すべき。
- ③アスペリティの応力降下量が12.2MPaでは、事後の解析でも、実際の振幅が計算より3倍程度大きいという現象が25%もの割合で生じる。通常考えられているよりもワンオーダー大きい140MPa程度の応力降下量を考えなければ十分な保守性は担保されない。

1. 内陸地殻内地震に関する地震動評価の問題点
2. 南傾斜の断層を考慮していないことの問題点
3. プレート間地震に関する地震動評価の問題点

○伊方原子力発電所の基準地震動策定では、発電所の敷地前面海域に存在する中央構造線断層帯で生じる地震を考慮していますが、その際、傾斜角については、発電所から離れるセンスである北傾斜については30度まで考慮しているにも関わらず、発電所に近づくセンスである南傾斜については80度までしか考慮していません(四国電力株式会社, 2015b).



○伊方原子力発電所の基準地震動策定では、発電所の敷地前面海域に存在する中央構造線断層帯で生じる地震を考慮していますが、その際、傾斜角については、発電所から離れるセンスである北傾斜については30度まで考慮しているにも関わらず、発電所に近づくセンスである南傾斜については80度までしか考慮していません(四国電力株式会社, 2015b).



○この80° という数字は実際には南傾斜を考慮していないに等しい.

○例えば, 2016年熊本地震の本震(右横ずれを主体とし正断層成分を含む)に関する事後の解析では, 国土地理院(2016)は地殻変動の解析結果に基づいて傾斜角が60度の断層面を, 瀬瀬他(2016)は強震波形データの解析に基づいて傾斜角が75度の断層面を, Asano and Iwata(2016)は強震波形データの解析に基づいて傾斜角が65度の断層面を, それぞれ提案している(布田川区間に着目した数字).

○このように, 事後解析であってさえ, 断層の傾斜角は研究者によってかなりばらつく. まして事前の予測が難しいのは明らかであり, ここで対象としている施設の重要性, 万が一被害が生じた場合の影響の甚大さなども考えれば, 敷地前面海域の断層の傾斜角については相当の不確実性を見込むべきであり, 80° という数字は実際には南傾斜を考慮していないに等しい.

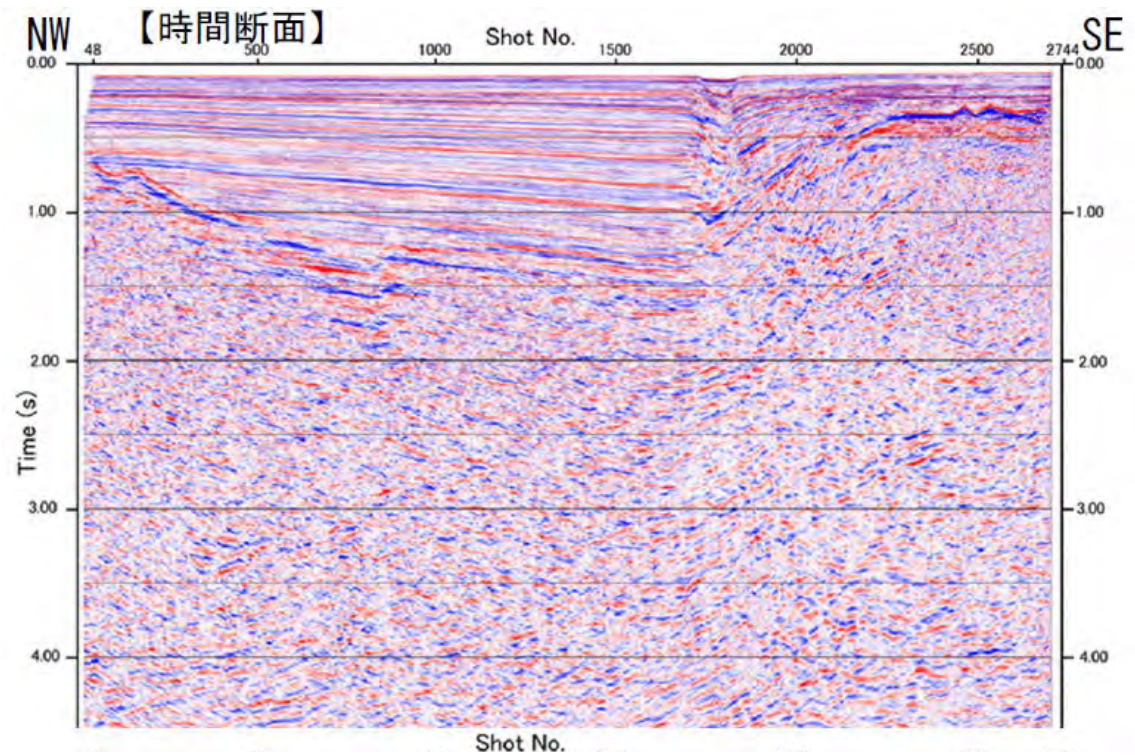
敷地前面海域のエアガン 探査断面

中央構造線断層帯は横軸
の数字で1700～1800付近
に存在

中央構造線断層帯が右横
ずれを主体とする断層で
あることは争いのないところ



ただし、それに上下成分が
加わってくる可能性がある



敷地前面海域のエアガン 探査断面

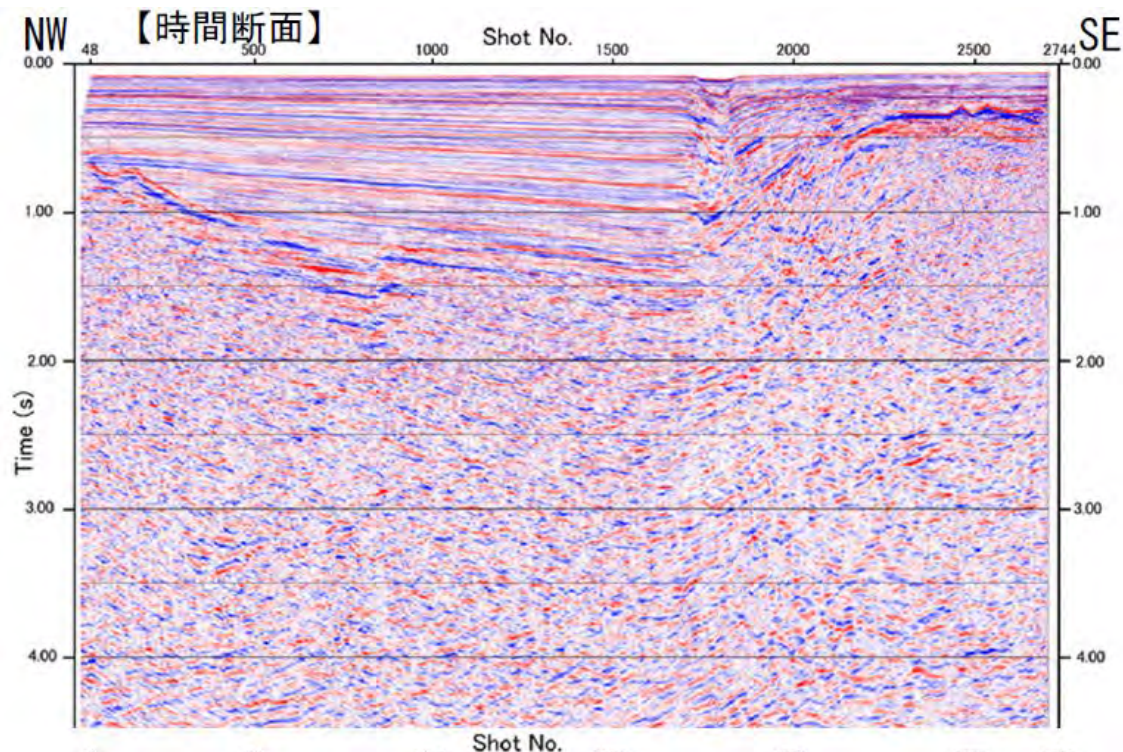
浅い部分の地層が中央構造線を挟んで北側より南側で高くなっている



このことから長年の間に南側が高くなるような断層運動が起きていたことは確実



「南傾斜の逆断層」か
「北傾斜の正断層」かの
いずれかの断層運動が
過去に生じていたことが示唆される



敷地前面海域のエアガン 探査断面

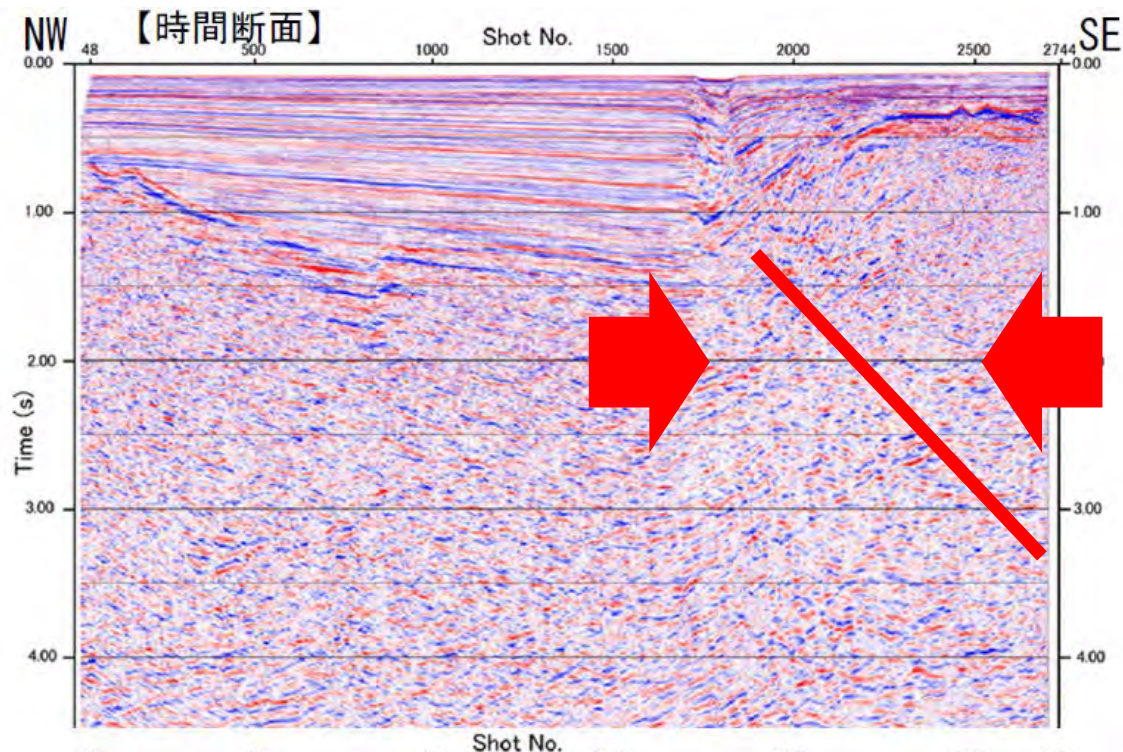
浅い部分の地層が中央構造線を挟んで北側より南側で高くなっている



このことから長年の間に南側が高くなるような断層運動が起きていたことは確実



「南傾斜の逆断層」か
「北傾斜の正断層」か
のいずれかの断層運動が過去に生じていたことが示唆される



敷地前面海域のエアガン 探査断面

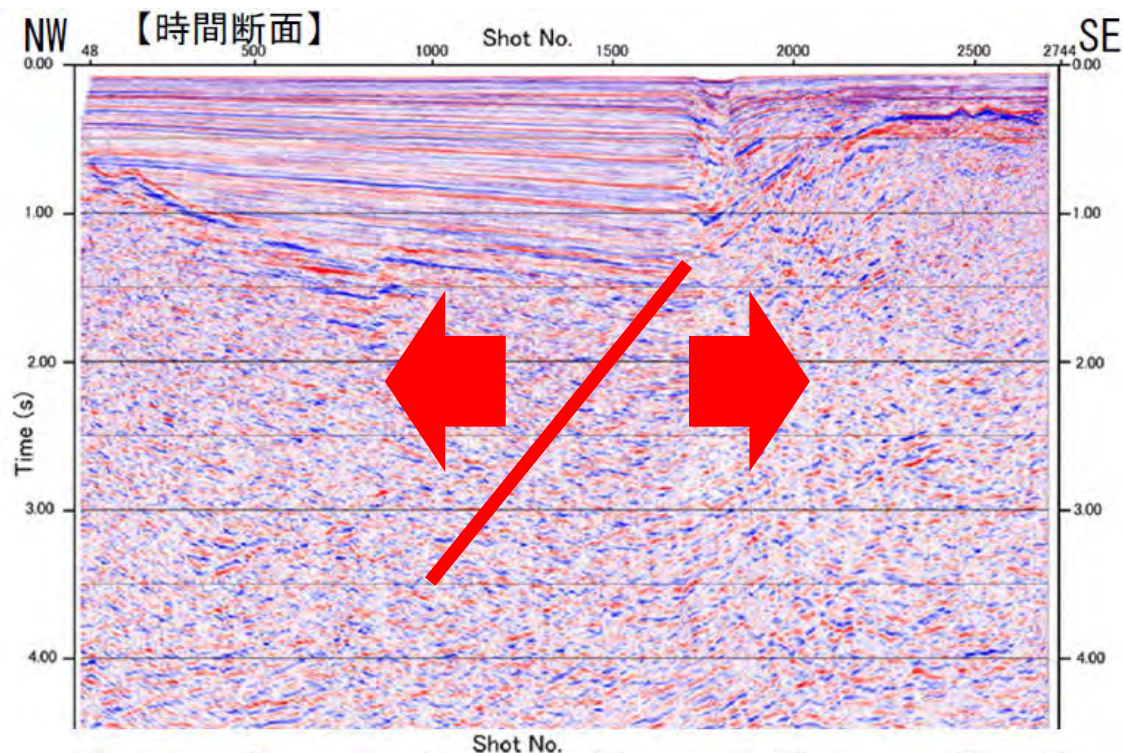
浅い部分の地層が中央構造線を挟んで北側より南側で高くなっている



このことから長年の間に南側が高くなるような断層運動が起きていたことは確実



「南傾斜の逆断層」か
「北傾斜の正断層」か
のいずれかの断層運動が過去に生じていたことが示唆される

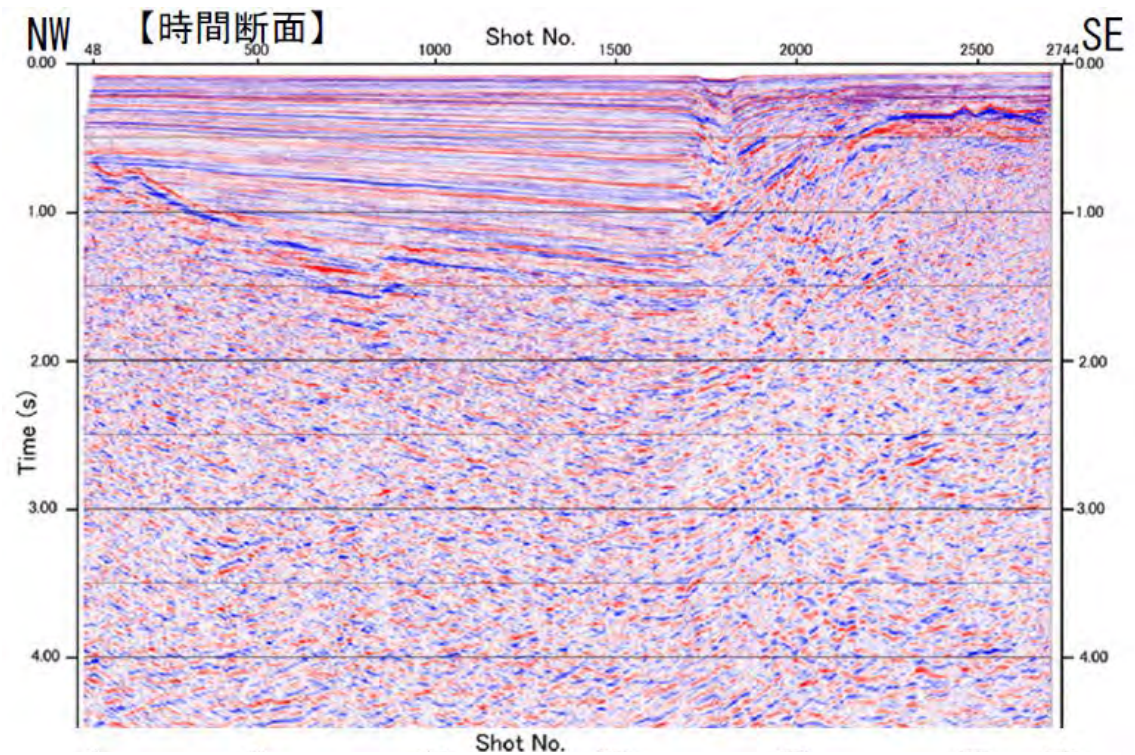


敷地前面海域のエアガン 探査断面

図から読み取れるのは
北傾斜の断層面か，南
傾斜の断層面か？



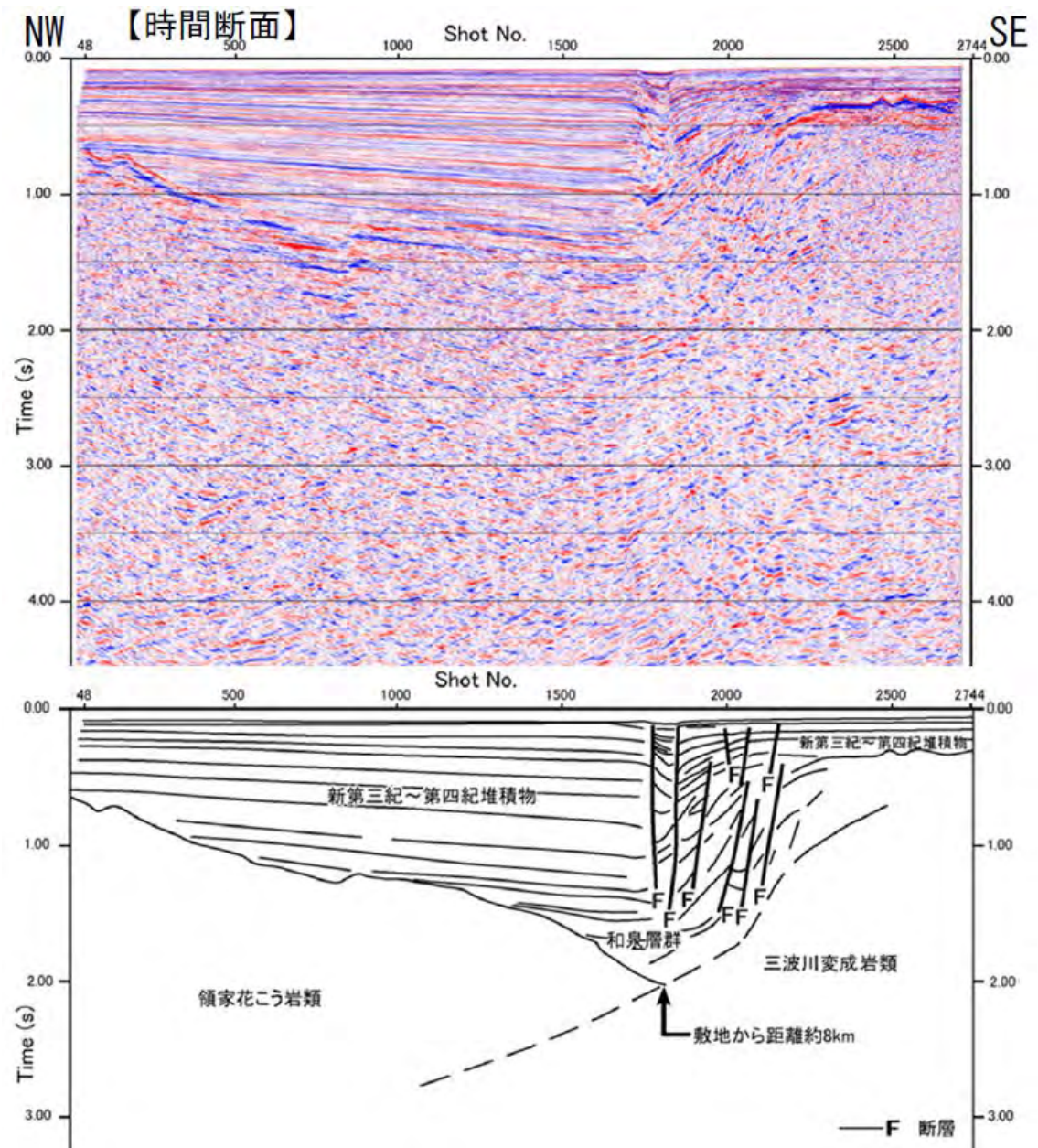
少なくとも私には，北傾
斜の断層面だけでなく，
あるいはそれ以上に，南
傾斜の断層面が読み取
れるように思える．



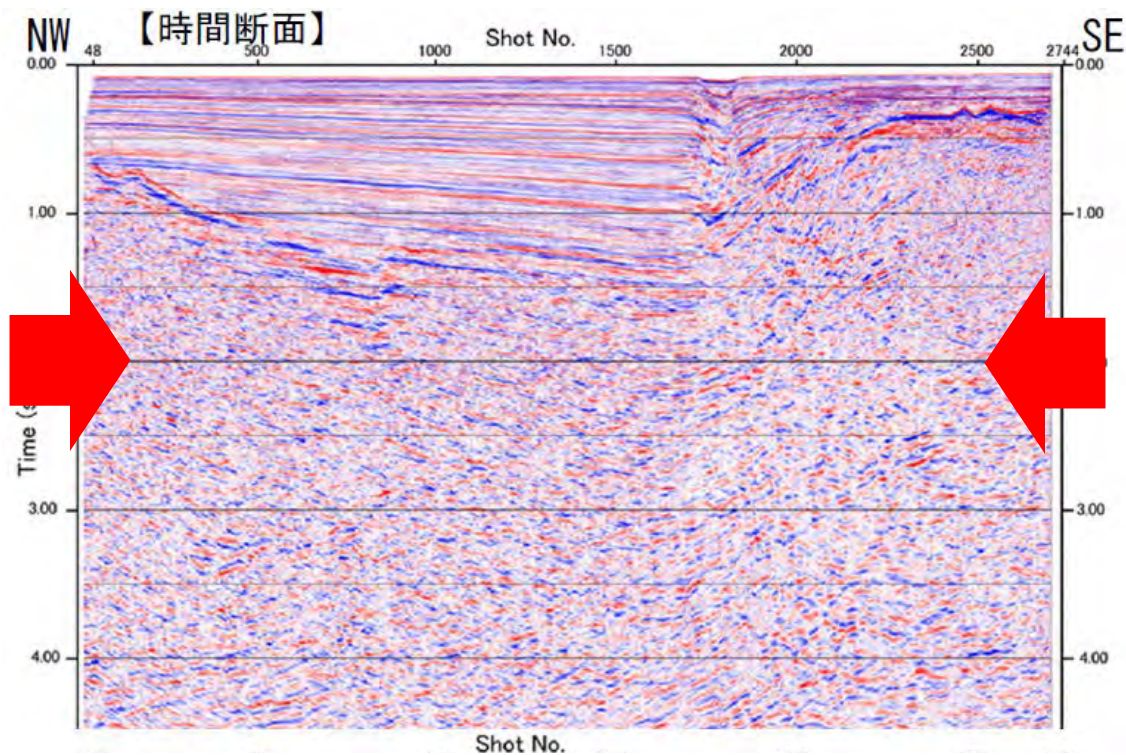
敷地前面海域のエアガン
 探査断面(上)と事業者
 による解釈(下)

事業者は、浅部において
 高角で北傾斜の断層面を
 読み取っている。しかし、
 これには相当無理がある。

上の探査断面については、
 利害関係のない複数の
 専門家による解釈がなさ
 れるべきです。

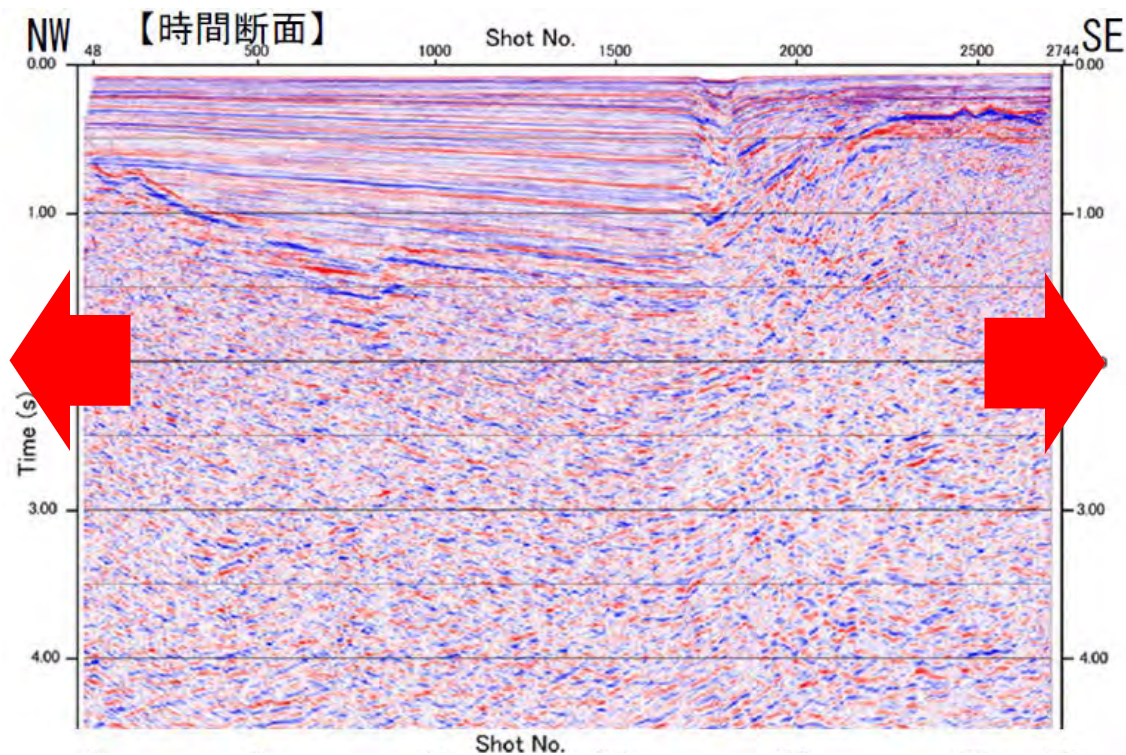


敷地前面海域のエアガン 探査断面



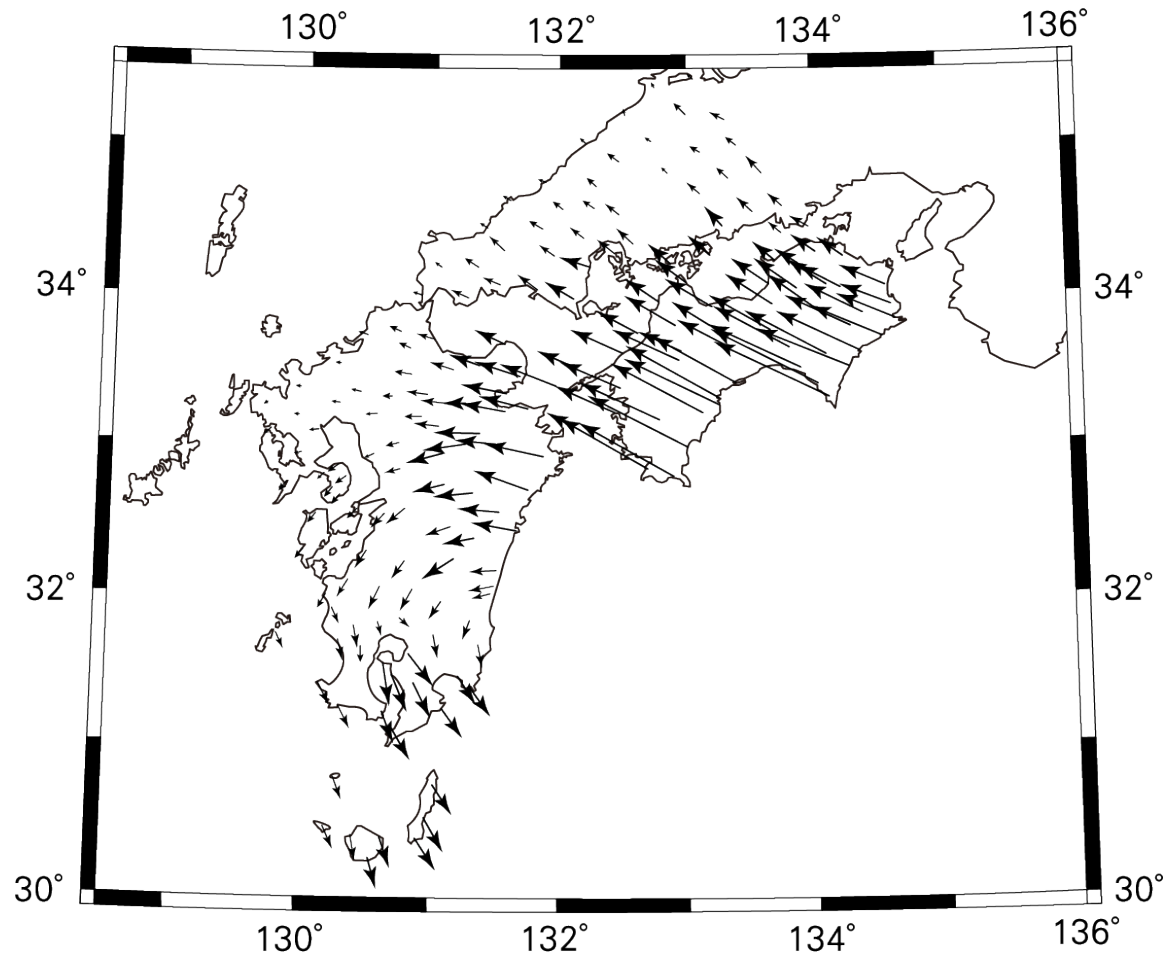
図のように圧縮力が作用していれば逆断層

敷地前面海域のエアガン 探査断面



図のように引張力が作用していれば正断層

四国地方の地殻に作用する力



GPS連続観測に基づく西南日本における地殻変動の速度ベクトル
Nishimura and Hashimoto(2006)の図をもとに作成
1996年3月21日～2002年3月20日

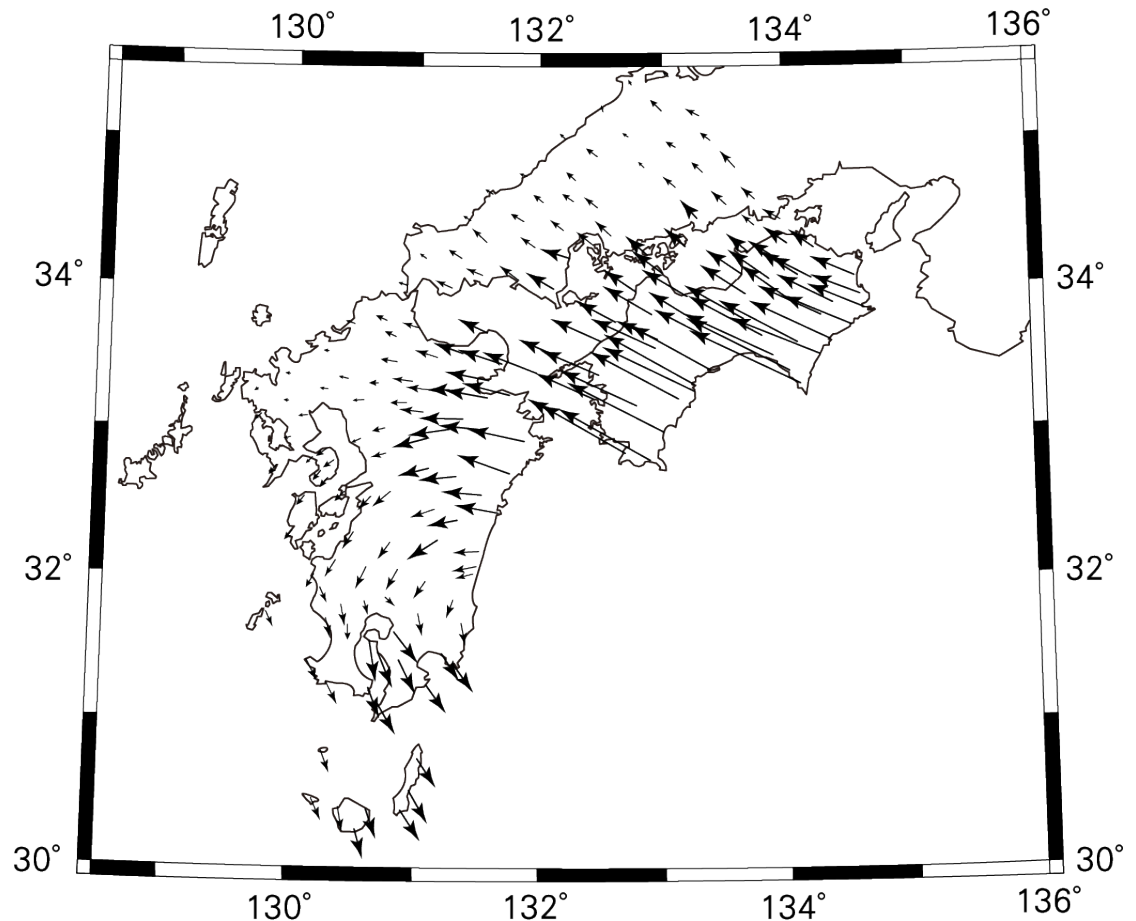
四国地方の地殻に作用する力

四国地方の地殻は、フィリピン海プレートの北西への移動に伴い常に北西に向かって押されている(右図)

この「押されている」状態は次の南海トラフ地震の発生まで続く

南海トラフ地震が発生すれば、力はいったん解放され、その後再び蓄積される。

長い目で見れば、押す力は強弱を繰り返す。



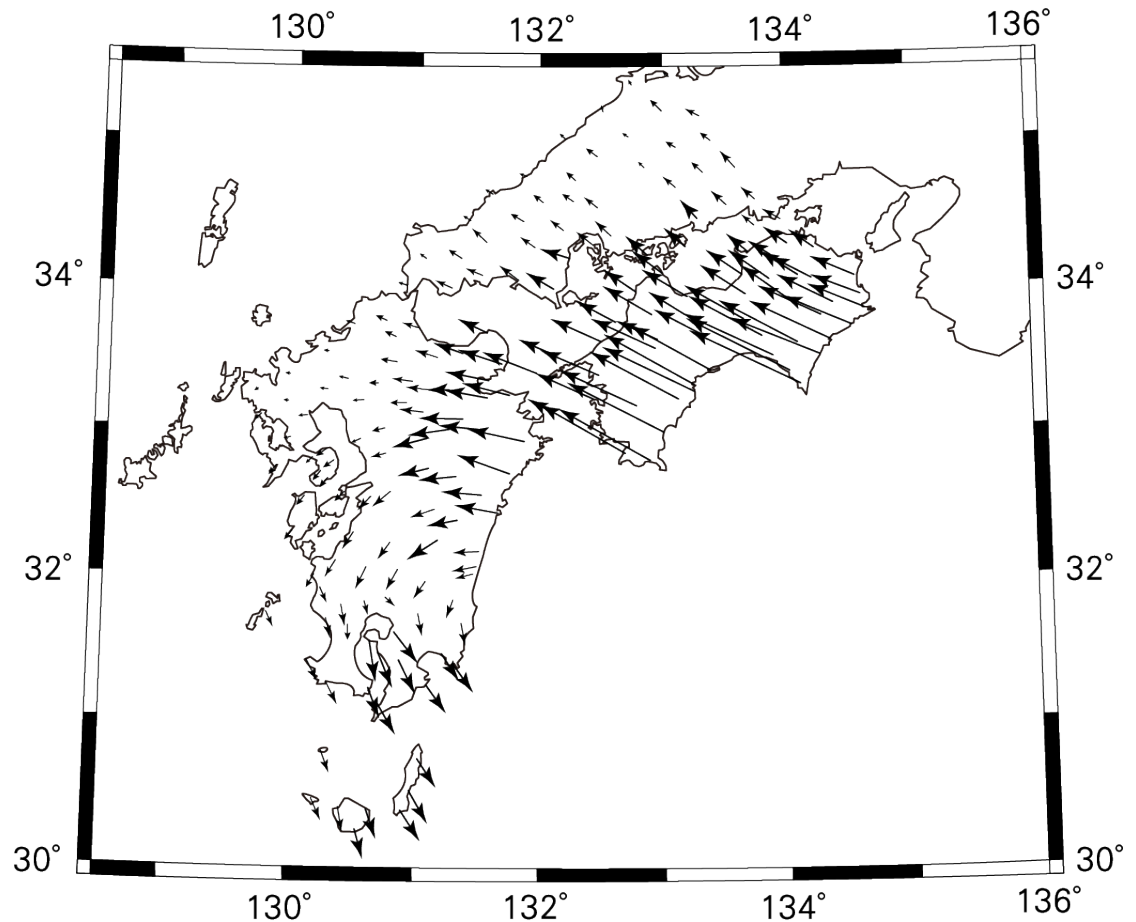
GPS連続観測に基づく西南日本における地殻変動の速度ベクトル

Nishimura and Hashimoto(2006)の図をもとに作成
1996年3月21日～2002年3月20日

四国地方の地殻に作用する力

押す力が強いほど中央構造線活断層帯で右横ずれの断層運動が起きやすくなる。

つまり、中央構造線活断層帯で大地震が起こるのは北西向きの力が強いときであり、そのときには、逆断層成分を伴う地震が起きる可能性が高い。



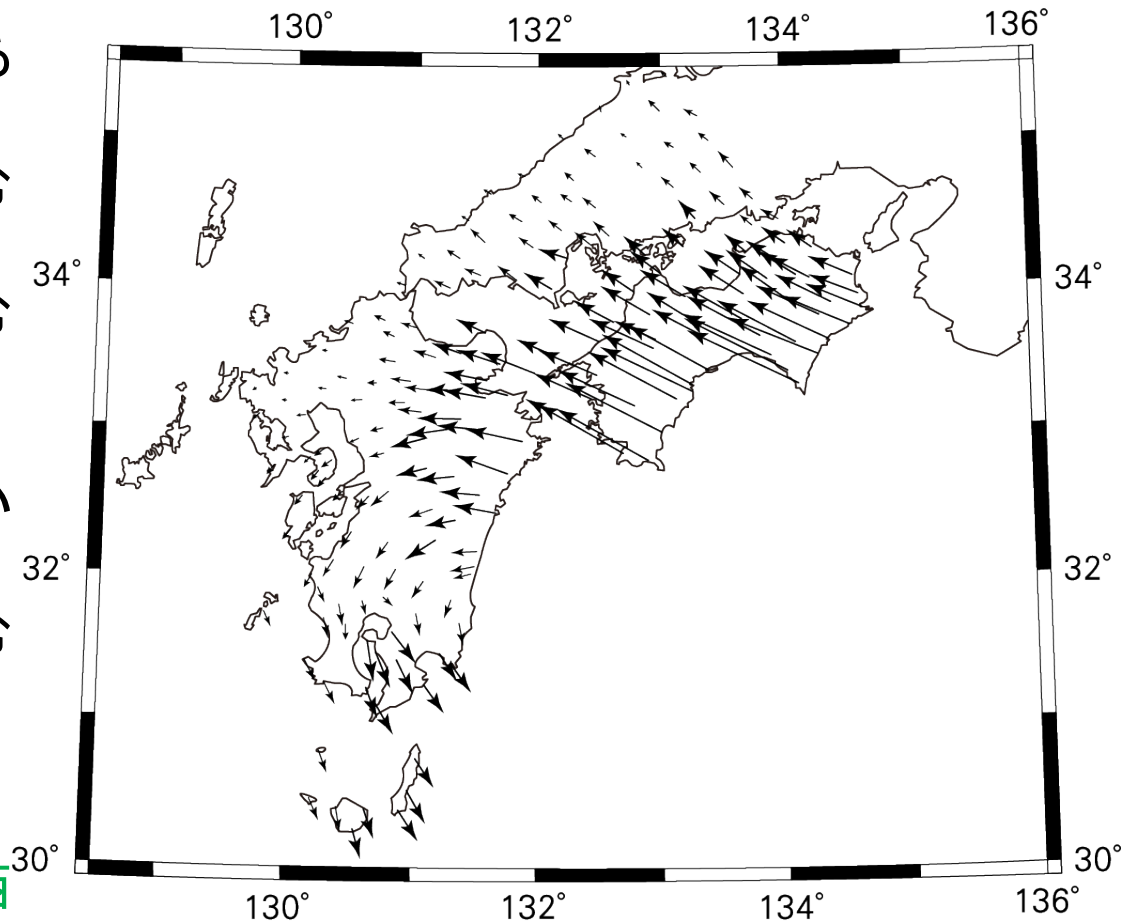
GPS連続観測に基づく西南日本における地殻変動の速度ベクトル

Nishimura and Hashimoto(2006)の図をもとに作成
1996年3月21日～2002年3月20日

四国地方の地殻に作用する力

つまり先に述べた可能性のある二つの地震, すなわち
「南傾斜の逆断層成分を含む地震」
「北傾斜の正断層成分を含む地震」
(ただし右横ずれに加えて)
のうち, 起きる可能性が高いのは
「南傾斜の逆断層成分を含む地震」
である.

現在, 図に示すように, 北西-南東方向の力が日々蓄積されている状況であり, 「南傾斜の逆断層成分を含む地震」の発生の可能性が刻一刻高まっている可能性がある.



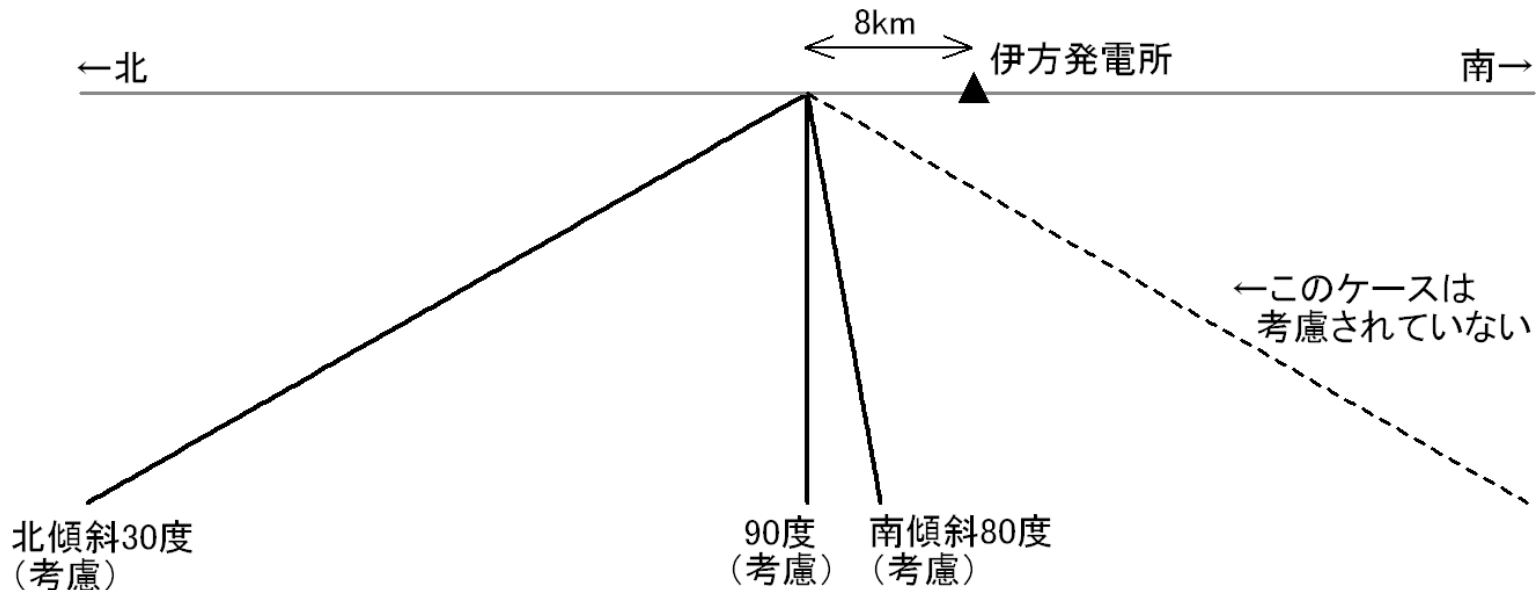
GPS連続観測に基づく西南日本における地殻変動の速度ベクトル

Nishimura and Hashimoto(2006)の図をもとに作成
1996年3月21日～2002年3月20日

上盤効果

南傾斜の断層面を考えた場合、上盤効果により、北傾斜の場合よりも原子力発電所での地震動が大きくなると考えられる。

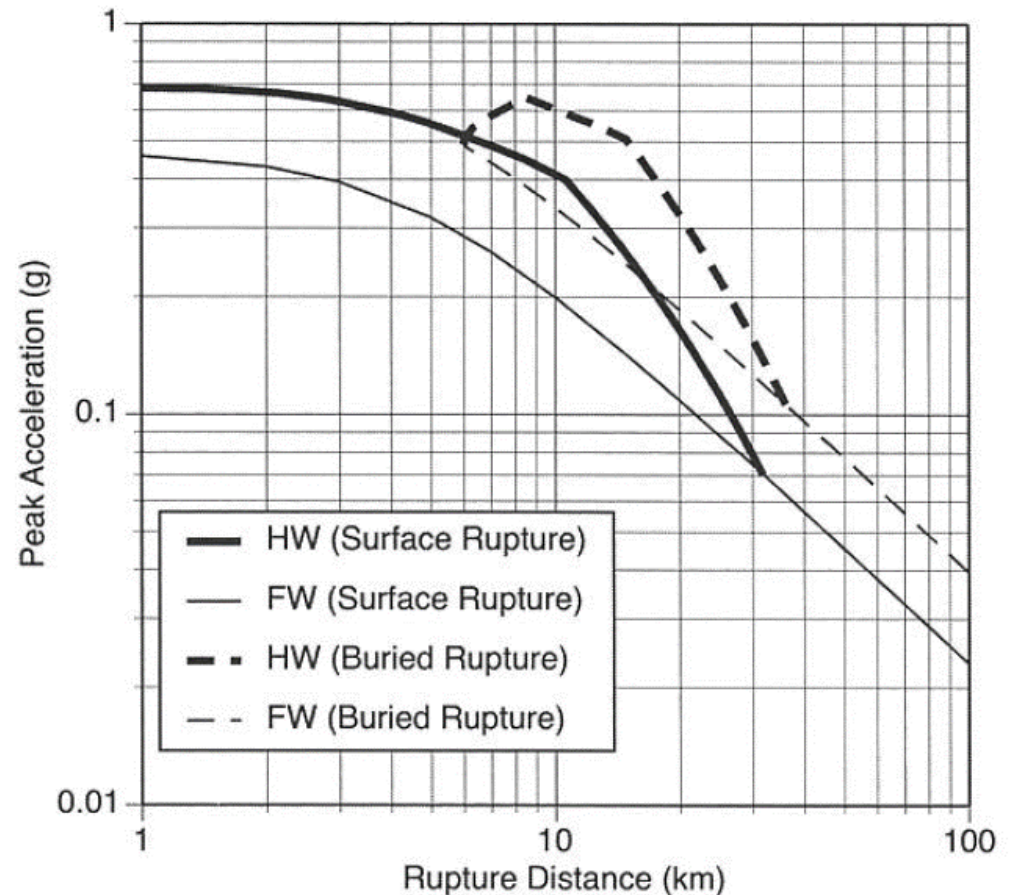
ここで、上盤効果とは、逆断層の断層面を挟み、下盤側よりも上盤側の方が地震動が大きくなる現象であり、広く知られている（例えばAbrahamson and Silva, 2008; Abrahamson et al., 2014; 日本建築学会, 2022）。



上盤効果

例えば Abrahamson and Silva (2008)は図に示すように上盤側で大きくなるような地震動予測式を提案している(図はM6.7, $V_{s30}=760\text{m/s}$ の場合の最大加速度).

上盤効果は主として主たる破壊領域からの距離によるものと考えられる.



南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

○ここでは、万が一原子力発電所で事故が起きた場合の影響の大きさに鑑み、南傾斜を想定した地震動の算定を行いました。

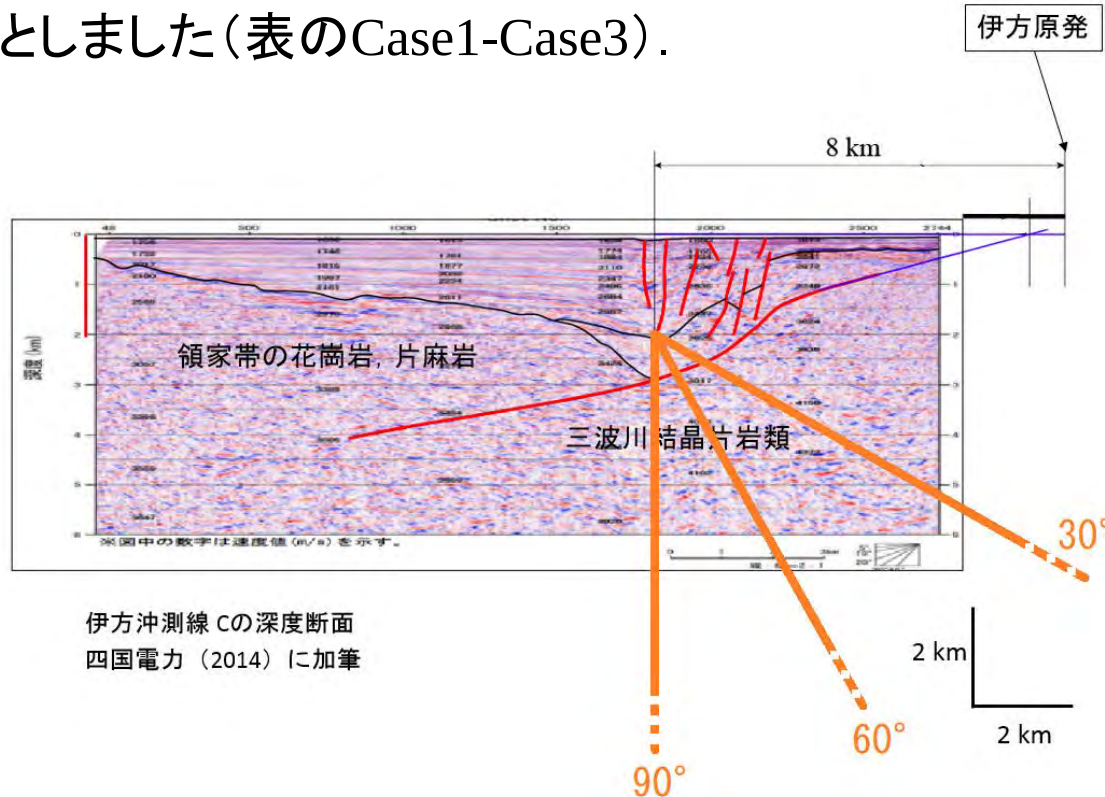
○南傾斜80度では南傾斜をほとんど考えていないのと同じですので、南傾斜60度と30度のケースを考え、発電所の敷地における地震動の計算を行いました。これらのケースでは、基準地震動策定時と同様、発電所と断層上端の水平距離を8kmとしました(表のCase1-Case3)。

	発電所と断層上端の水平距離	傾斜角（南傾斜）
Case1	8km	90度
Case2	8km	60度
Case3	8km	30度
Case4	5km	90度
Case5	5km	60度
Case6	5km	30度

南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

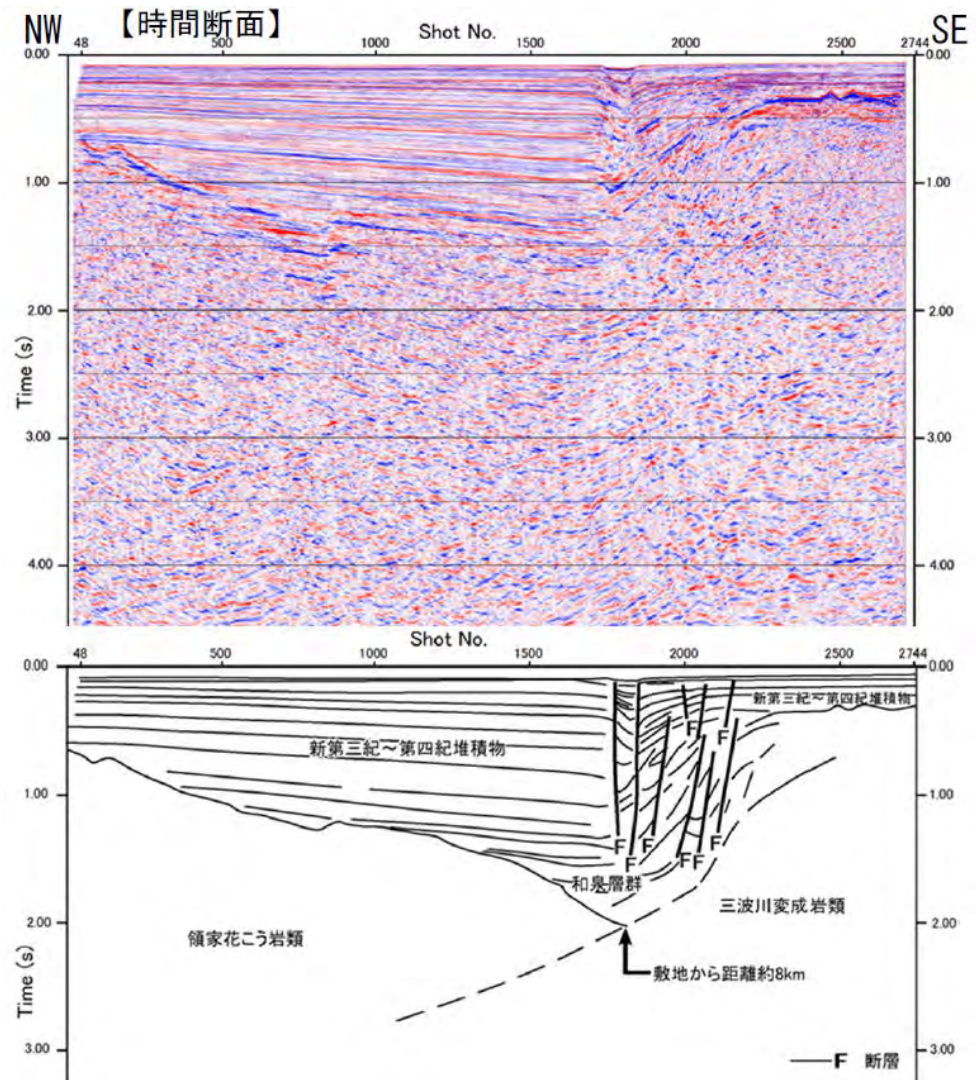
○ここでは、万が一原子力発電所で事故が起きた場合の影響の大きさに鑑み、南傾斜を想定した地震動の算定を行いました。

○南傾斜80度では南傾斜をほとんど考えていないのと同じですので、南傾斜60度と30度のケースを考え、発電所の敷地における地震動の計算を行いました。これらのケースでは、基準地震動策定時と同様、発電所と断層上端の水平距離を8kmとしました(表のCase1-Case3)。



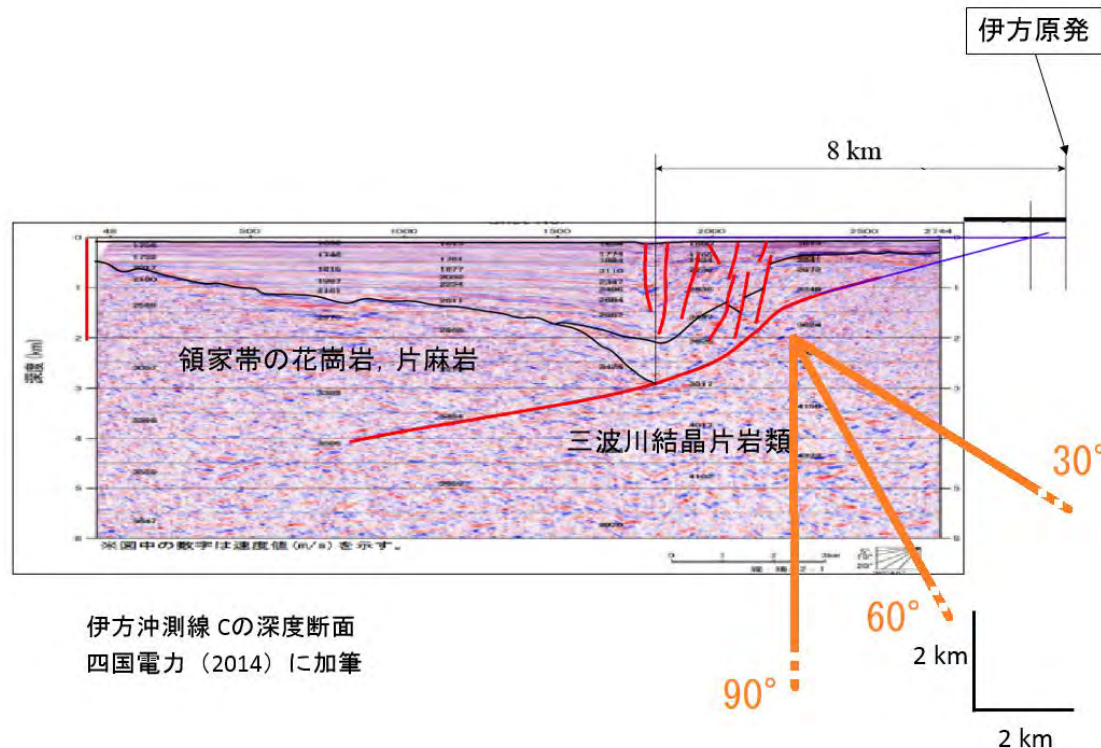
南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

○また、高知大学の岡村眞名誉教授は、仮処分の審尋において、図の断面において複数の断層が認められることから、発電所と断層上端の水平距離を8kmではなく5km～6kmと考えて地震動の評価を行うべきであると述べておられます。そこで、ここではこれに従い、発電所と断層上端の水平距離を5kmとしたケースについても検討を行いました。



南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

○また、高知大学の岡村眞名誉教授は、仮処分の審尋において、図の断面において複数の断層が認められることから、発電所と断層上端の水平距離を8kmではなく5km～6kmと考えて地震動の評価を行うべきであると述べておられます。そこで、ここではこれに従い、発電所と断層上端の水平距離を5kmとしたケースについても検討を行いました。



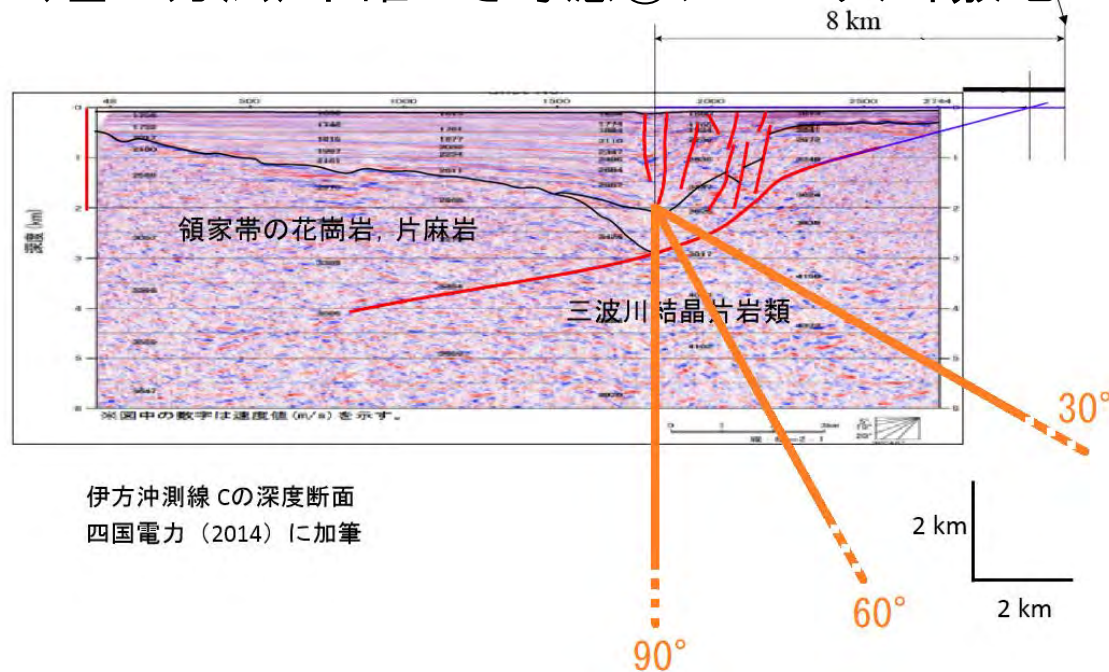
南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

○また、高知大学の岡村眞名誉教授は、仮処分の審尋において、図の断面において複数の断層が認められることから、発電所と断層上端の水平距離を8kmではなく5km～6kmと考えて地震動の評価を行うべきであると述べておられます。そこで、ここではこれに従い、発電所と断層上端の水平距離を5kmとしたケースについても検討を行いました(表のCase4-Case6)。

	発電所と断層上端の水平距離	傾斜角（南傾斜）
Case1	8km	90度
Case2	8km	60度
Case3	8km	30度
Case4	5km	90度
Case5	5km	60度
Case6	5km	30度

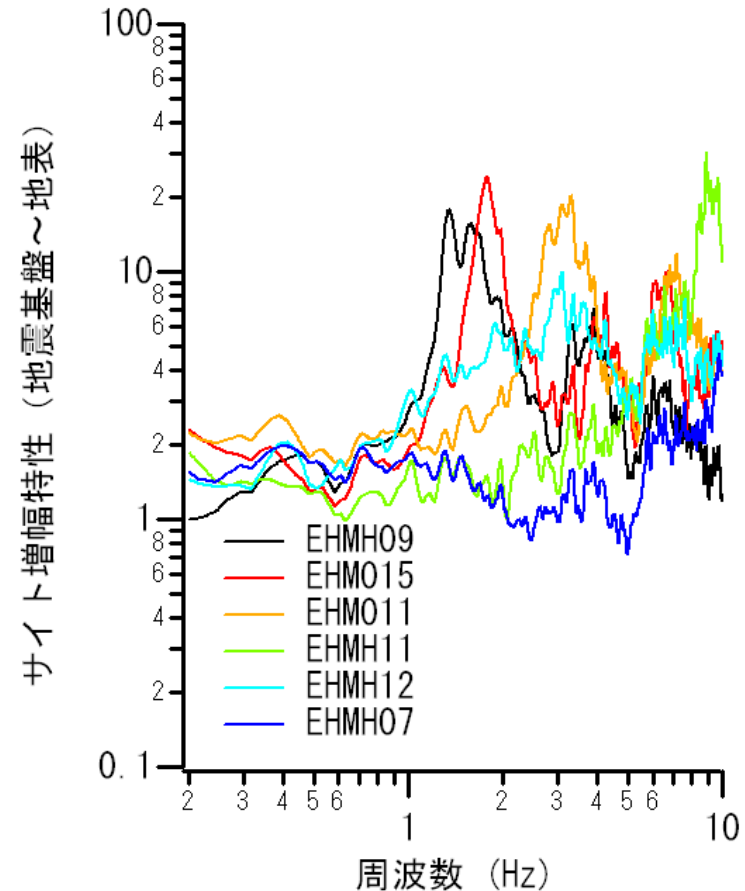
南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

○想定した震源は基本的に四国電力株式会社(2014)のp.61～p.62に記載のある「480kmシリーズ(壇の方法)不確かさ考慮⑤アスペリティ敷地正面」における敷地直近のアスペリティ(長さ15 km, 幅10.4 km, 地震モーメント 2.75×10^{19} Nm, 破壊伝播速度2.5 km/s)であり, 図に示すように上端深さ=2 kmを保ったままその位置のみを変化させました. 破壊開始点をアスペリティ東端から6kmの位置でアスペリティ下端から2.6km離れた位置とした点も「480kmシリーズ(壇の方法)不確かさ考慮⑤アスペリティ敷地正面」と同様です.



南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

○港湾基準においては敷地における地震観測記録から敷地におけるサイト増幅特性を評価することが推奨されています。しかしながら、伊方原発の敷地での地震観測記録が現時点で公開されておらず、四国電力が裁判所に開示することも拒否した結果、伊方原発の敷地での詳細なサイト増幅特性を評価することが現時点ではできないため、ここでは、伊方発電所の敷地における地盤が堅固であることを考慮し、周辺の強震観測点で評価されているサイト増幅特性の中でも最も小さいEHMH07地点でのサイト増幅特性(図の青線)を選定して用いることとしました。

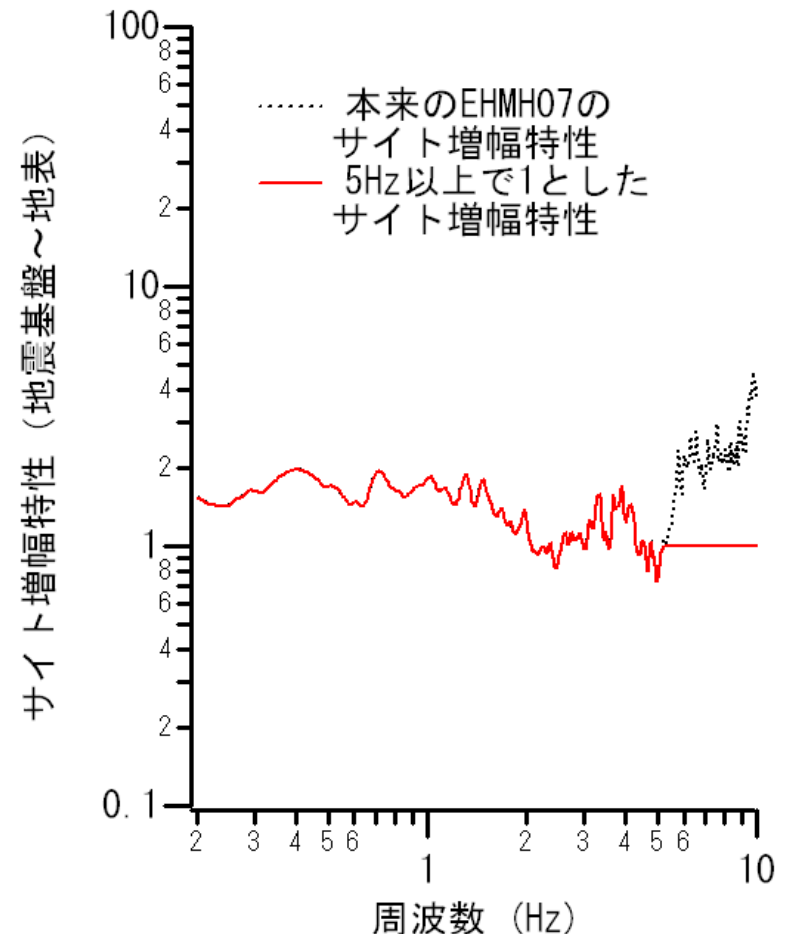


野津他(2007)

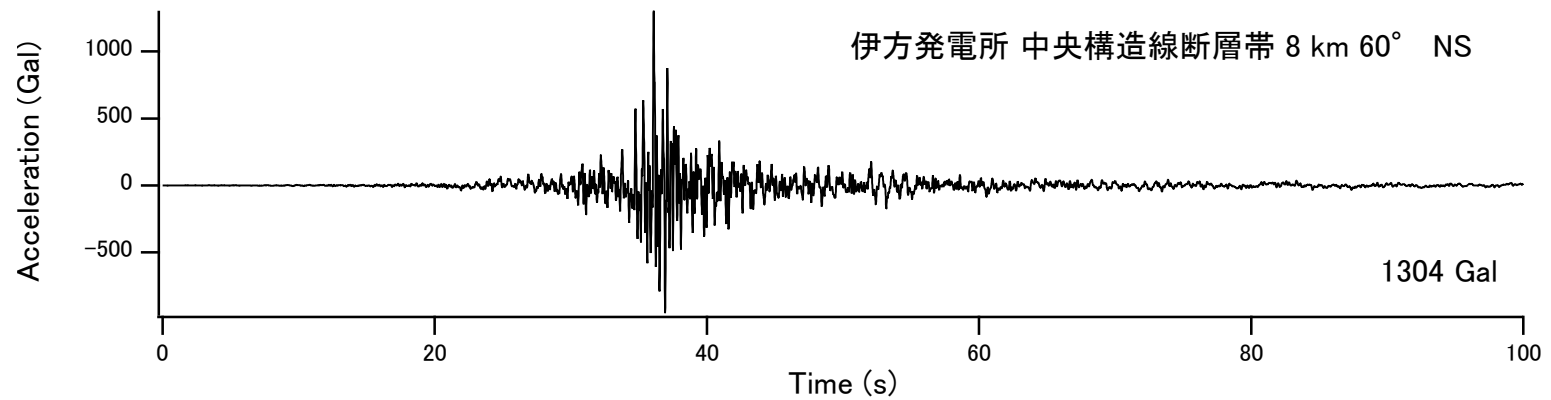
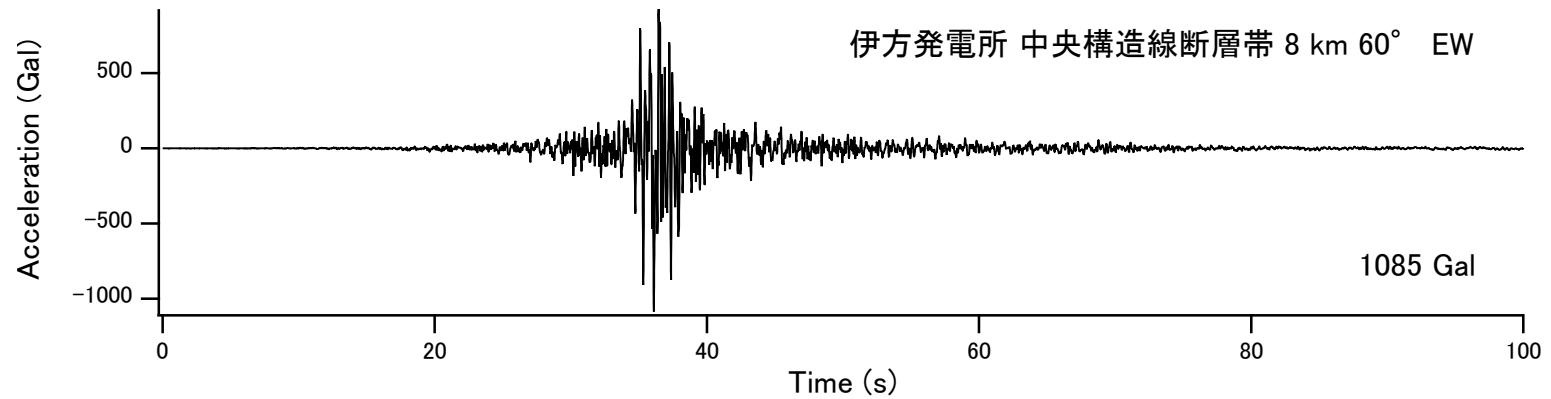
南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測

○そして、さらに、EHMH07地点でのサイト増幅特性が5～10Hzの高周波側において2～5倍程度増幅することに着目し、発電所の解放基盤においてはこの増幅は無いと考え、EHMH07のサイト増幅特性において5Hz以上の増幅している部分を強制的に1としたサイト増幅特性を人工的に作成し(図の赤線)、これを用いました。この点は、伊方原発の敷地での地震観測記録が公開され次第、現地のサイト増幅特性に差し替えたいと考えています。

○サイト位相特性としては、M4.4で記録の精度が良く、かつ直下で発生する地震の特性を反映している2002年4月6日の地震におけるEHMH07の記録を用いました。

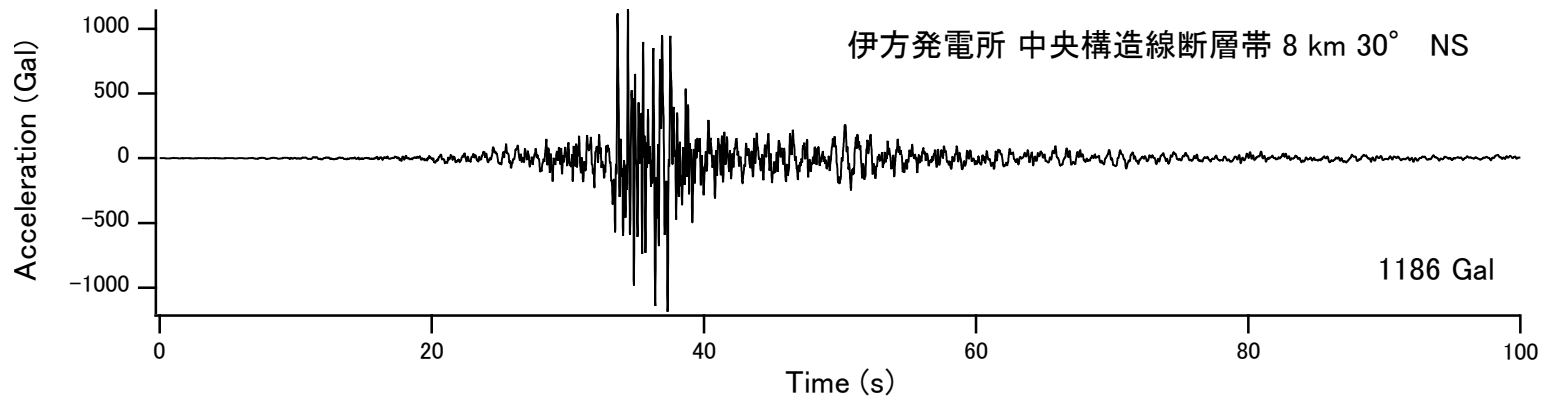
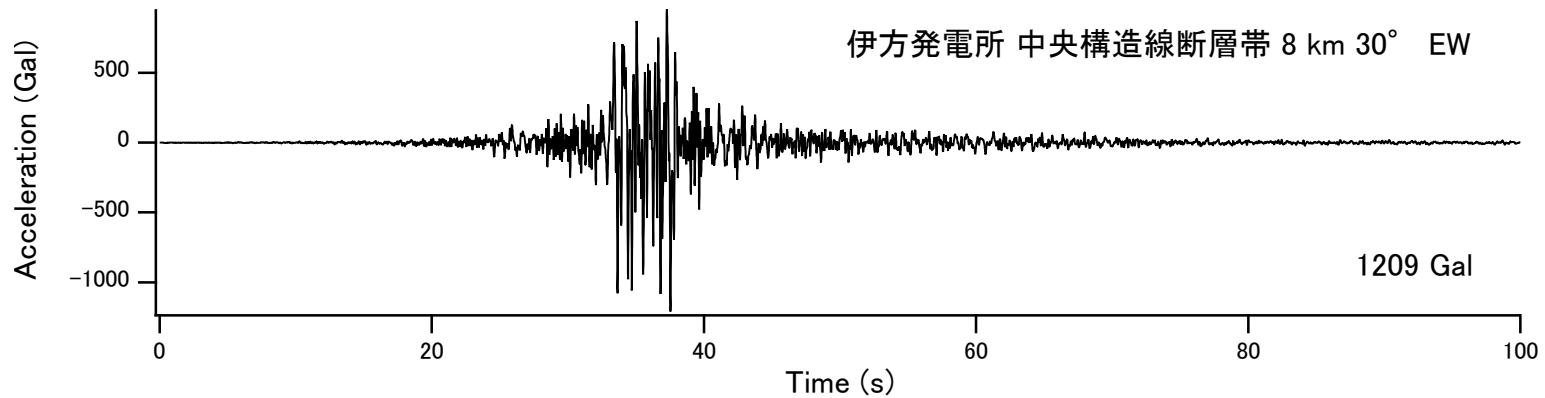


南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測



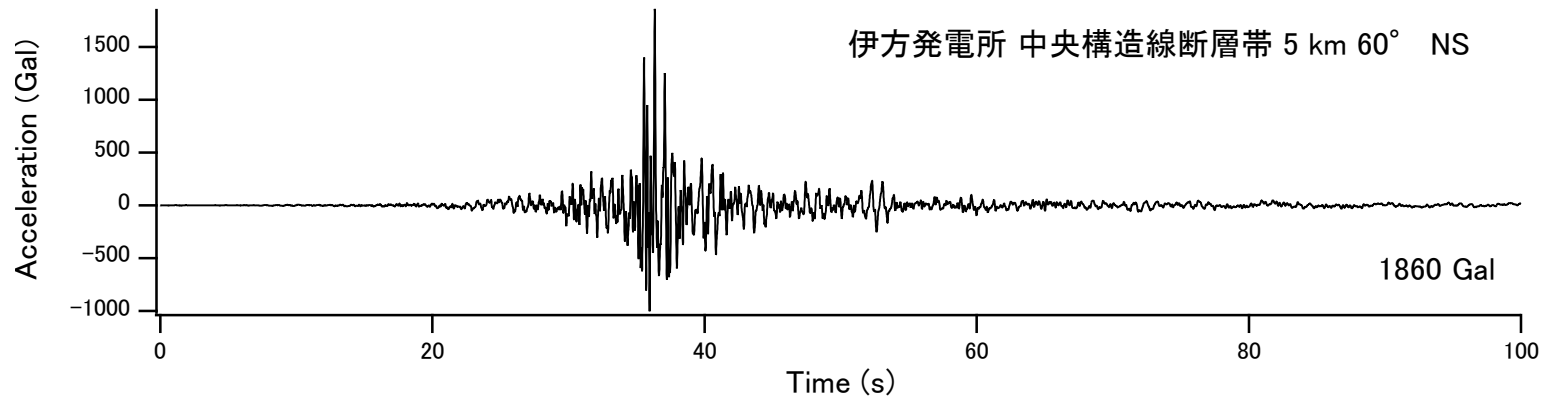
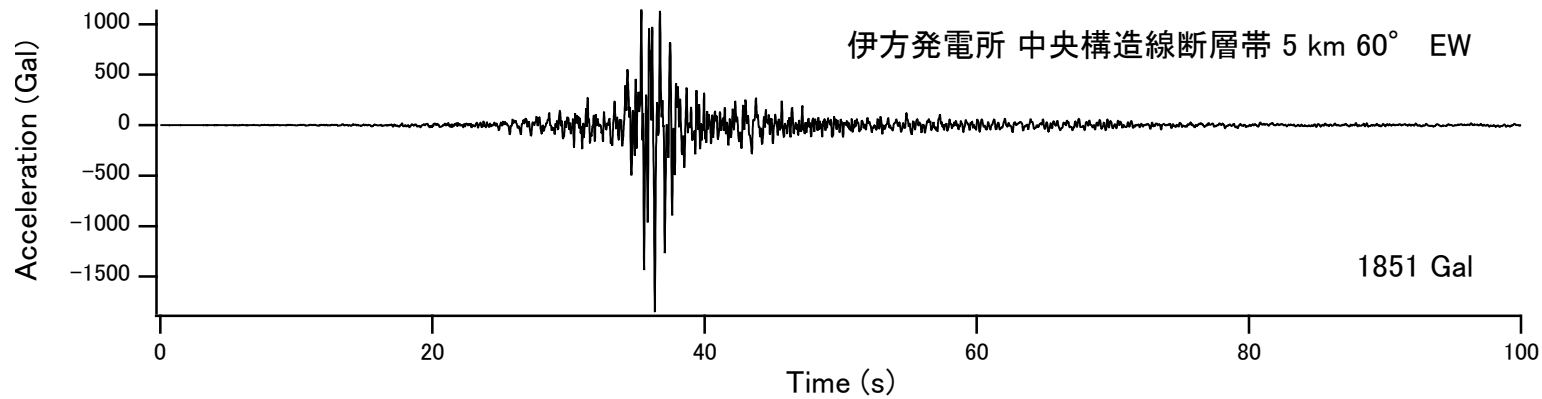
発電所と断層上端の水平距離が8kmで傾斜角が60度の場合

南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測



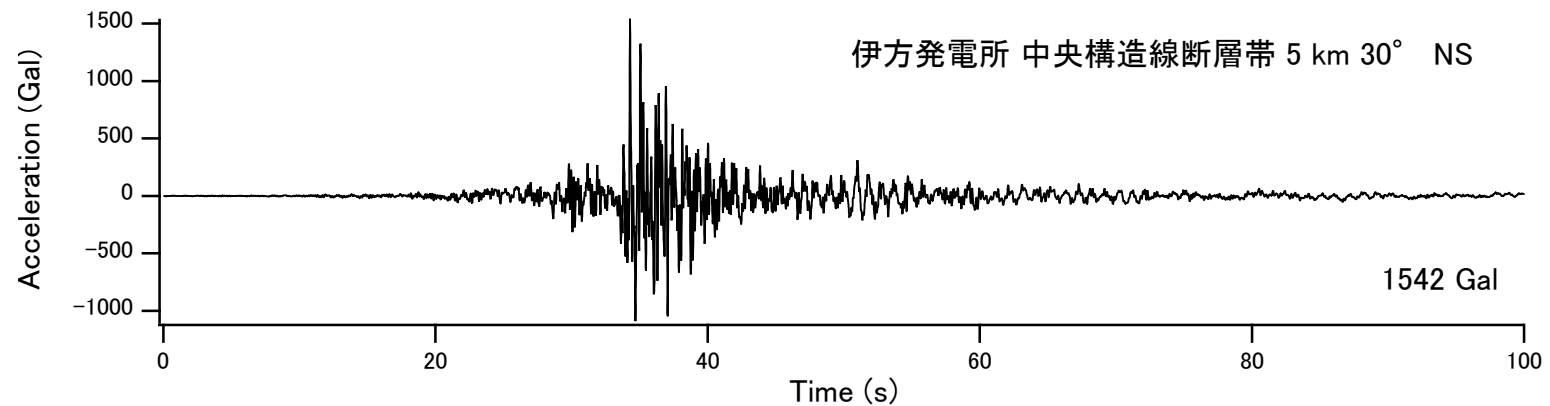
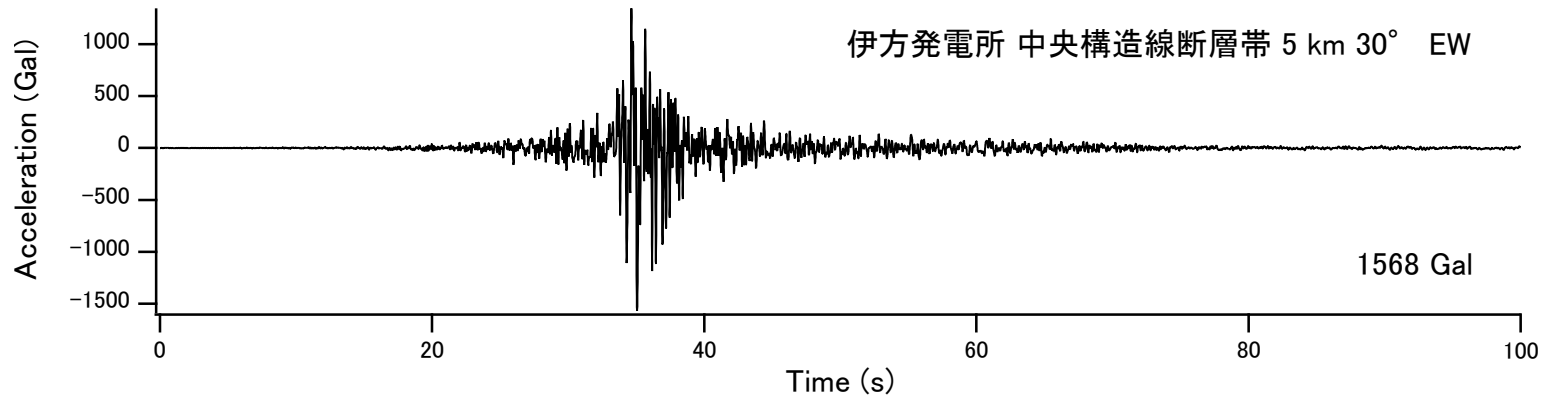
発電所と断層上端の水平距離が8kmで傾斜角が30度の場合

南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測



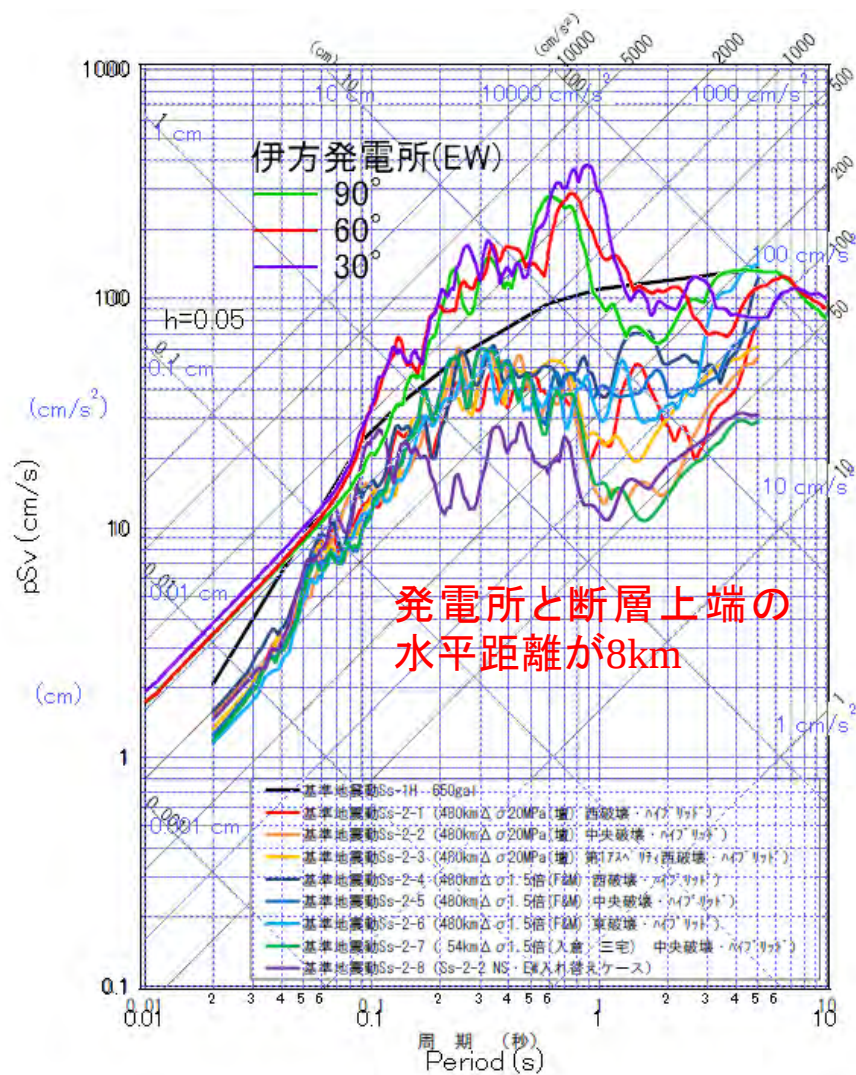
発電所と断層上端の水平距離が5kmで傾斜角が60度の場合

南傾斜の断層面を考慮した地震動の予測



発電所と断層上端の水平距離が5kmで傾斜角が30度の場合

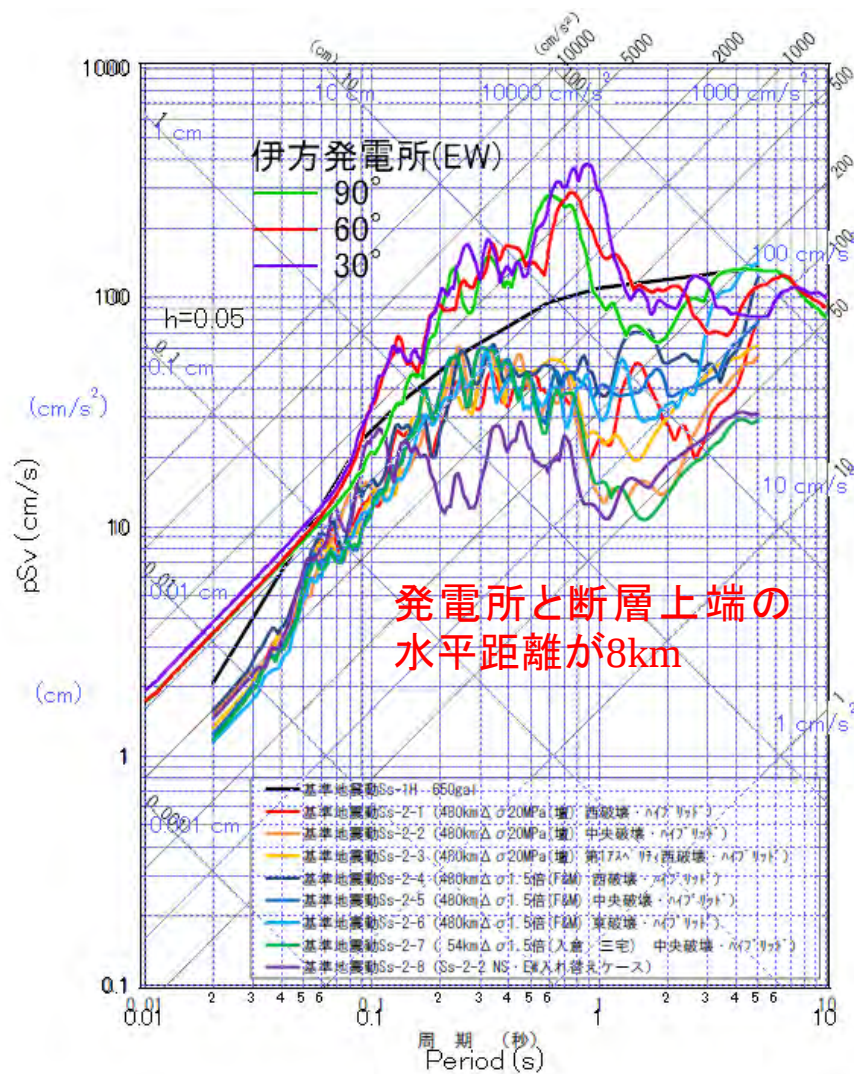
応答スペクトルの比較



EW方向

応答スペクトルに関して基準地震動との比較を行います。この比較はトリパタイト図を用いて行います。ここにトリパタイト図とは「絶対加速度応答スペクトル」「擬似速度応答スペクトル」「相対変位応答スペクトル」の三者を一枚の図に表示するものであり、縦軸の値を読むと擬似速度応答スペクトル、右上がりの目盛りを読むと絶対加速度応答スペクトル、左上がりの目盛りを読むと相対変位応答スペクトルとなります。原子力発電所の基準地震動の応答スペクトルはトリパタイト図で示すことが一般的であり、伊方発電所の基準地震動もトリパタイト図で示されています。

応答スペクトルの比較

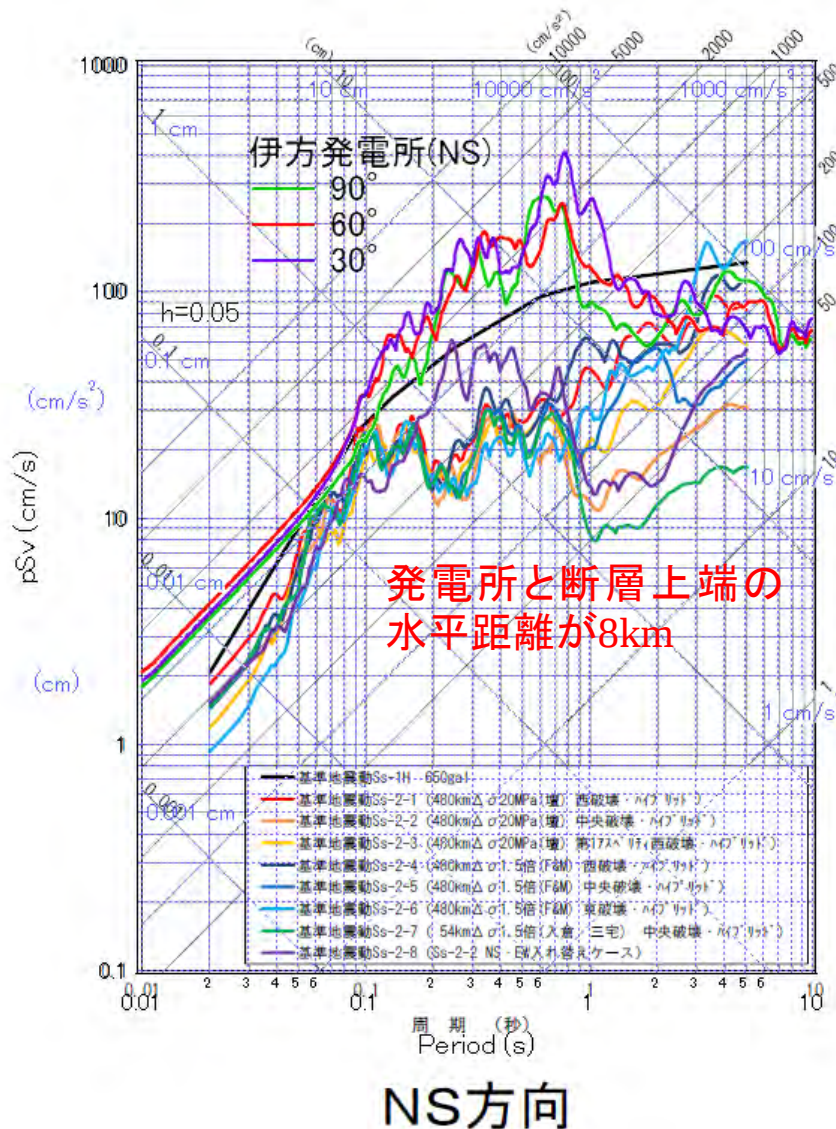


EW方向

○傾斜角が60度あるいは30度の場合は、少なくとも周期0.1～1秒の広い周期帯にわたり、基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。

○また傾斜角が90度の場合も広い周期帯にわたり基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。傾斜角が90度の場合に基準地震動が過小評価となっている原因は、伊方発電所での地震観測記録が裁判所に開示されれば当方で検討できます。

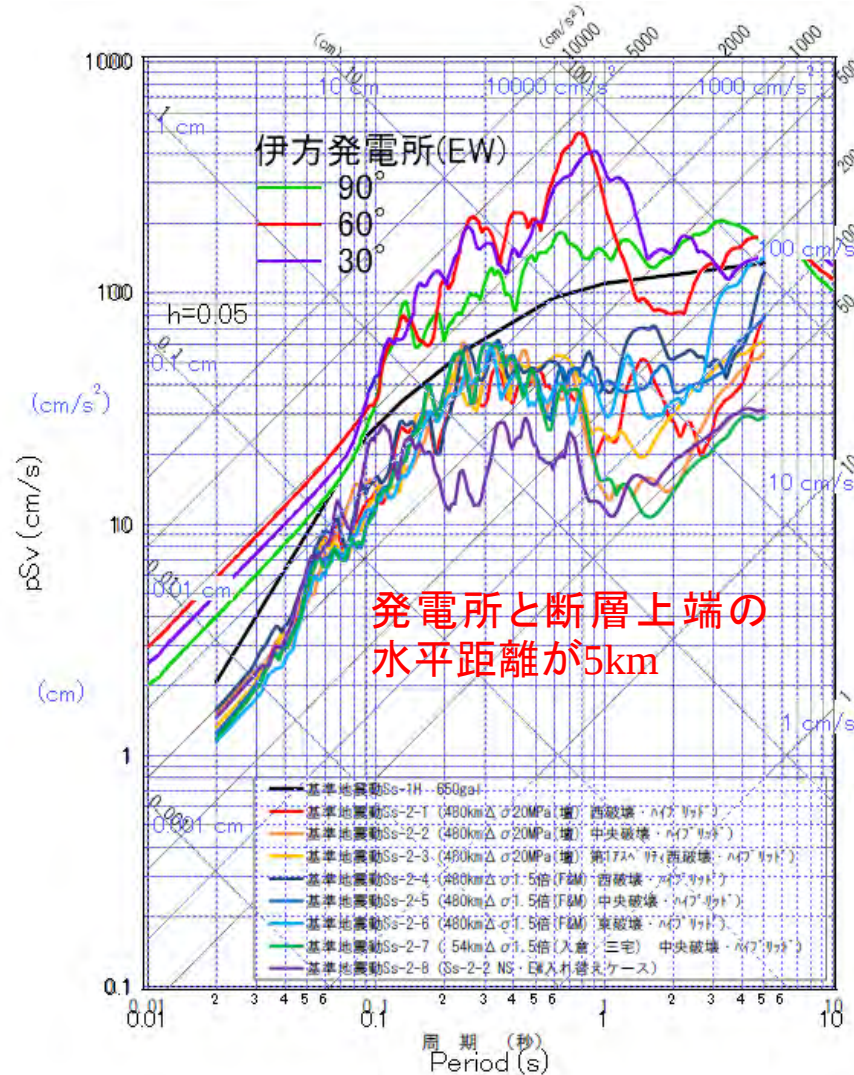
応答スペクトルの比較



○傾斜角が60度あるいは30度の場合は、少なくとも周期0.1～1秒の広い周期帯にわたり、基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。

○また傾斜角が90度の場合も広い周期帯にわたり基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。傾斜角が90度の場合に基準地震動が過小評価となっている原因は、伊方発電所での地震観測記録が裁判所に開示されれば当方で検討できます。

応答スペクトルの比較

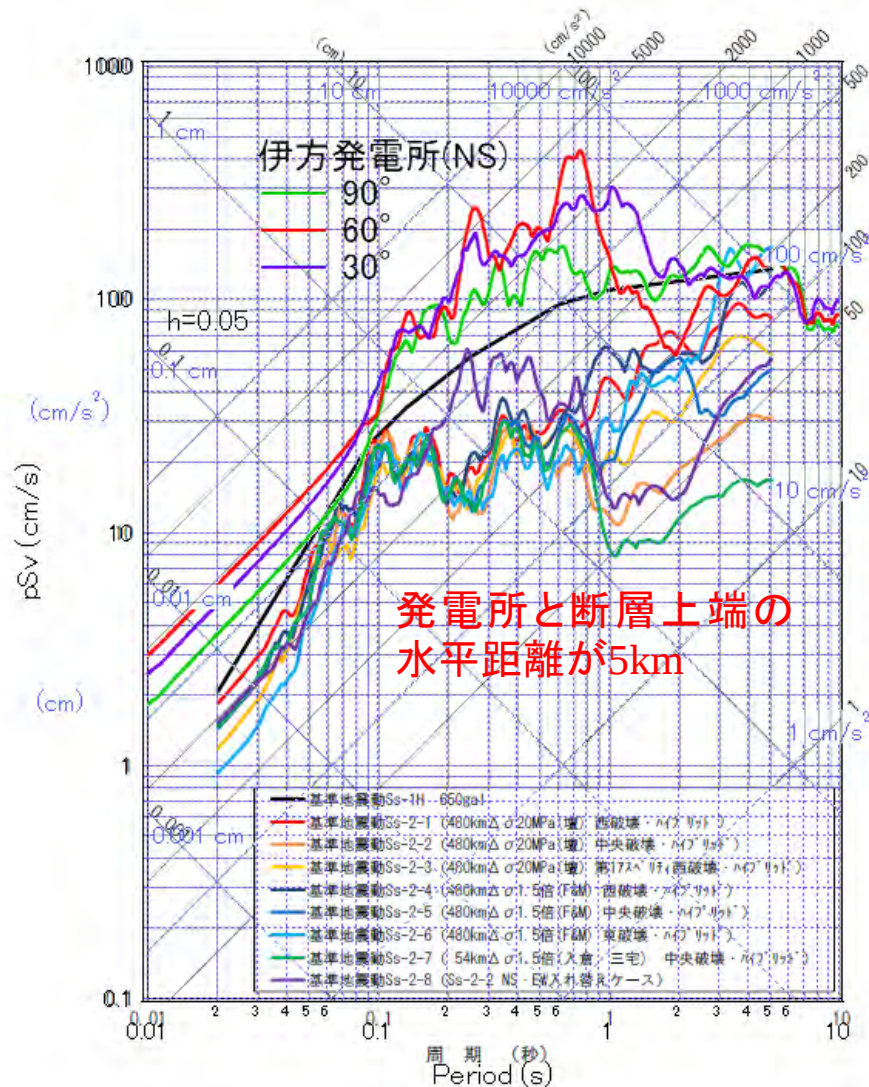


EW方向

○傾斜角が60度あるいは30度の場合は、少なくとも周期0.1～1秒の広い周期帯にわたり、基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。

○また傾斜角が90度の場合も広い周期帯にわたり基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。傾斜角が90度の場合に基準地震動が過小評価となっている原因は、伊方発電所での地震観測記録が裁判所に開示されれば当方で検討できます。

応答スペクトルの比較

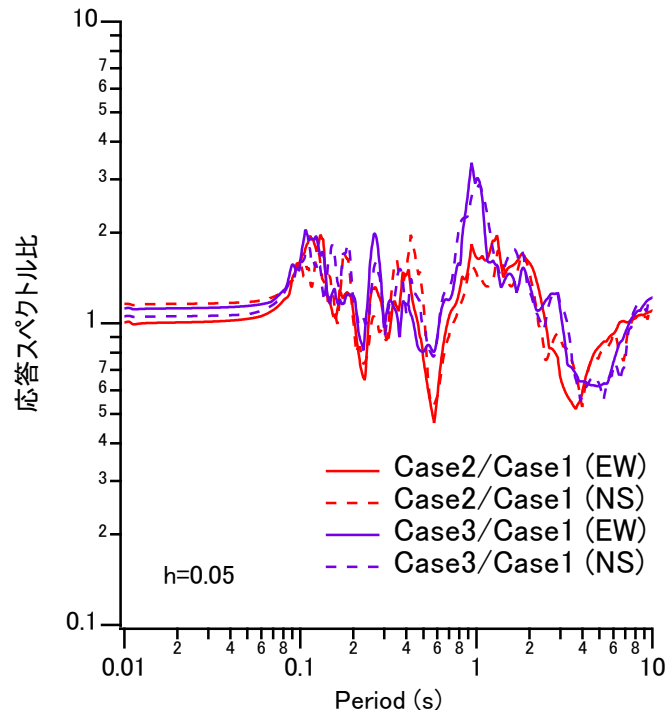


NS方向

○傾斜角が60度あるいは30度の場合は、少なくとも周期0.1～1秒の広い周期帯にわたり、基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。

○また傾斜角が90度の場合も広い周期帯にわたり基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。傾斜角が90度の場合に基準地震動が過小評価となっている原因は、伊方発電所での地震観測記録および四国電力が地震動の算定に利用したソースプログラムが裁判所に開示されれば当方で検討できます。

擬似速度応答スペクトルのケース間の比

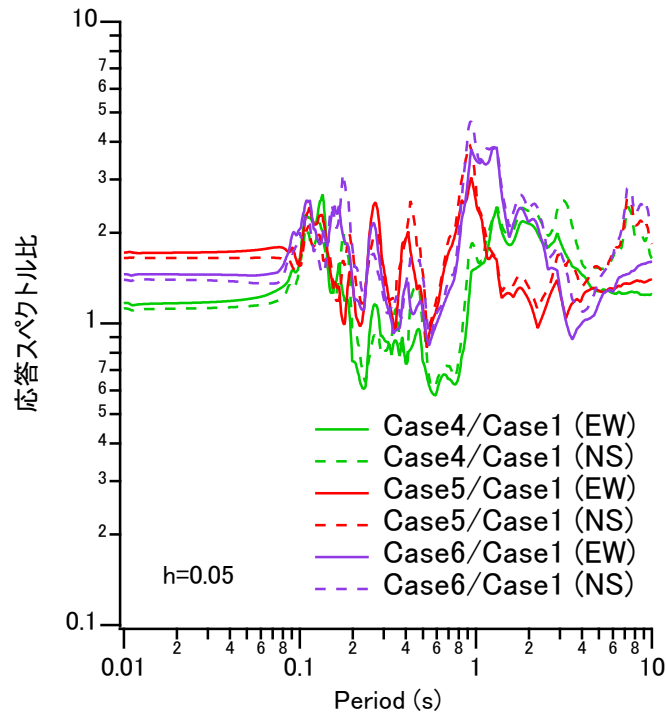


発電所と断層上端の
水平距離が8km

○ケースの応答スペクトルのCase1に対する比を図に示します(応答スペクトルの比は、絶対加速度応答スペクトル、擬似速度応答スペクトル、相対変位応答スペクトルに対して共通)。Case1は基準地震動の策定において考慮されているケースです。

○図を見ると、発電所と断層上端の水平距離が8kmで傾斜角が60度の場合はCase1に比べ周期によっては応答スペクトルが2倍程度となる場合もあり、発電所と断層上端の水平距離が8kmで傾斜角が30度の場合はCase1に比べ周期によっては応答スペクトルが3倍程度となる場合もあることがわかります。

擬似速度応答スペクトルのケース間の比



○発電所と断層上端の水平距離が5kmの場合は周期によっては地震動がさらに大きくなる場合もあります。

発電所と断層上端の
水平距離が5km

南傾斜に関する問題点のまとめ

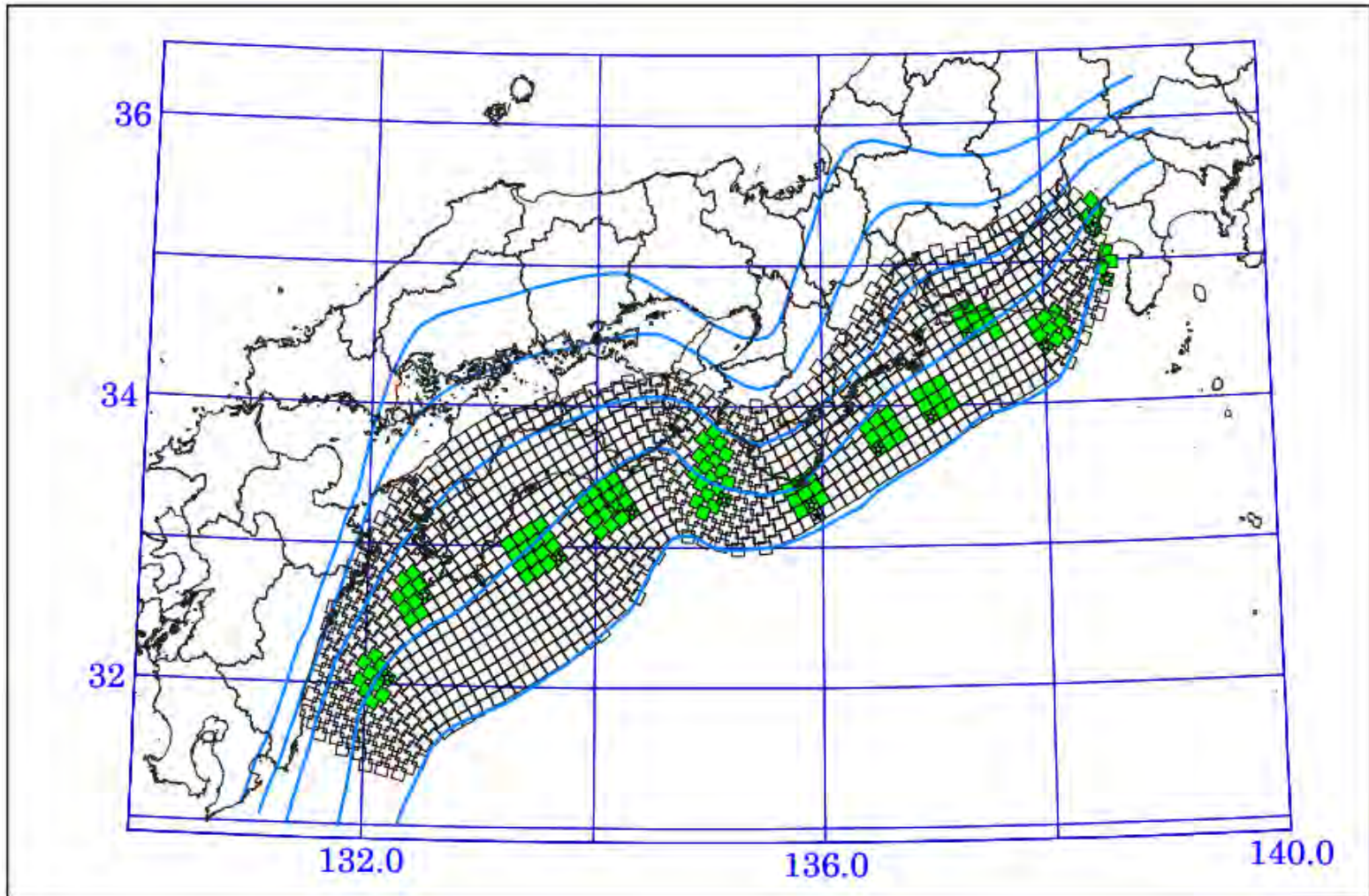
○四国地方の地殻はフィリピン海プレートの北西への移動に伴い常に北西に向かって押されています。この「押す力」は南海トラフ地震の発生サイクルに伴い強弱を繰り返すと考えられますが、中央構造線活断層帯で大地震が起こるのは北西向きの力が強いときである可能性が高く、そのときには逆断層成分を含む地震が南傾斜の断層面で起きると考えることが自然です。

○南傾斜の断層面で地震が起きれば、より発電所に近いところで地震が発生することになり、ここまで見てきたように、基準地震動より大きな地震動が発電所に作用すると考えられます。また、傾斜角が90度の場合の基準地震動も、本来より過小評価となっていると考えられます。

○現在、次の南海トラフ地震の発生に向かい、四国地方の地殻の北西への移動が進んでいる状況であり、このような地震の発生の可能性は高まっている可能性があり、基準地震動より大きな地震動が伊方発電所に作用した場合の危険を指摘せざるを得ません。

1. 内陸地殻内地震に関する地震動評価の問題点
2. 南傾斜の断層を考慮していないことの問題点
3. プレート間地震に関する地震動評価の問題点

伊方発電所のわずか41kmほど直下には、M9クラスのプレート間地震である南海トラフ巨大地震の想定震源域があります。



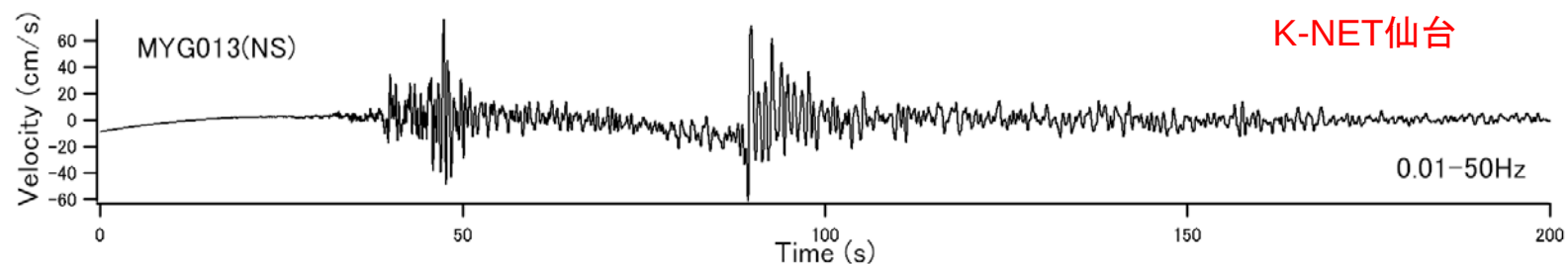
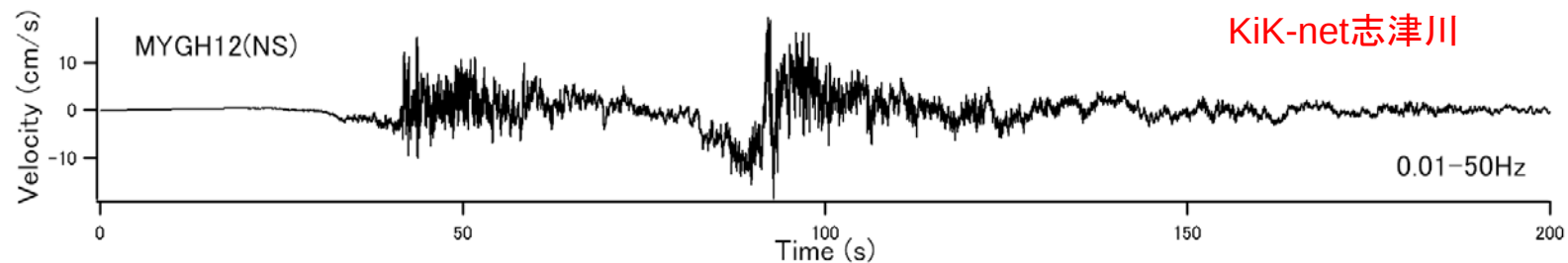
伊方発電所のわずか41kmほど直下には、M9クラスのプレート間地震である南海トラフ巨大地震の想定震源域があります。

M9クラスのプレート間地震で、強震記録がきちんと残されているのは、世界的に見ても2011年東北地方太平洋沖地震しかありません。したがって、M9クラスのプレート間地震に対する強震動評価を行うにあたり、まずは東北地方太平洋沖地震の経験から十分に学ぶ必要がありますが、四国電力による強震動評価は東北地方太平洋沖地震の経験から十分に学んでいないという問題点があります。

東北地方太平洋沖地震では、福島第一原子力発電所および女川原子力発電所において、当時の基準地震動を上回る地震動が観測されました。断層面上でどのように強震動が生成され、その結果としてどのように基準地震動を上回る地震動となったのかの分析が必要ですが、四国電力による強震動評価はそのような分析を踏まえていないという問題点があります。

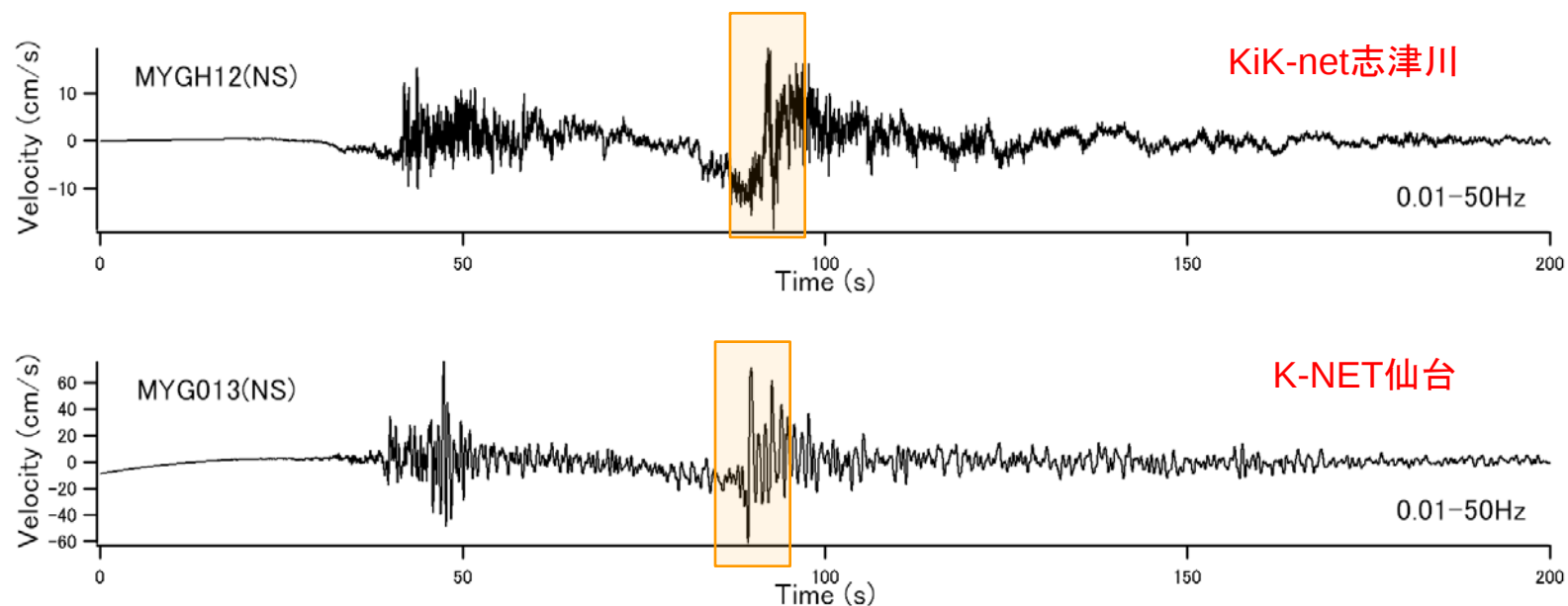
以下、プレート間地震に対する強震動評価に関して、東北地方太平洋沖地震の経験から引き出される教訓について述べます。

東北地方太平洋沖地震の際に観測された強いパルス状の地震波



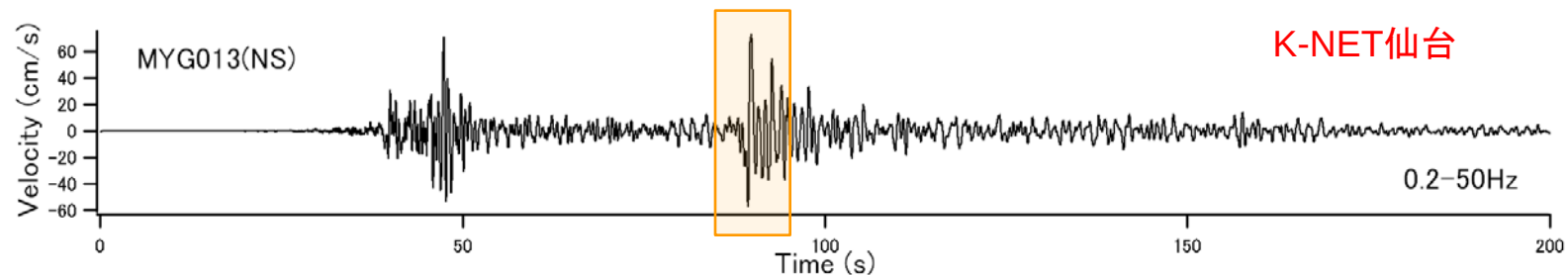
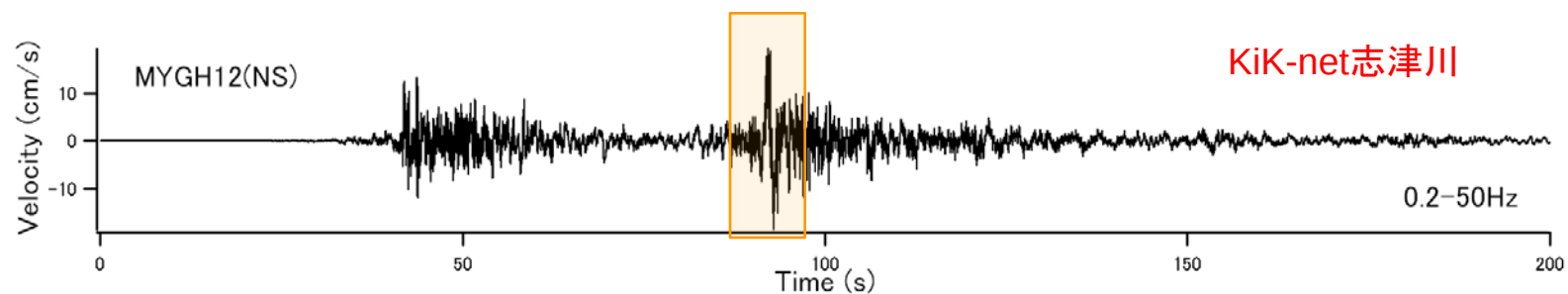
周期0.02-100 秒 の広帯域地震動

東北地方太平洋沖地震の際に観測された強いパルス状の地震波



周期0.02-100 秒 の広帯域地震動

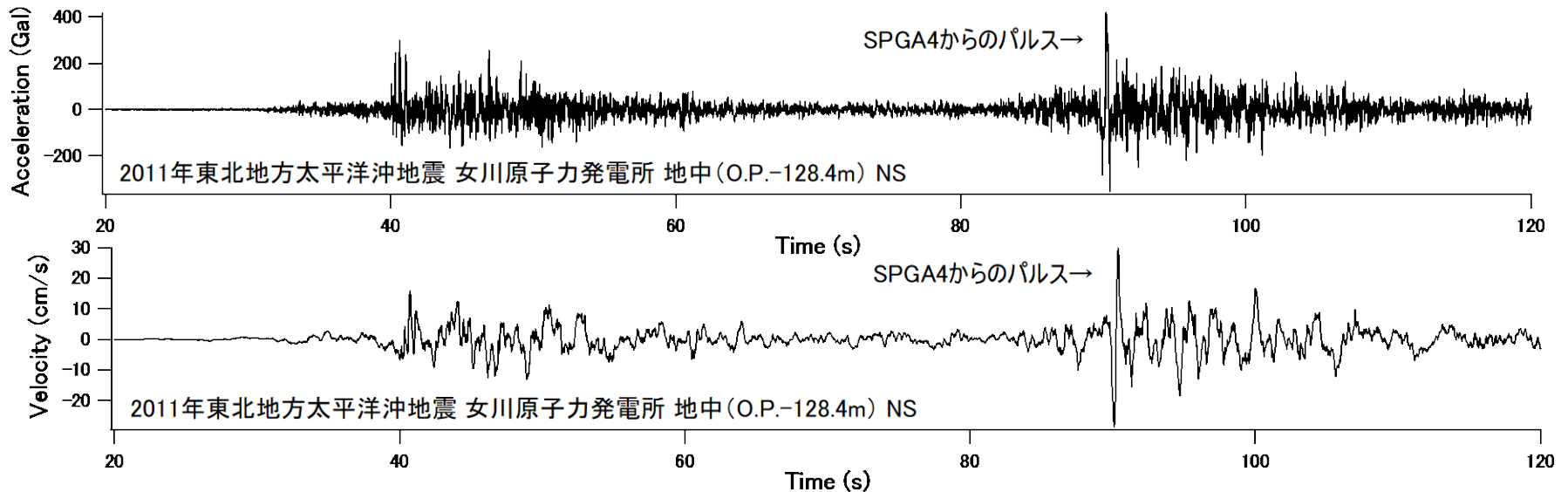
東北地方太平洋沖地震の際に観測された強いパルス状の地震波



周期5秒以上をカット

女川原子力発電所で観測された波形を見ても、二回目の揺れの先頭付近に強いパルス状の地震波が到来しており、そのときに加速度波形、速度波形とも最大値を示している。

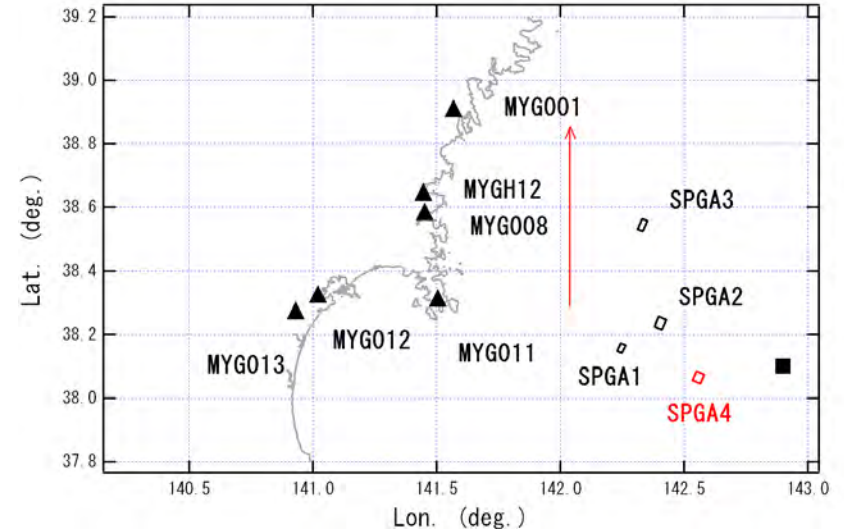
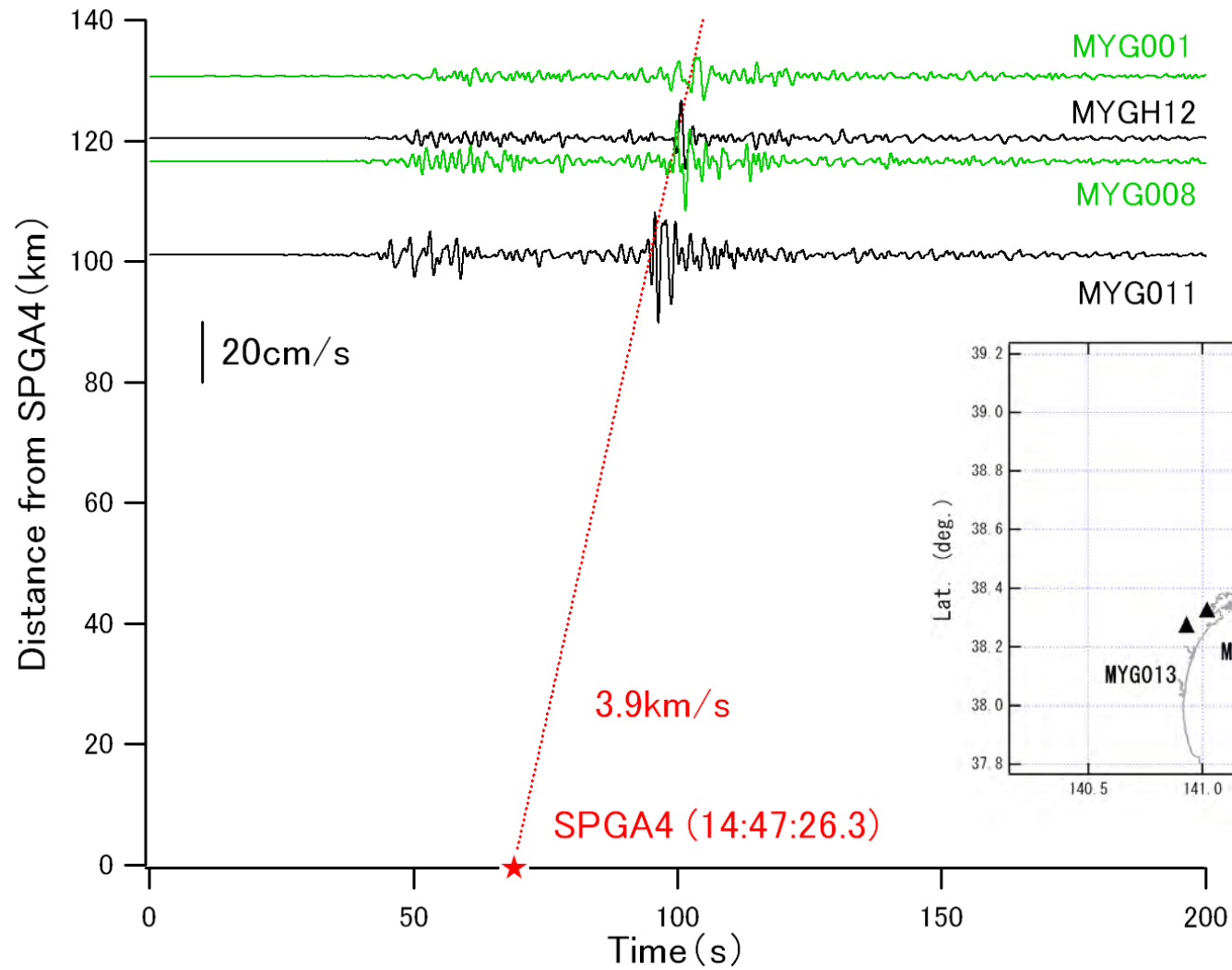
すなわち、二回目の揺れの先頭付近の強いパルス状の地震波が、基準地震動を超える地震動となった原因である。



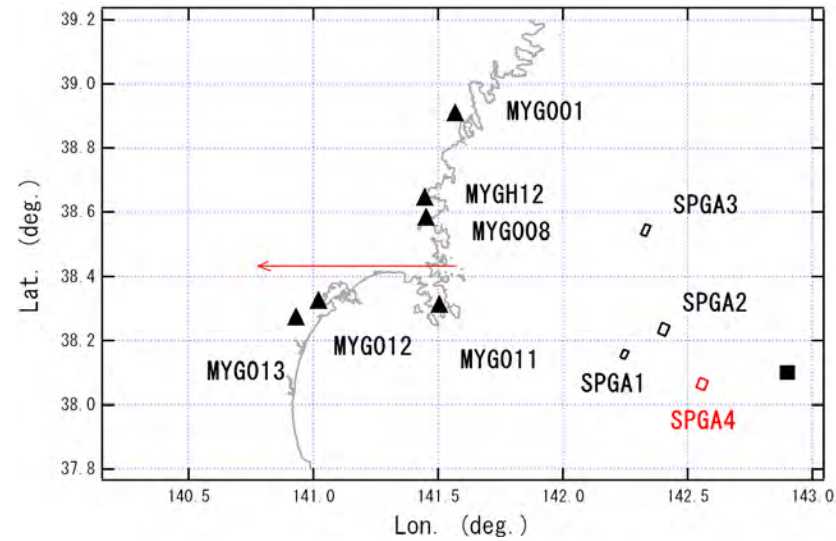
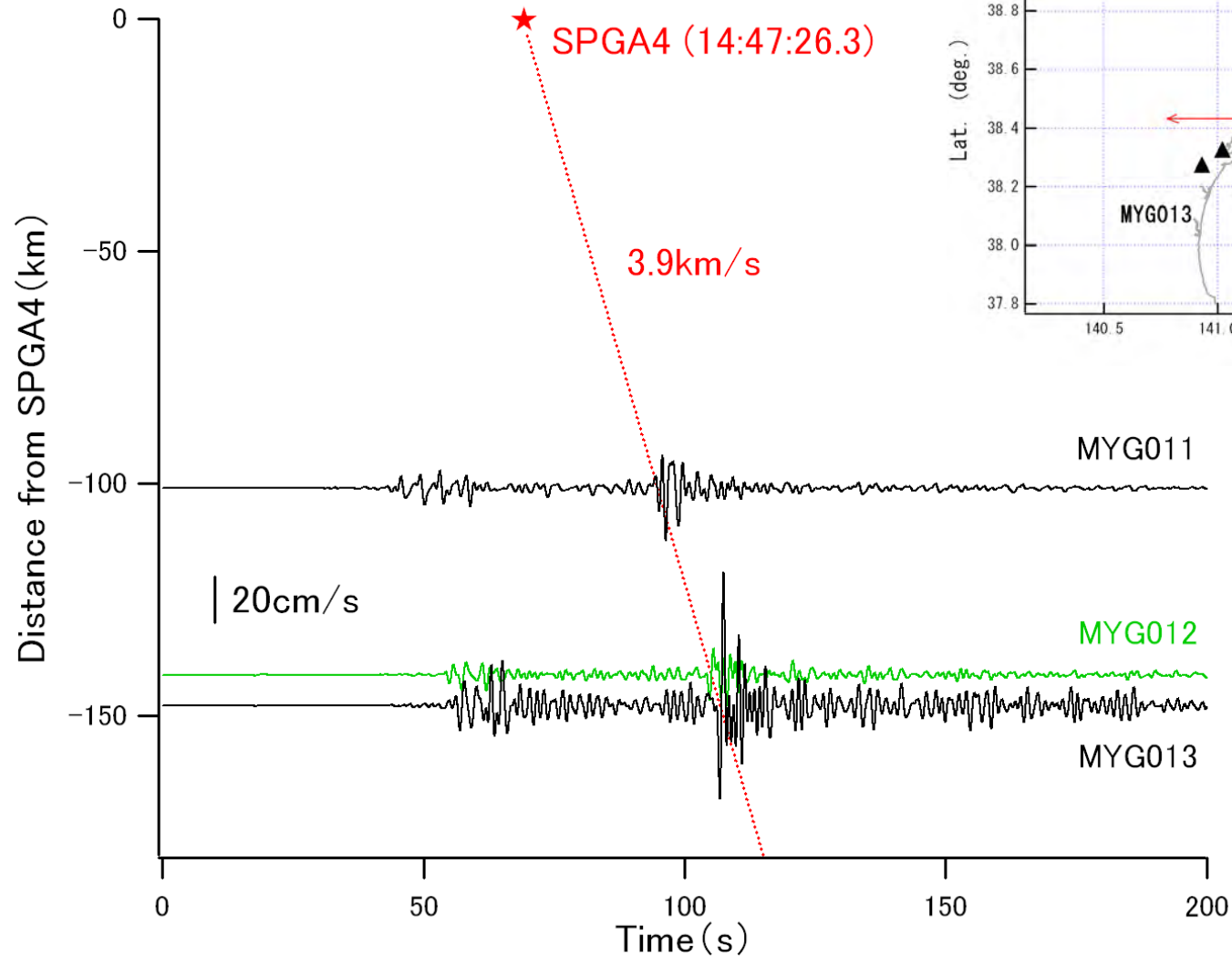
それでは、この波はどこから来たのか？

パルス状の地震波はどこから来たのか？

SPGA4から北への強震動パルスの伝播



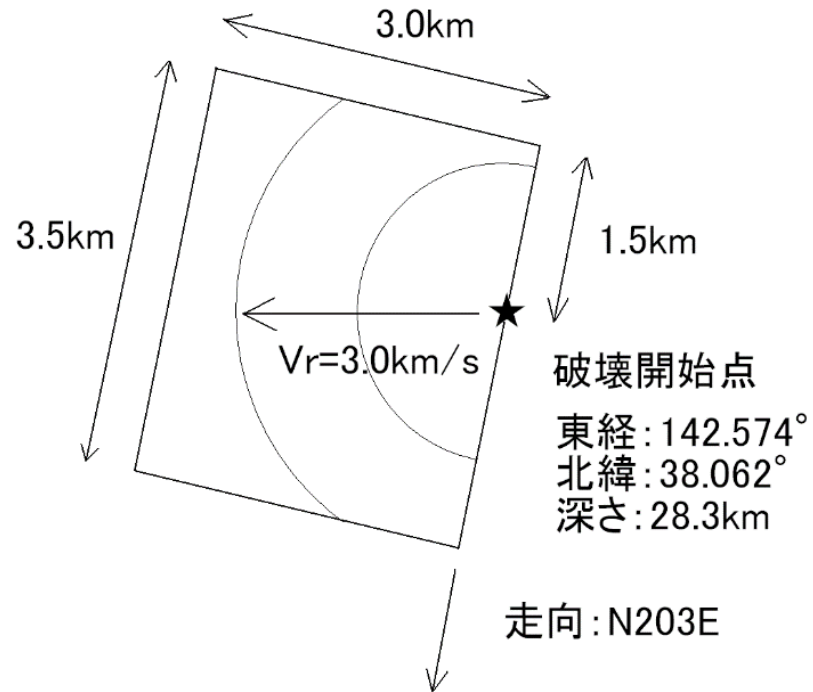
SPGA4から西への強震動パルスの伝播



パルスの発生源はどの程度の空間的広がりを有していたのか？

パルスの生成に寄与する部分(SPGA)は一定の時間地震波を出し続けるが、地震波が観測点に最初に到来してから最後に到来するまでの時間差がパルスの時間軸上の幅を決める。これには、

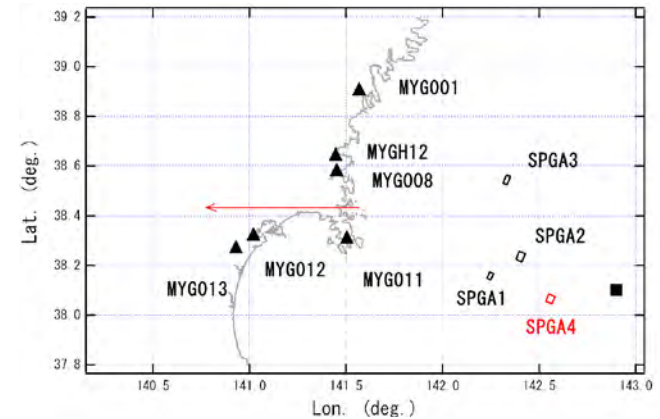
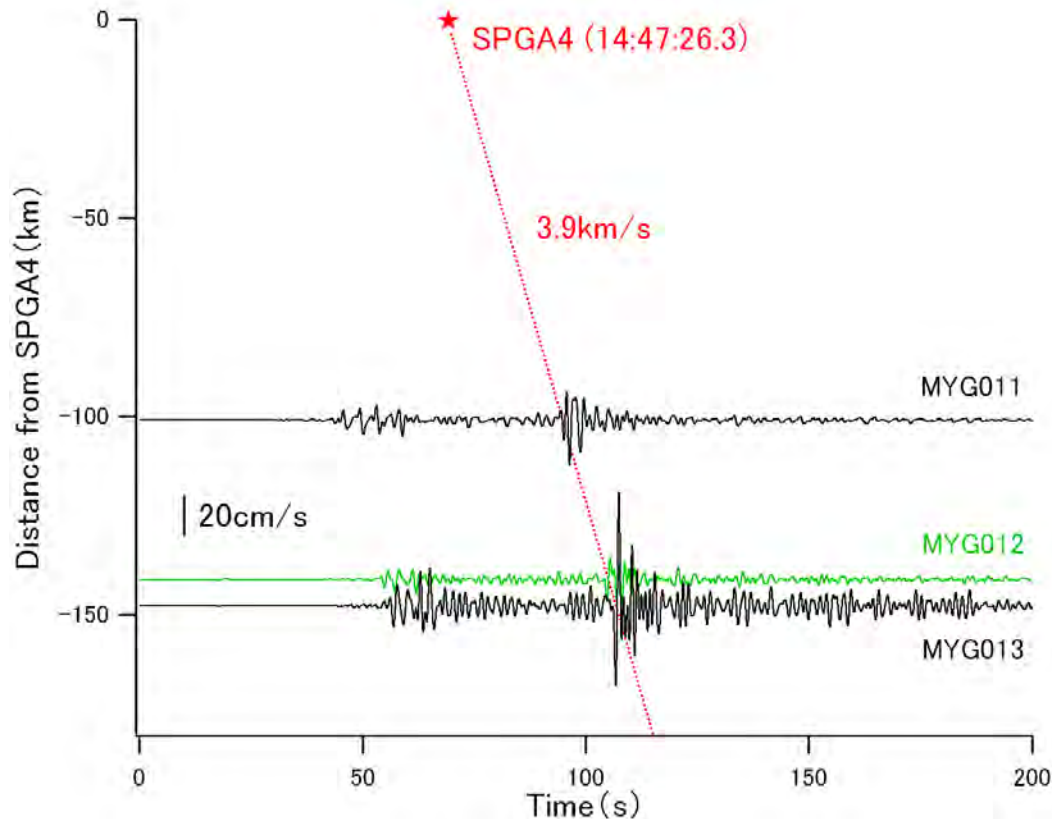
- ・SPGA上を破壊が伝播するのに要する時間
 - ・SPGAにおけるライズタイム
 - ・観測点の方位
- などが関係する。



SPGA4の空間的広がり(野津, 2015)

パルス波に関する結論

仙台市から見て150kmほど沖合のたかだか数km程度の領域で、14時47分26秒ごろ(最初の小さな破壊の発生から68秒後)に強い破壊が生じ、これが第二波群先頭のパルス波をもたらした。

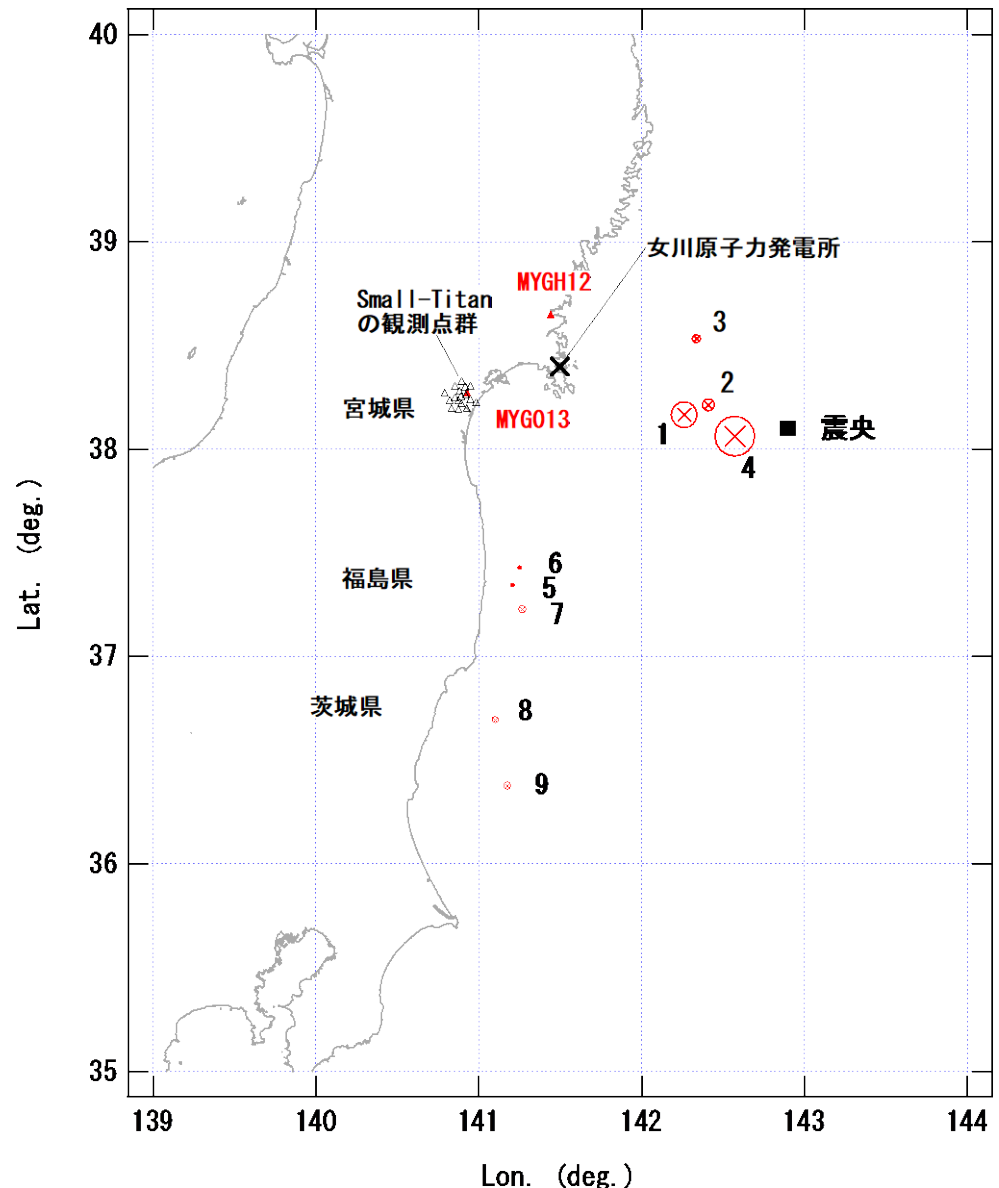


パルス波の工学的意義: **東北
地方太平洋沖地震の際に観
測された強震動は不幸中の
幸いであった**

○第二波群先頭のパルス波を励起した場所(SPGA4)は、震央より西側であったとは言え、仙台市から見ても150kmも沖合であった。

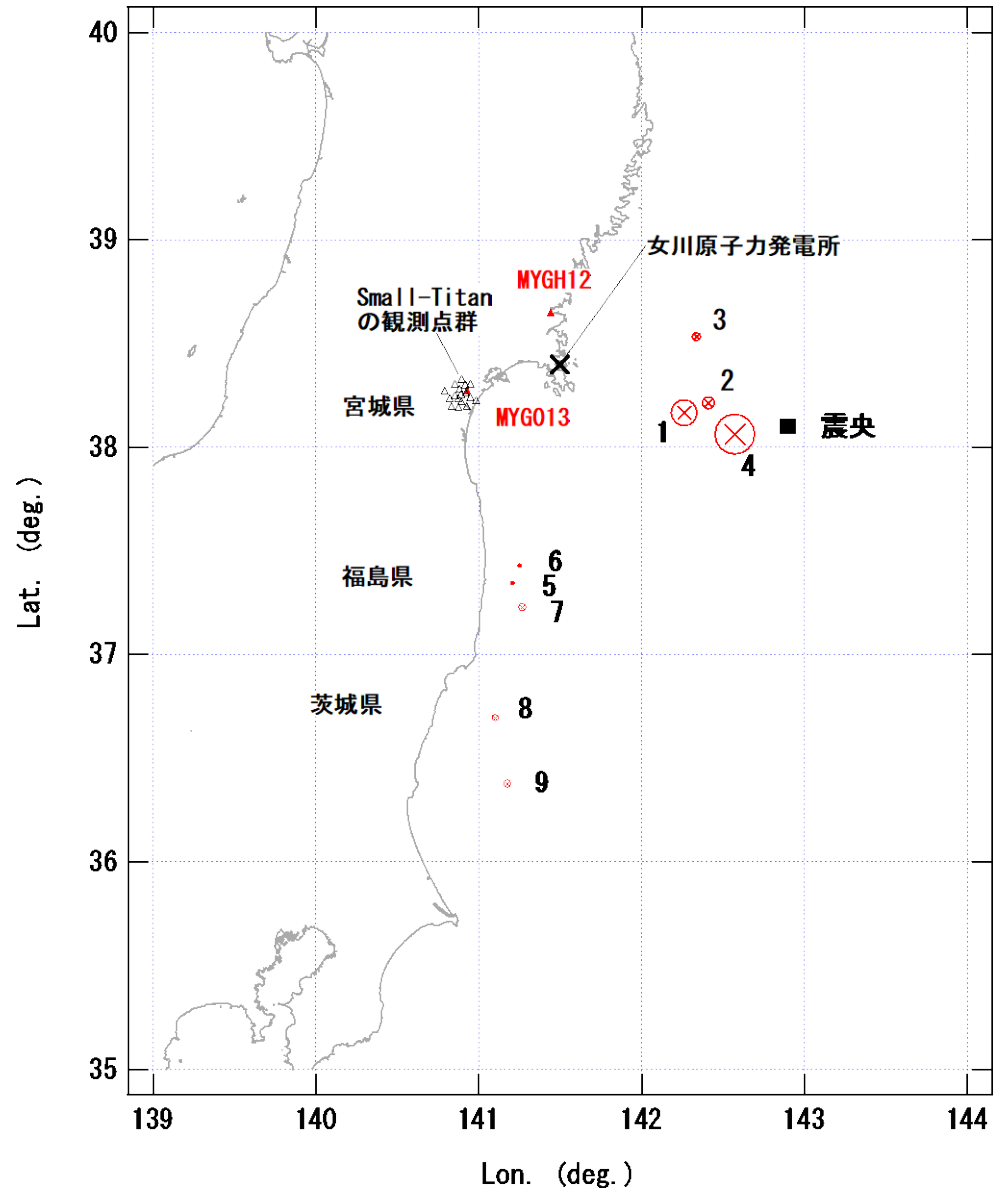
○それにも関わらず、第二波群先頭のパルス波は、地盤条件によっては100 cm/sを越えていた。

○すなわち、SPGA4の破壊は、150km離れた場所に100 cm/sを超える揺れをもたらすほど強い破壊であったと言える。



○同様の強い破壊がより陸域に近いところで生じなかったことは不幸中の幸いであった。

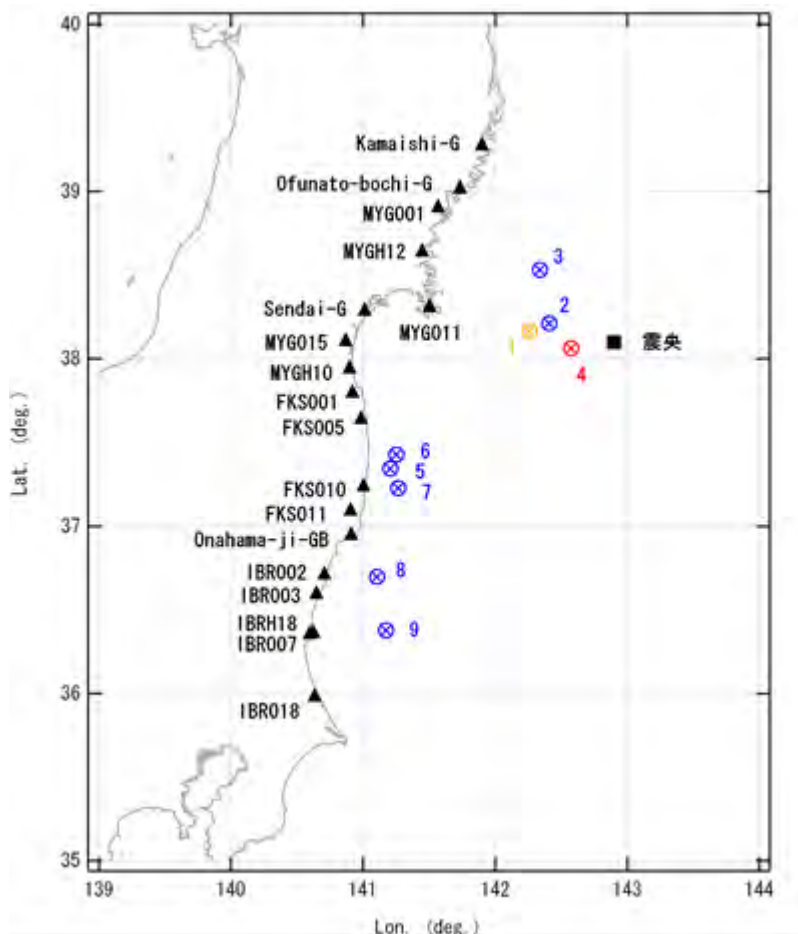
○今後のプレート間地震で、同様の強い破壊がより陸域に近いところで生じれば、たとえ地盤条件の良いところでも極めて強い地震波となり、構造物に被害をもたらす恐れがあるので、このことに警戒する必要がある。



SPGAモデル

2011年東北地方太平洋沖地震を対象とするSPGAモデル

SPGAのパラメータ



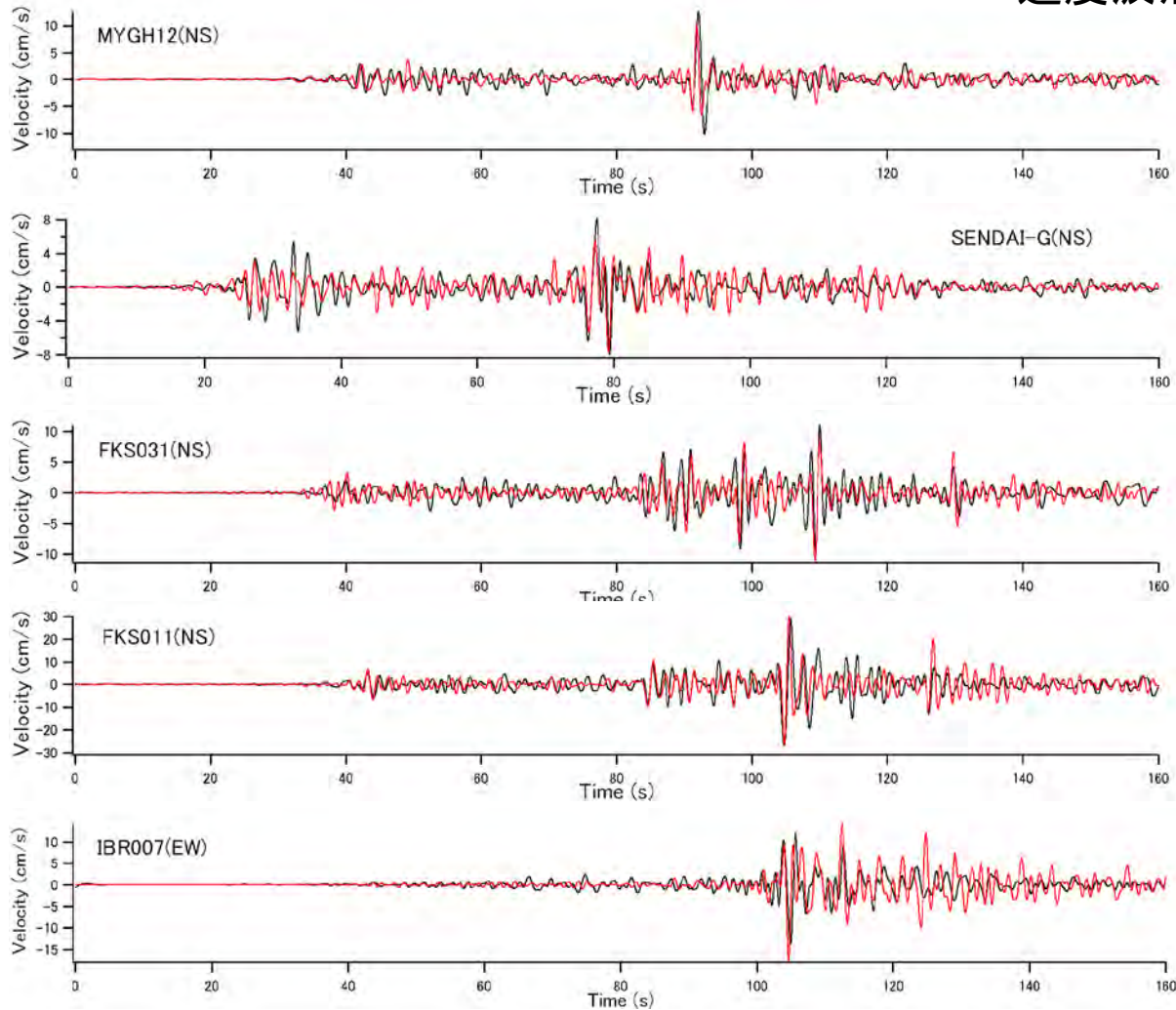
SPGA : 強震動パルス生成域

	L	W	M_{0SPGA}	A_{SPGA}
	km	km	Nm	Nm/s ²
SPGA1	3	2	8.00E+18	3.49E+20
SPGA2	4	3	8.00E+18	1.74E+20
SPGA3	4	2	4.00E+18	1.31E+20
SPGA4	3.5	3	2.10E+19	5.23E+20
SPGA5	3	4	3.00E+18	6.54E+19
SPGA6	3	4	3.00E+18	6.54E+19
SPGA7	6	2	5.00E+18	1.09E+20
SPGA8	8	3	9.00E+18	9.81E+19
SPGA9	7	7	2.00E+19	1.07E+20

サイズの推定結果は破壊伝播速度の仮定に依存する可能性がある。

2011年東北地方太平洋沖地震を対象とするSPGAモデル

速度波形(周期1-5秒)



波形の計算には修正経験的グリーン関数法(古和田他, 1998; 野津他, 2009)を用いている.

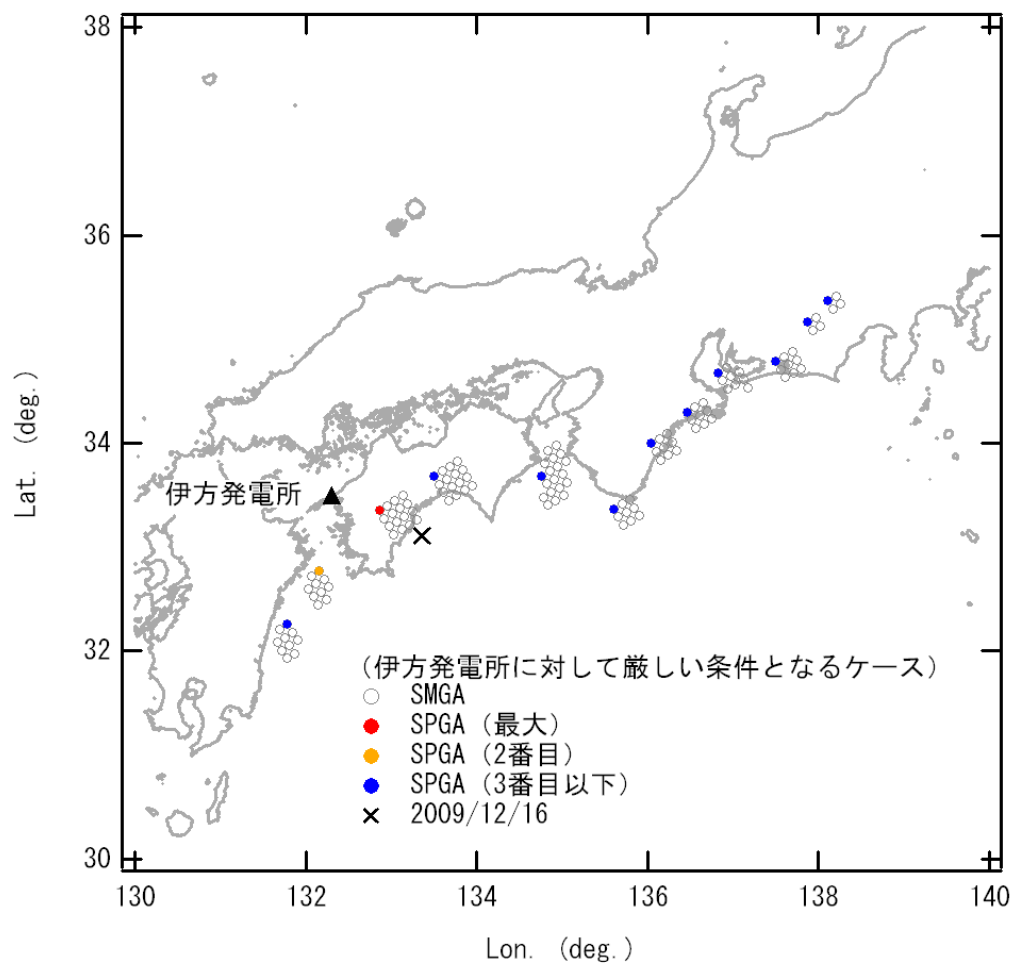
伊方発電所での地震動の予測

伊方発電所からプレート上面までの深さはわずか約41kmである(四国電力株式会社(2015b)のp.9).

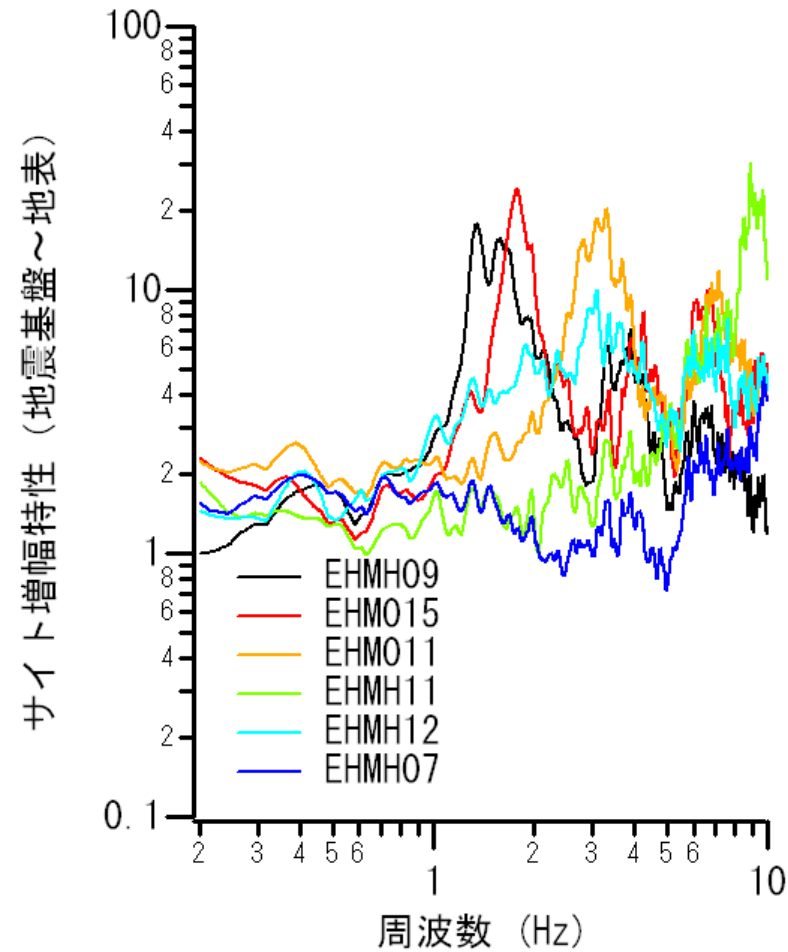
東北地方太平洋沖地震で第二波群先頭のパルス波をもたらしたような強い破壊が原子力発電所からわずか41kmの場所で起こり, 原子力発電所に強い地震動をもたらす恐れもあるので, この点について検討を行った.

なお, ここで行っている計算は, 私が現時点で利用可能な情報のみに基づいていますが, 四国電力から敷地における地震観測データや地盤データの提供があれば, より現地に即した計算を同様の方法で実施する用意があります.

地震動評価に用いたSPGAの位置

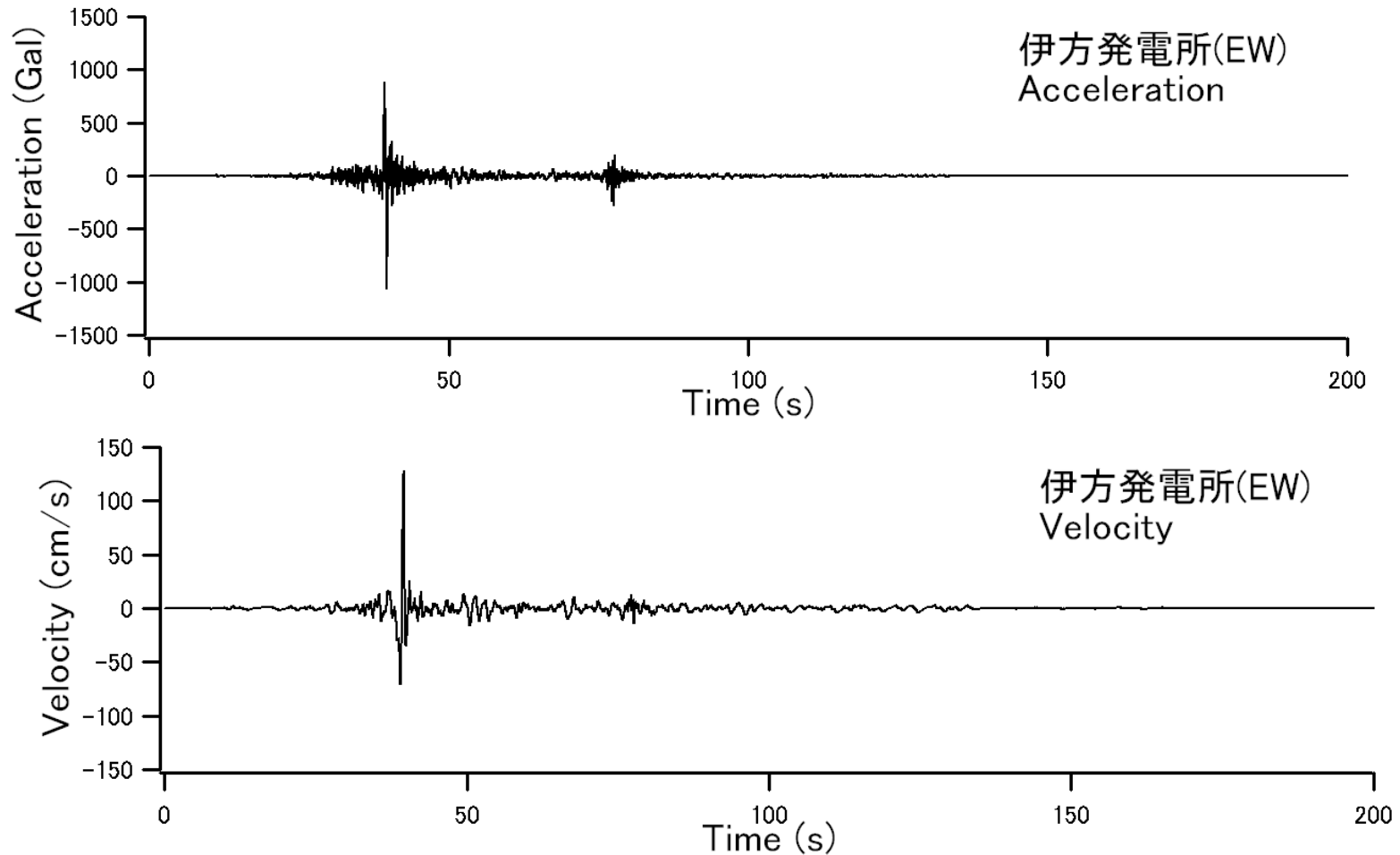


地震動評価に用いたEHMH07の経験的サイト増幅特性



野津他(2007)

地震動評価結果

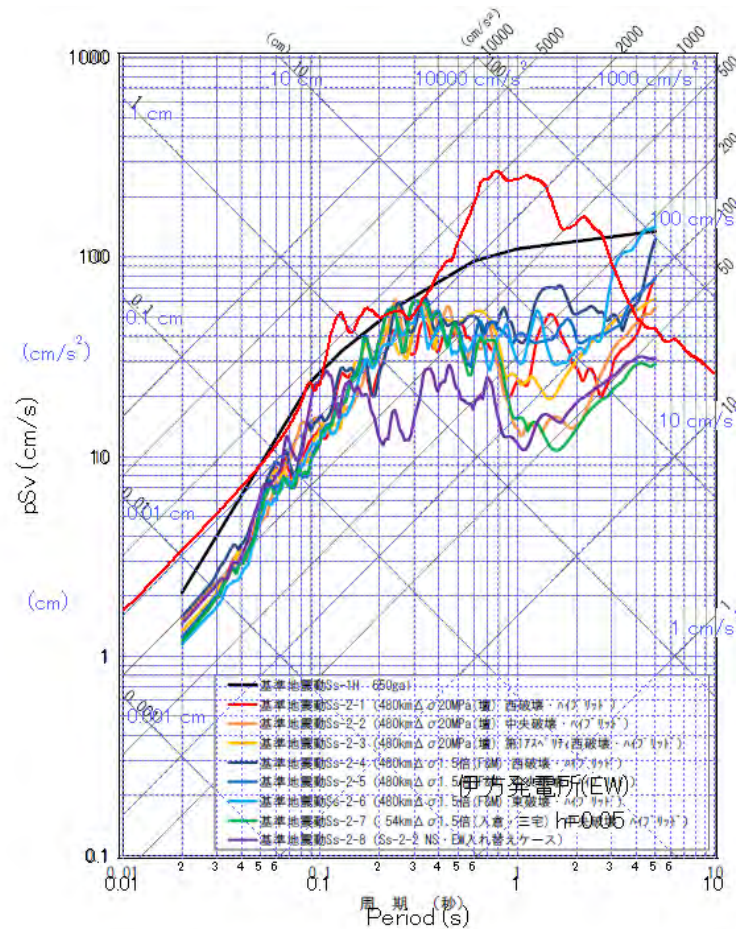


最大加速度は約1066Gal、最大速度は約129cm/s

(四国電力によるプレート間地震の最大加速度は181Gal)

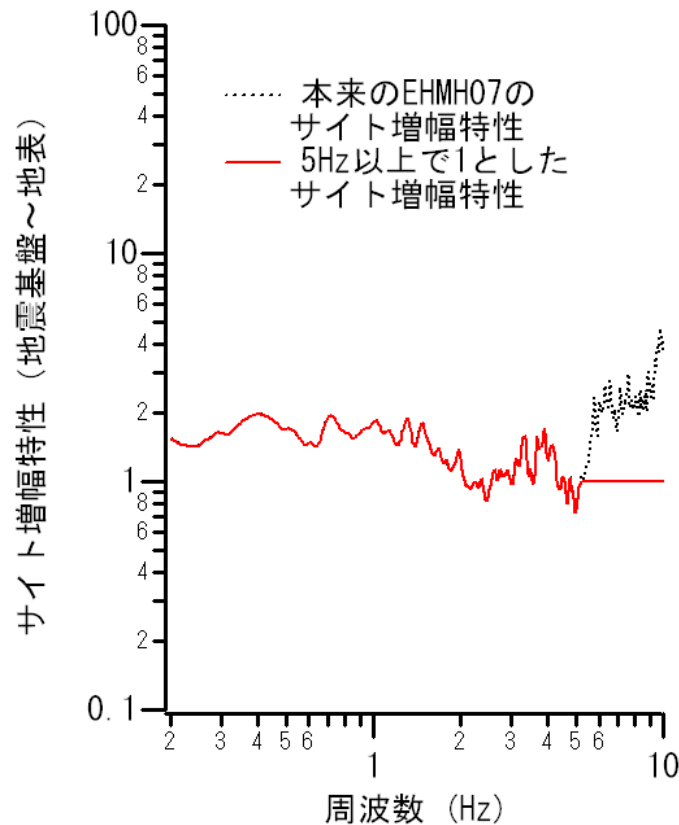
地震動評価結果

(四国電力株式会社(2015b)のp.121に加筆)



EW方向

本来のEHMH07のサイト増幅特性と 5Hz以上で1としたサイト増幅特性



EHMH07のサイト増幅特性において、5Hz以上の増幅している部分を強制的に1としても、最大加速度は約878Galで18%しか小さくならず、最大速度は約128cm/sでほとんど変わらない。この場合も現在設定されている基準地震動を上回る地震動となる。

プレート間地震に関する地震動評価の問題点のまとめ

○東北地方太平洋沖地震の地震波の特徴として、第二波群の先頭部分に強いパルス状の地震波が含まれており、これにより女川原子力発電所の地震動は基準地震動を超える地震動となった。

○第二波群先頭のパルス波をもたらした破壊は、仙台市から見て150kmも沖合で生じたにも関わらず、仙台市内に100 cm/sを超える揺れをもたらすほど強い破壊であった。同様の強い破壊がより陸域に近いところで生じなかったことは不幸中の幸いであった。

○南海トラフ巨大地震をもたらすプレート境界は伊方発電所からわずか41kmのところにあり、上述のような強い破壊が伊方発電所に比較的近い位置で生じた場合、基準地震動をはるかに上回る地震動となる。

参考文献

石橋克彦（2015）：地震列島・日本の原子力発電所と地震科学，日本地震学会モノグラフ，第3号，pp. 3-11.

川島一彦（2019）：耐震工学，鹿島出版会.

ロバート・ゲラー（2012）：防災対策と地震科学研究のあり方：リセットの時期，日本地震学会モノグラフ，第1号，pp. 5-8.

瀬瀬一起・小林広明・三宅弘恵(2016): 2016年4月14・16日熊本地震の震源課程，
<http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/2016kumamoto/index.html>

国土地理院(2016)：平成28年熊本地震の震源断層モデル（暫定），
<http://www.gsi.go.jp/common/000140781.pdf>

地震調査研究推進本部地震調査委員会(2017)：中央構造線断層帯（金剛山地東縁一由布院）の長期評価（第二版）.

四国電力株式会社（2013）：伊方発電所 地震動評価 資料集Ⅰ 地震動評価上のジョグの考え方について，平成25年8月28日.

四国電力株式会社（2014）：伊方発電所 地震動評価 震源を特定して策定する地震動（中央構造線断層帯地震動評価）と基準地震動の策定（コメント回答），平成26年11月7日.

四国電力株式会社(2015b)，伊方発電所 地盤（敷地周辺の地質・地質構造）について，第210回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，資料3-3，平成27年3月20日.

四国電力株式会社（2015a）：伊方発電所 地震動評価について，第210回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，資料3-4-1，平成27年3月20日.

参考文献

高橋良和，秋山充良，片岡正次郎，本田利器（2016）：国内外の道路橋の設計指針にみられる「危機耐性」の分析，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 72, No. 4, pp. I_821-I_830.

武村雅之（2011）：日本地震工学会ニュースNo. 243.

参考文献

檀一男，具典淑，入江紀嘉，アルズベイマサマン，石井やよい（2011）：長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への適用，日本建築学会構造系論文集，第670号，pp. 2041-2050.

土木学会 耐震基準等基本問題検討会議（1995）：土木構造物の耐震基準等に関する提言（第一次提言），<http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo1.html>.

土木学会 阪神・淡路大震災対応技術特別委員会（1996）：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，<http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo2.html>.

日本建築学会（2023）：地盤震動研究とその応用.

野津厚（2015）：不幸中の幸いであった東北地方太平洋沖地震の強震動生成過程から原子力発電所の耐震安全を考える，科学，第85巻，pp. 974-980.

野津厚（2017）：西南日本で現在進行中の地殻変動と伊方原子力発電所，科学，第87巻，pp. 712-716.

松澤暢（2012）：M9を想定するために何が欠けていたのか？今後どうすれば良いのか？，日本地震学会モノグラフ，第1号，pp. 9-13.

森川信之・藤原広行・岩城麻子・前田宜浩（2016）：長期評価に基づく震源断層モデルと強震動予測，第44回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp. 18-25.

参考文献

- Asano K. and Iwata T. (2016): Earth Planets Space 68:147
- Abrahamson, N. A. and W. J. Silva (2008): Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations, Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pp. 67–97.
- Abrahamson, N. A. et al. (2014): Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions, Earthquake Spectra, Vol. 30, No. 3, pp.1025–1055.
- Byerlee, J.D. (1978), Friction of rock, Pure and Applied Geophysics, Vol.116, pp. 615–626.
- Dan, K., Ju, D., Fujiwara, H. and Morikawa N. (2019): Validation of the new procedures for evaluating parameters of crustal earthquakes caused by long faults for ground-motion prediction, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.109, pp.152–163.
- Fujii, Y. and Matsu'ura, M. (2000): Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its tectonic implication, Pure and Applied Geophysics, Vol.157, pp.2283–2302.
- Lay, T., Kanamori, H. and Ruff, L. (1982): The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes, Earthquake Prediction Research 1, pp.4–71.
- Lay, T. and Wallace, T.C. (1995): Modern Global Seismology, Academic Press.
- Nishimura, S. and Hashimoto, M. (2006): Tectonophysics 421:187.

付 録

1995年兵庫県南部地震(Mj7.3)

周期：1～5 秒

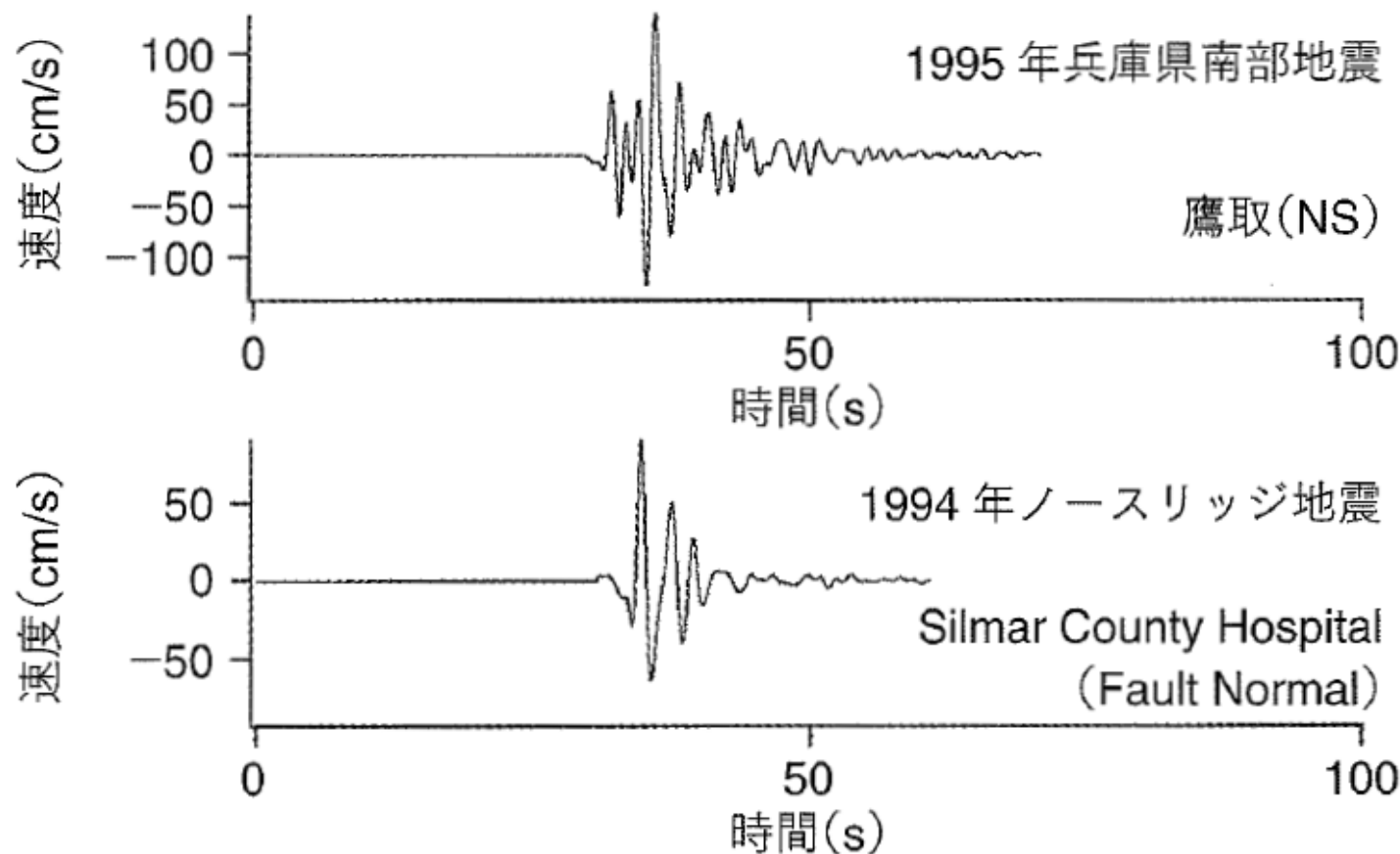


図2—内陸地殻内地震による強震動パルスの例(周期1～5秒の帯域の速度波形)

1995年兵庫県南部地震(Mj7.3)

高速道路

〈阪神高速道路3号神戸線・神戸市東灘区〉



1994年ノースリッジ地震(Mj6.8)

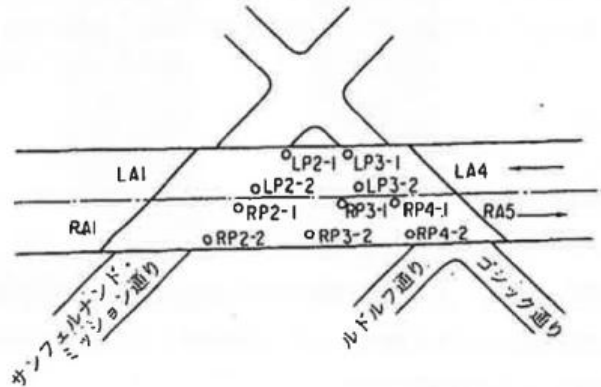
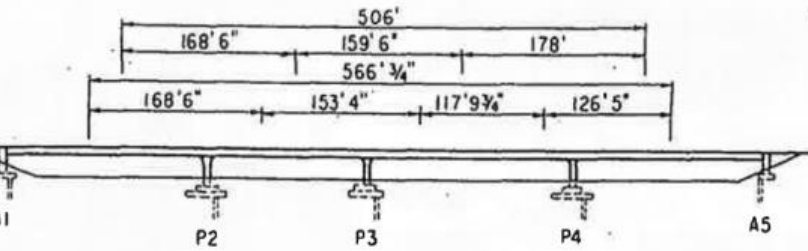


図 5.5.17 S-118 ミッション/ゴシック地区の高架橋¹⁾



写真 5.5.26 RP3-1 橋脚の被害²⁾ (フレアーの直下で破壊している)



写真 5.5.27 RP3-2 橋脚の被害 (橋脚の基部が傾斜している)²⁾



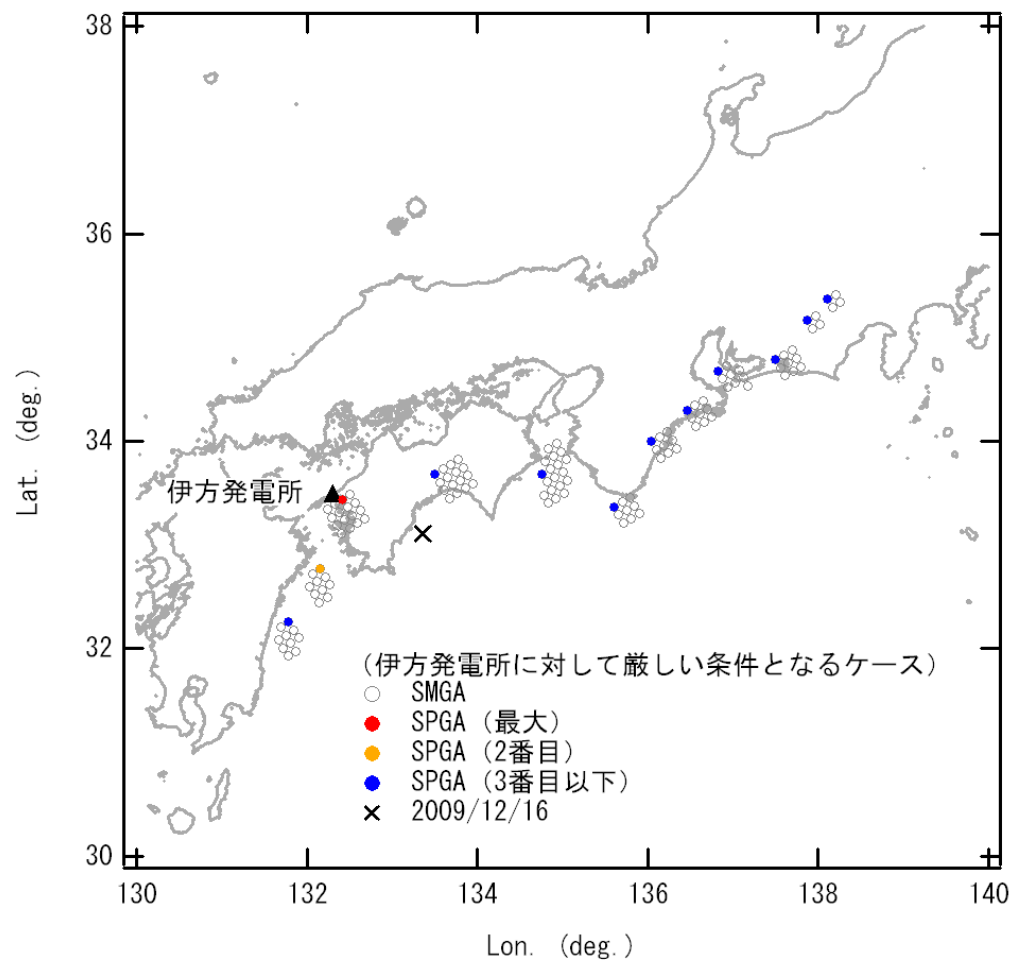
写真 5.5.28 LP3-1 橋脚の被害 (曲げせん断破壊)²⁾



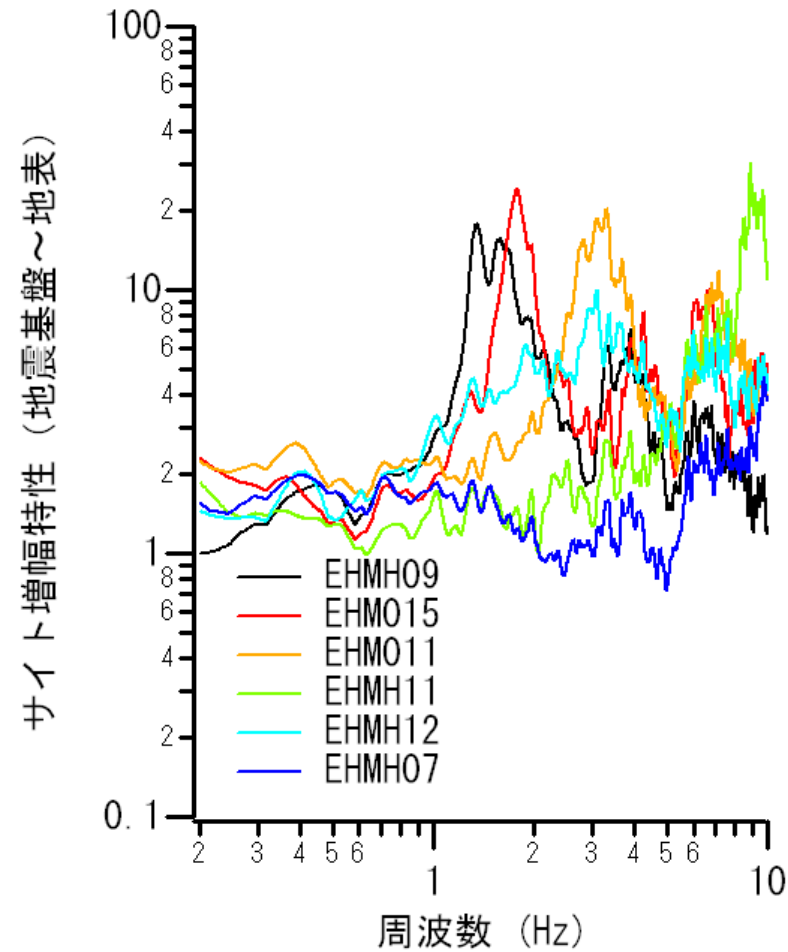
写真 5.5.29 LP3-2 橋脚の被害 (曲げせん断破壊が進み、軸線が完全にずれている)²⁾



地震動評価に用いたSPGAの位置

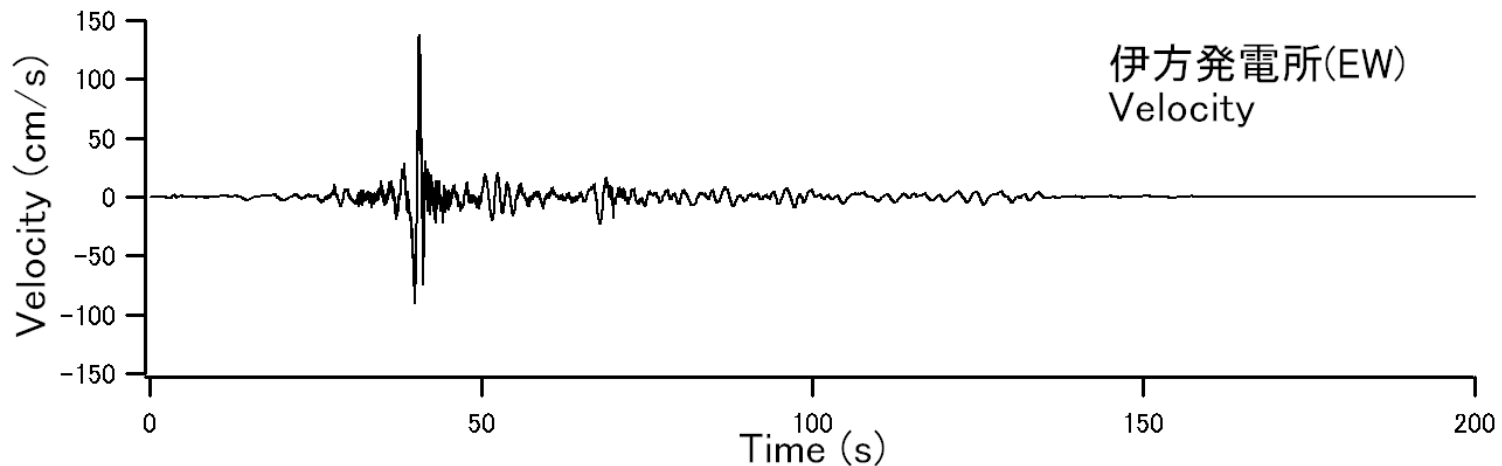
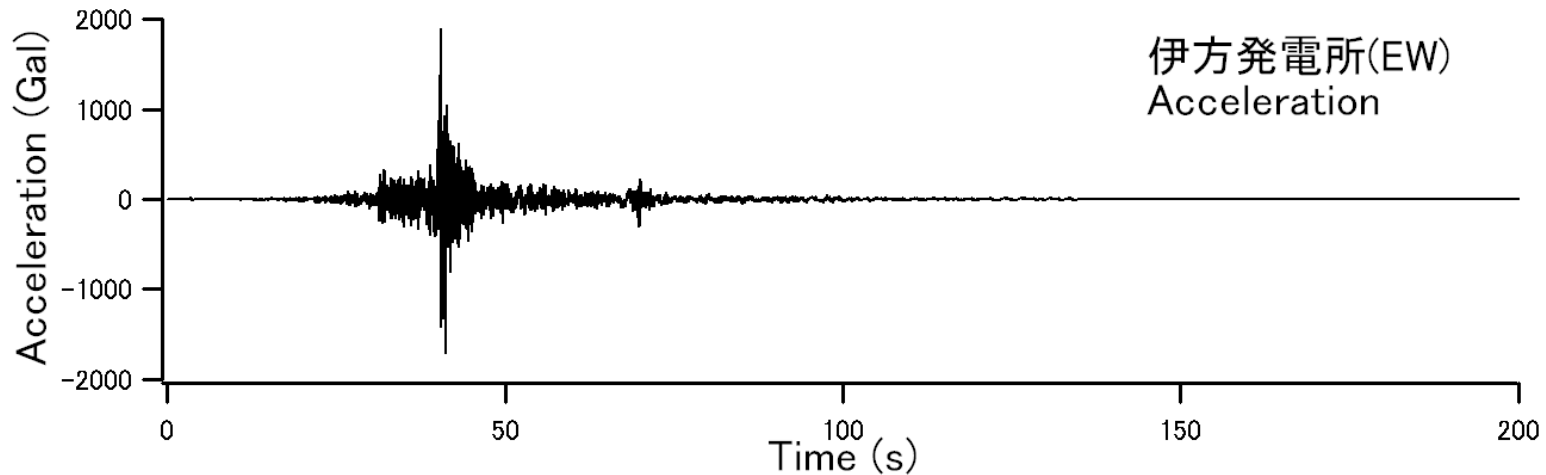


地震動評価に用いたEHMH07の経験的サイト増幅特性



野津他(2007)

地震動評価結果



最大加速度は約1900Gal、最大速度は約138cm/s

(四国電力によるプレート間地震の最大加速度は181Gal)

SPGAモデルの定義

海溝型巨大地震による構造物に影響の大きい帯域での地震動の特徴が強震動パルスであるという認識の下に、それを生成した断層面上の領域を求めたものを強震動パルス生成域（Strong-motion Pulse Generation Area; SPGA）と呼ぶ.

SPGAの組み合わせからなる震源モデルをSPGAモデルと呼ぶ.

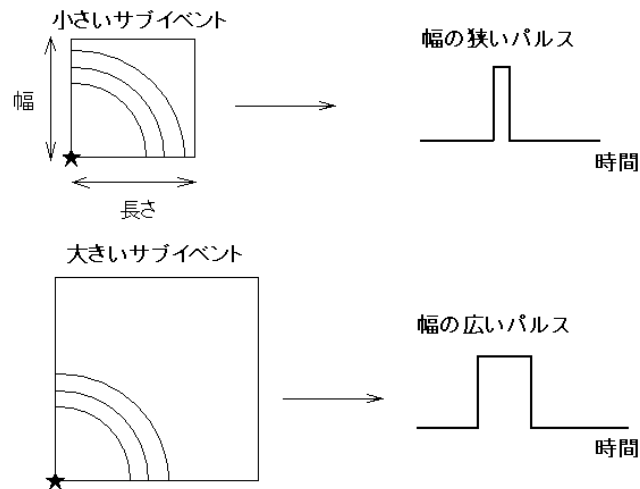
SPGAモデルの作成手順

※入倉(1986, 1997)の波形合成法が本来有している機能を用いる.

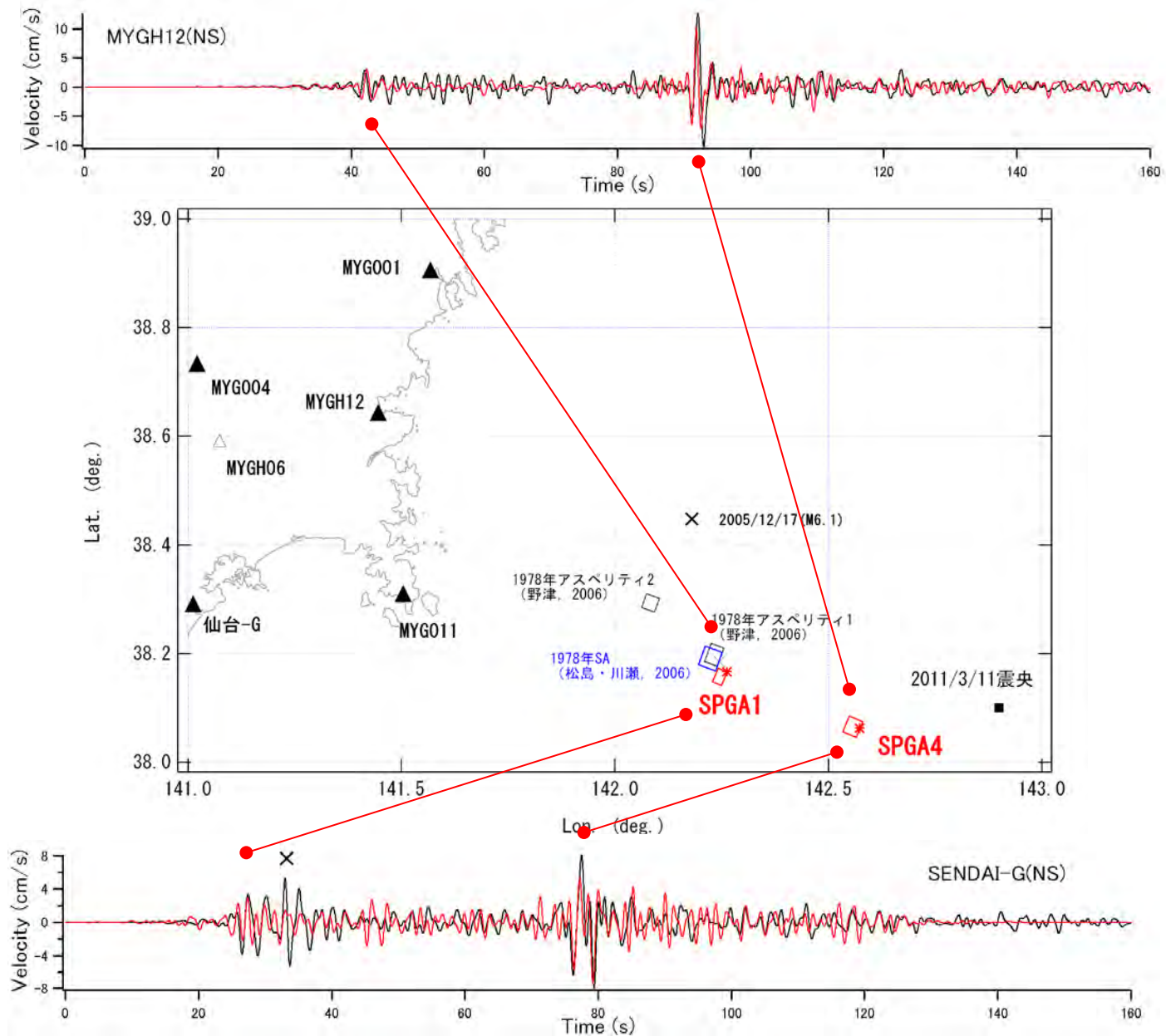
周波数帯	機能	
コーナー周波数付近	サブイベントのサイズに対応したコヒーレントなパルス	→兵庫県南部地震 に対する釜江・入倉 (1997)の震源モデル
それより高周波側	ランダムな地震動	

→この機能に
着目

※サブイベントのサイズについては、パルスの幅が再現されるように設定する
($V_r=3.0\text{km/s}$ とした)

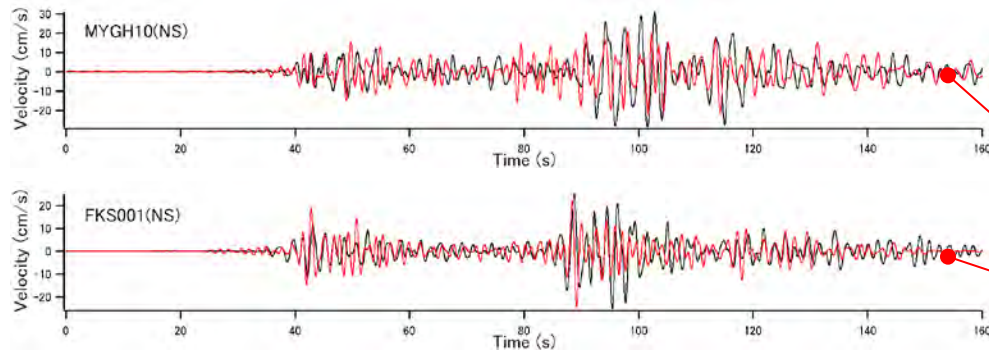


宮城県沖におけるSPGAの設定手順

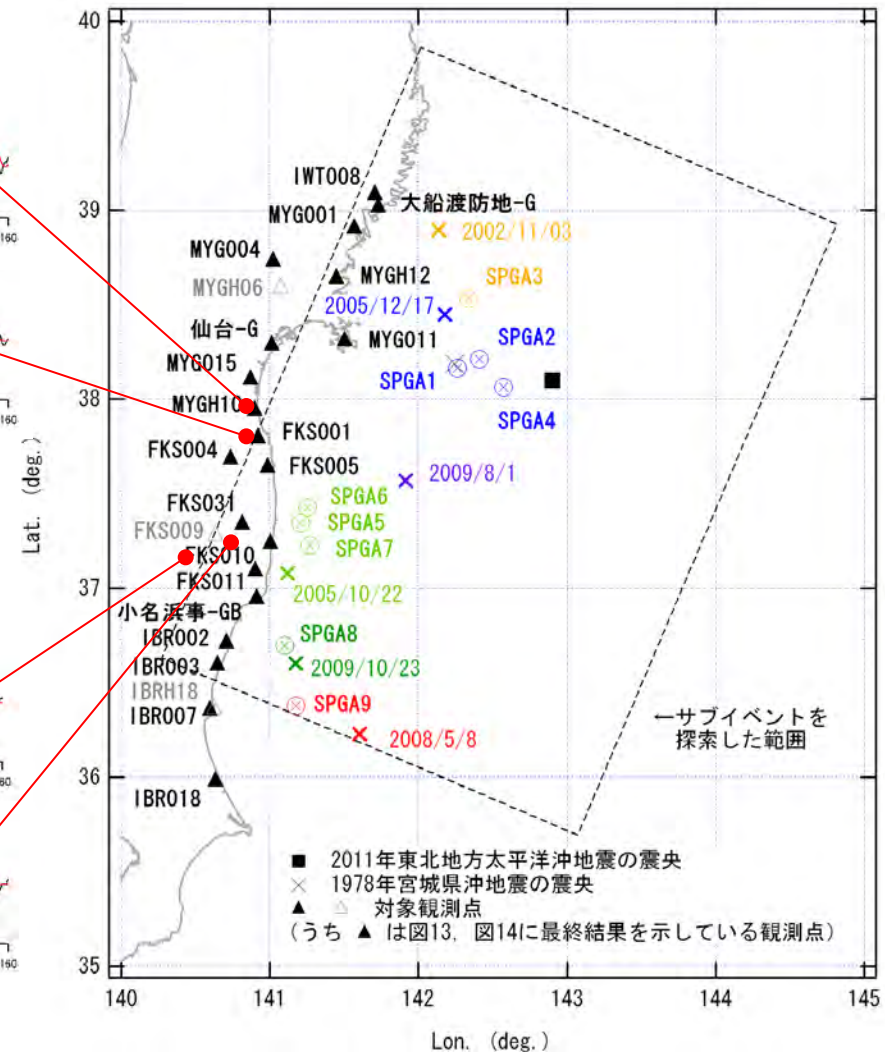
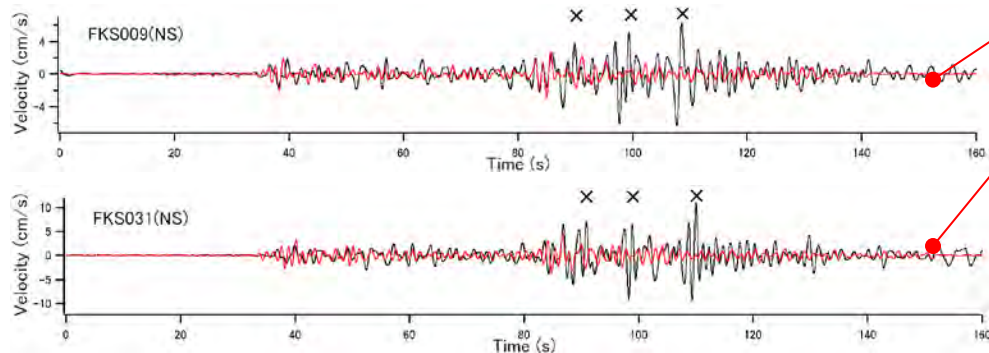


福島県沖におけるSPGAの設定手順

①宮城県と福島県の県境付近までは、宮城県沖のSPGAだけで波形が説明可能



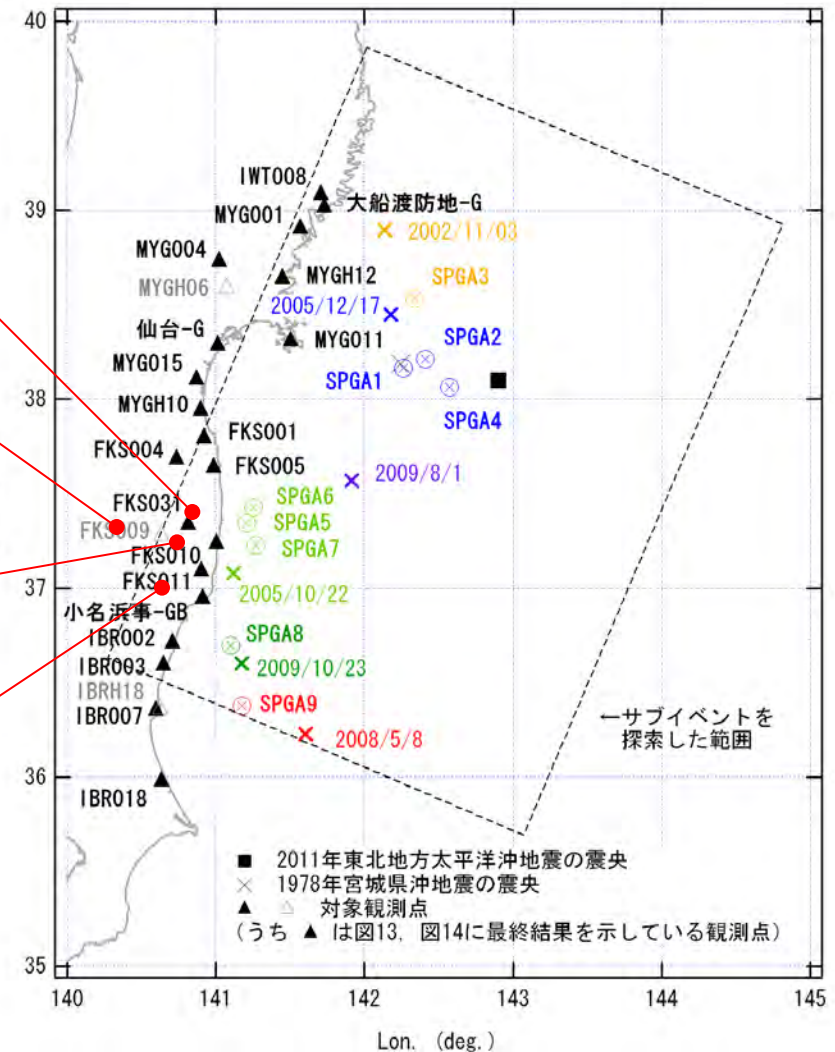
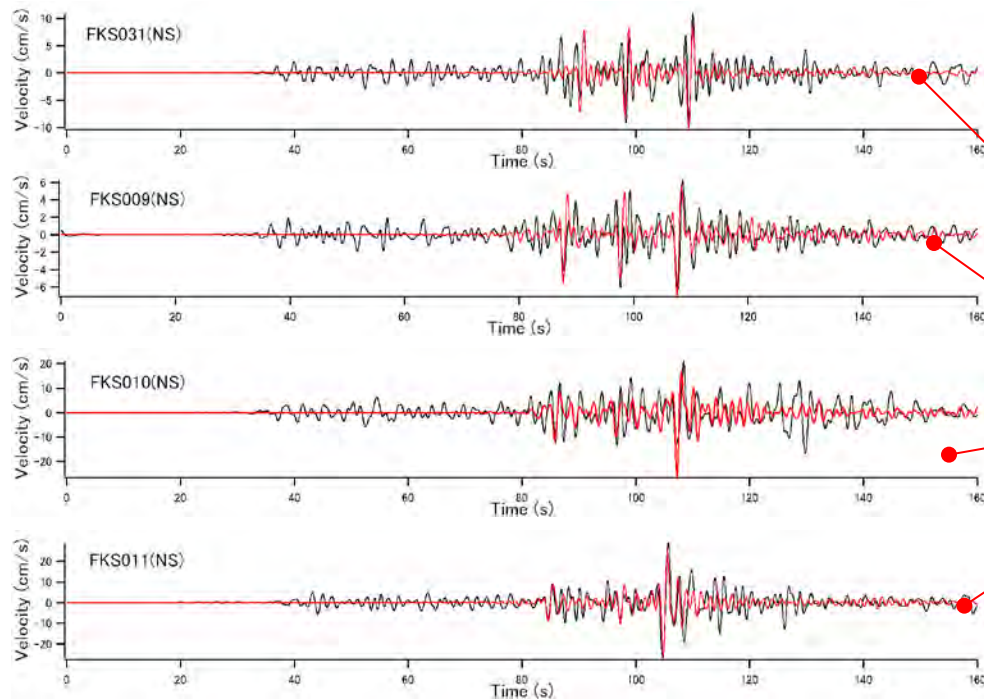
②しかし、もう少し南下すると、宮城県沖のSPGAだけでは波形が説明できなくなる。



→これら3つのパルスの到来時刻を説明できるように、SPGA5～SPGA7の位置を決定.

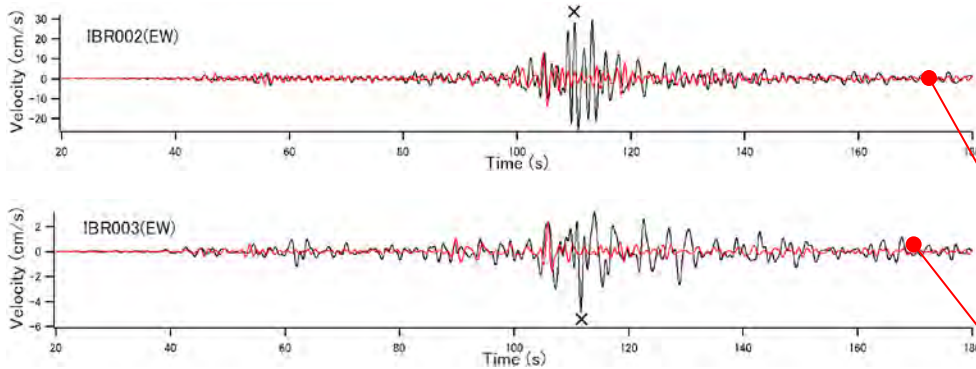
福島県沖におけるSPGAの設定手順

③周辺の観測点での波形を再現するようにSPGA5～SPGA7のパラメタを設定.



茨城県沖におけるSPGAの設定手順

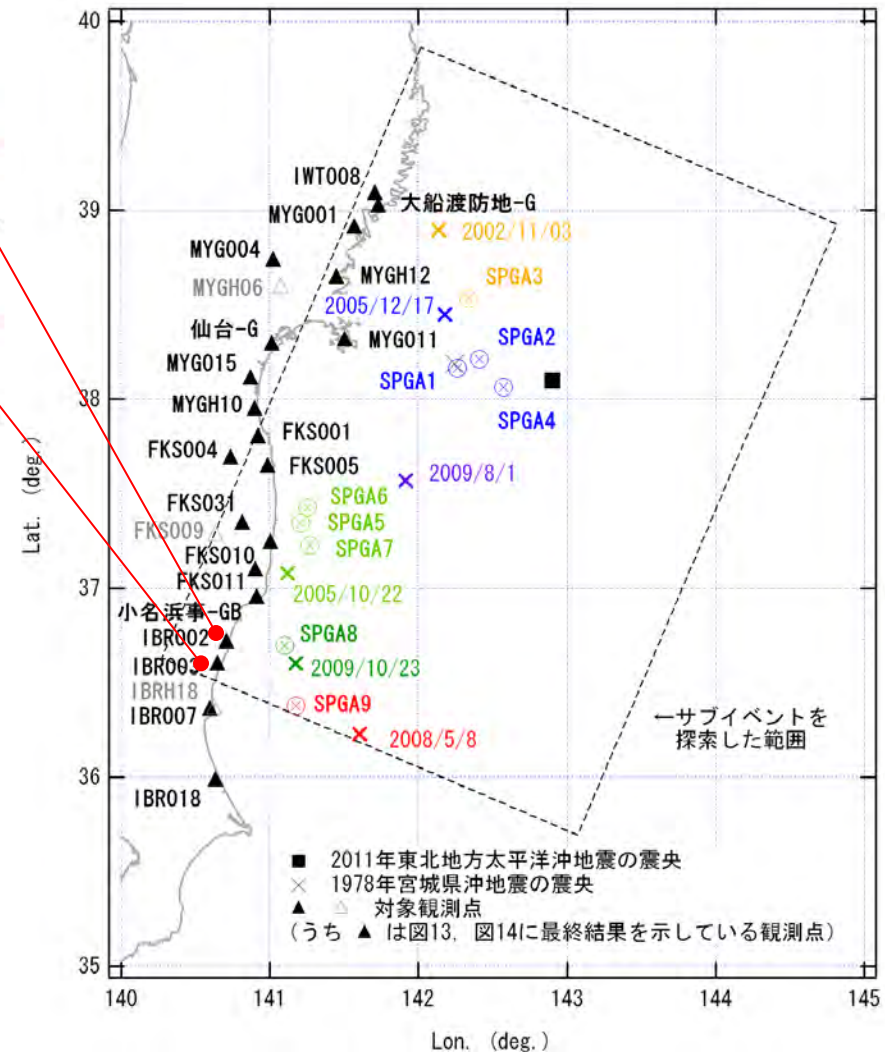
①宮城県沖～福島県沖のSPGAだけでは，茨城県北部の波形の前半部分しか説明できない。



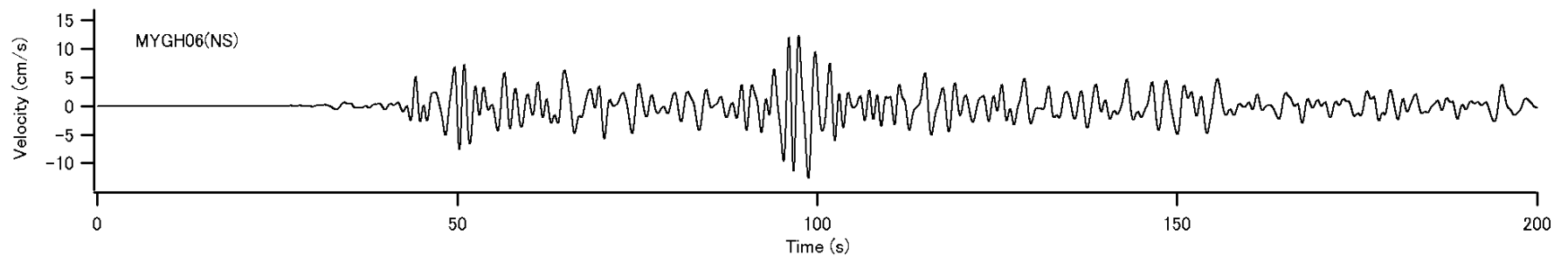
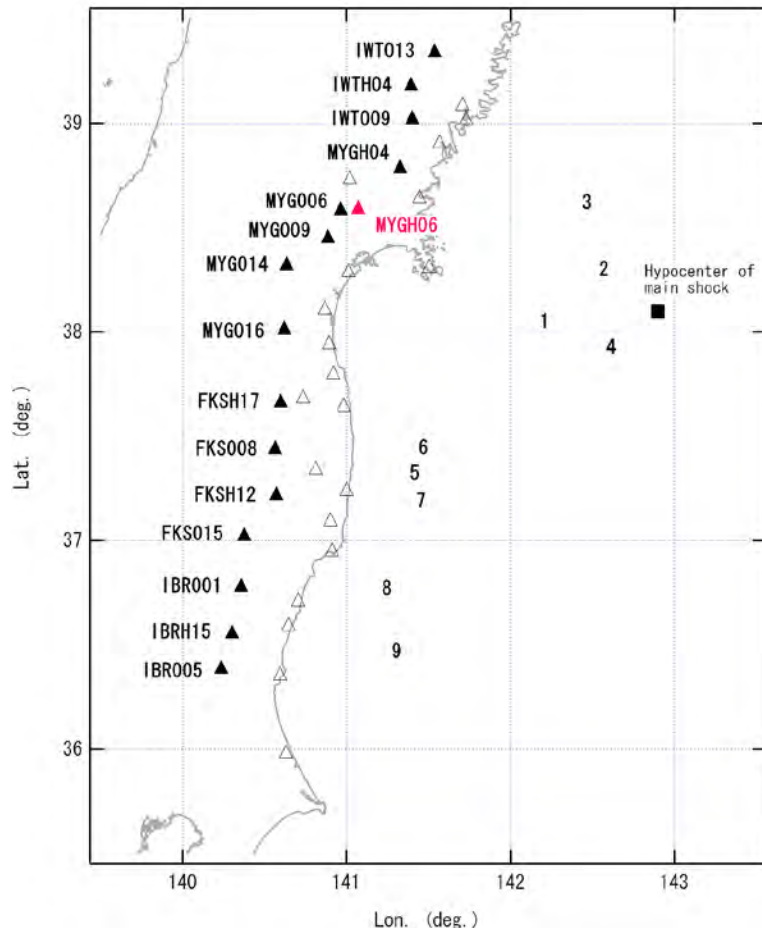
②茨城県北部での主要動の到来時刻を説明できるようにSPGA8の位置を決定.

③周辺の観測点での波形を再現するようにSPGA8のパラメタを設定.

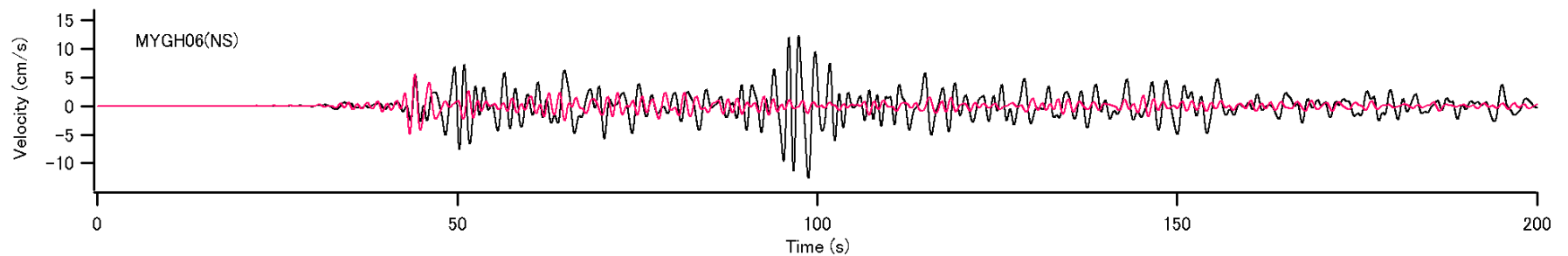
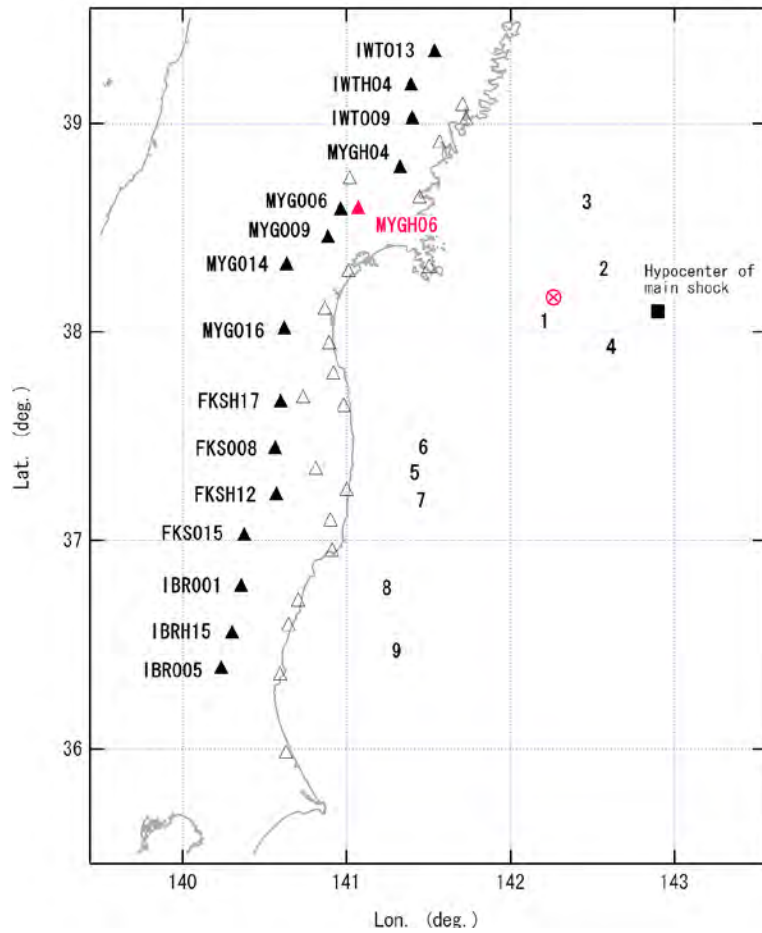
④同様にSPGA9を設定.



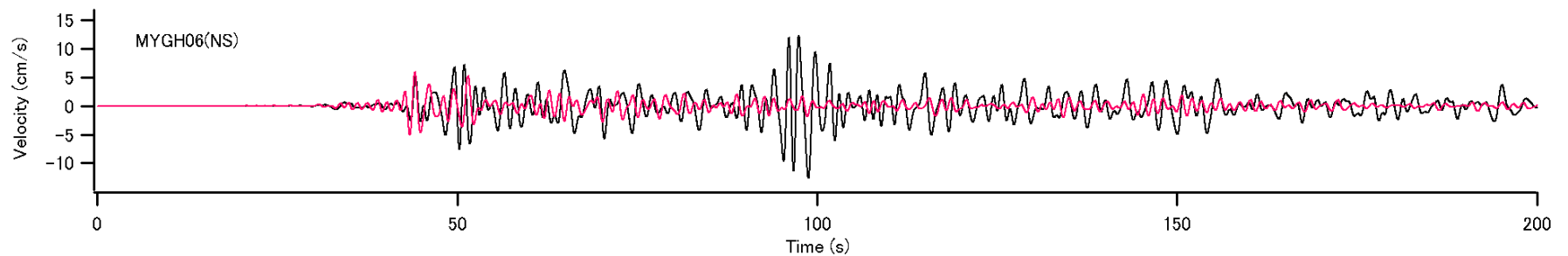
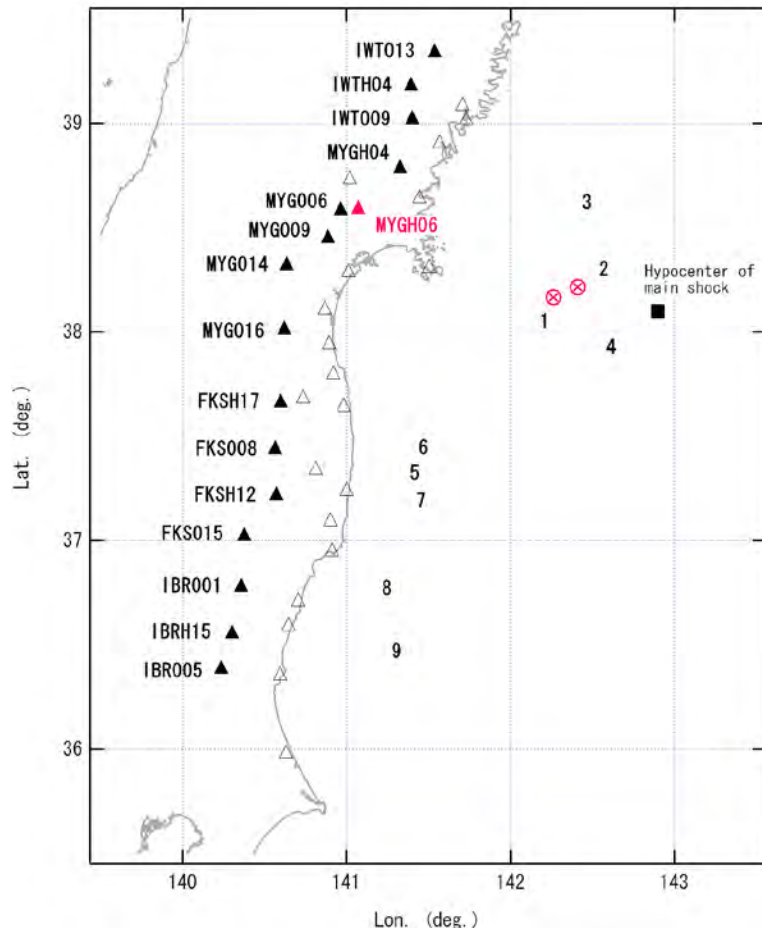
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



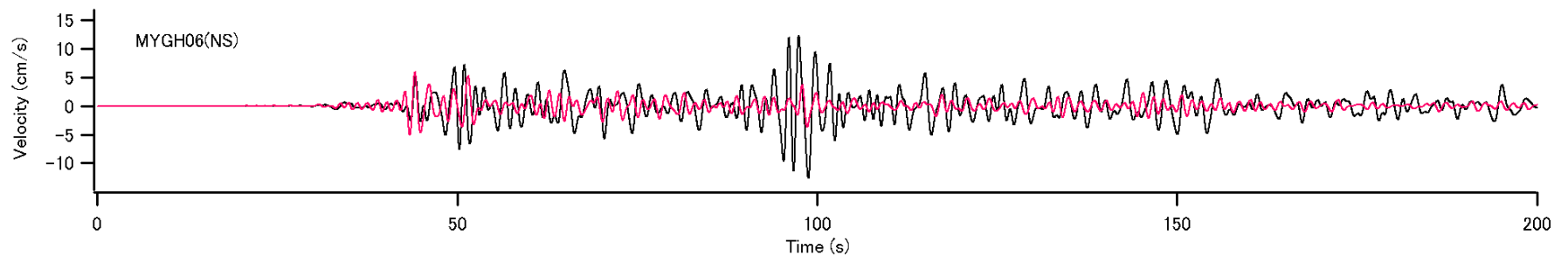
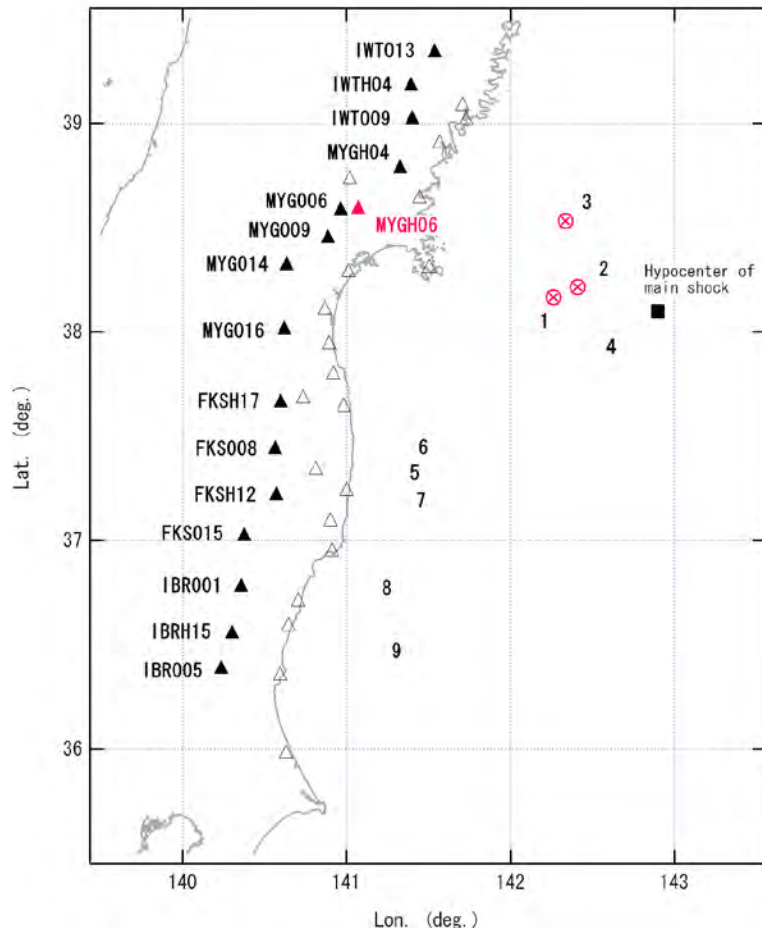
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



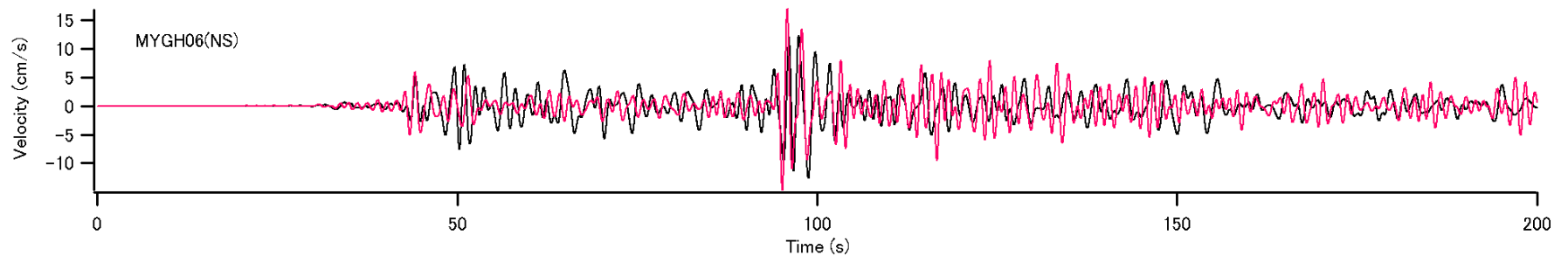
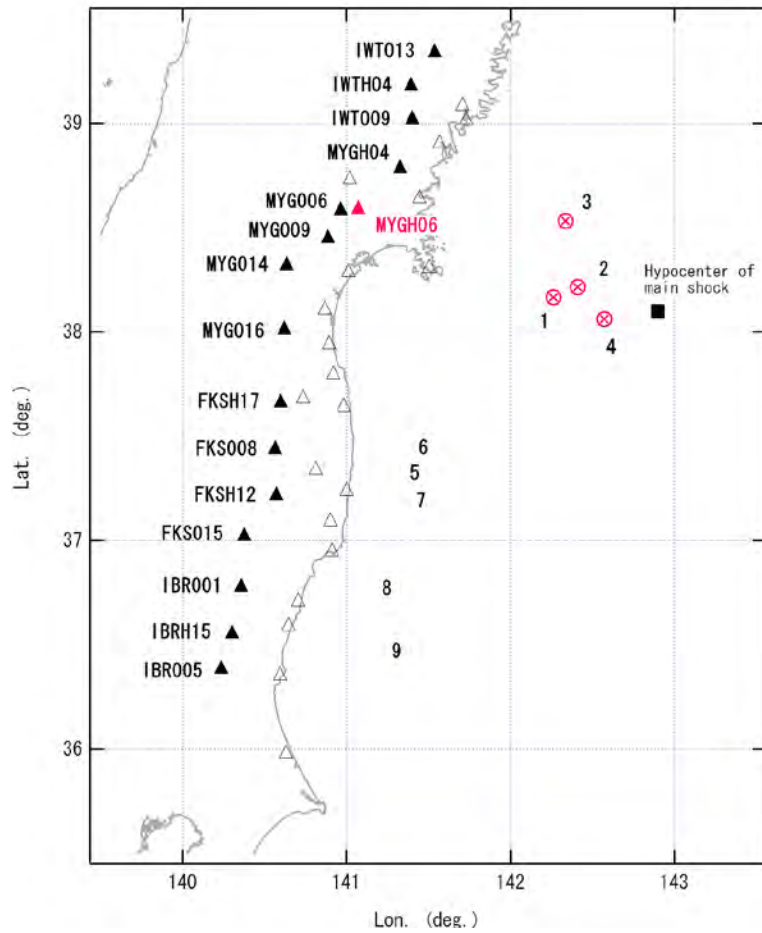
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



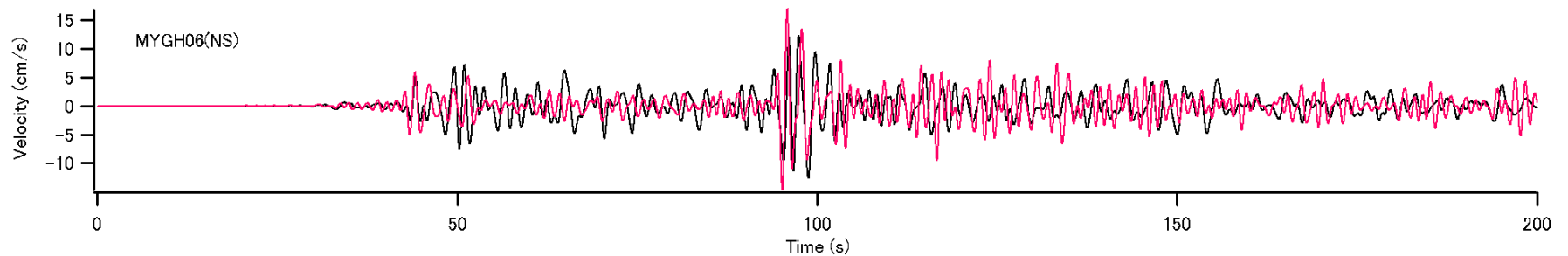
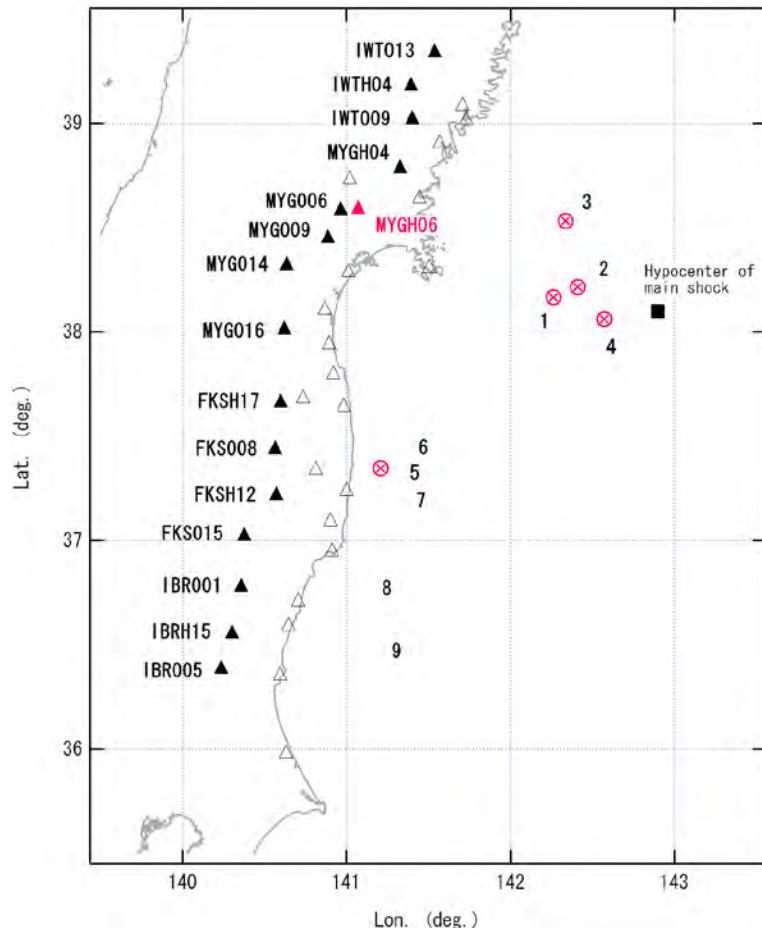
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



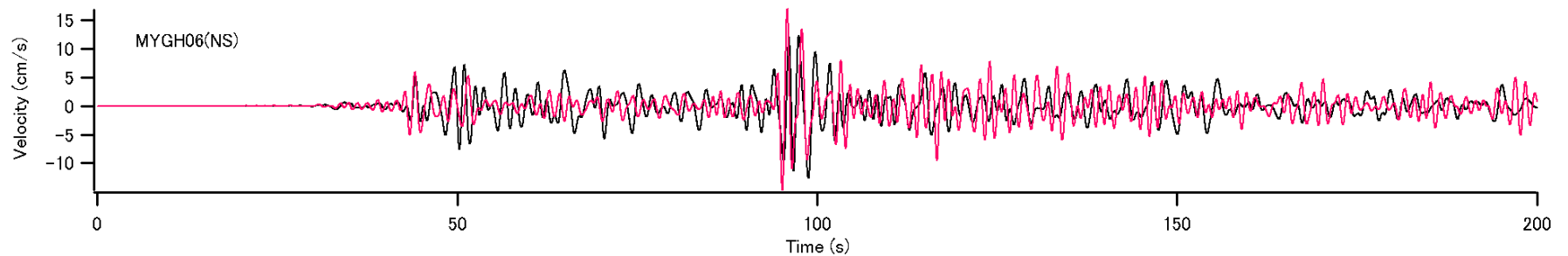
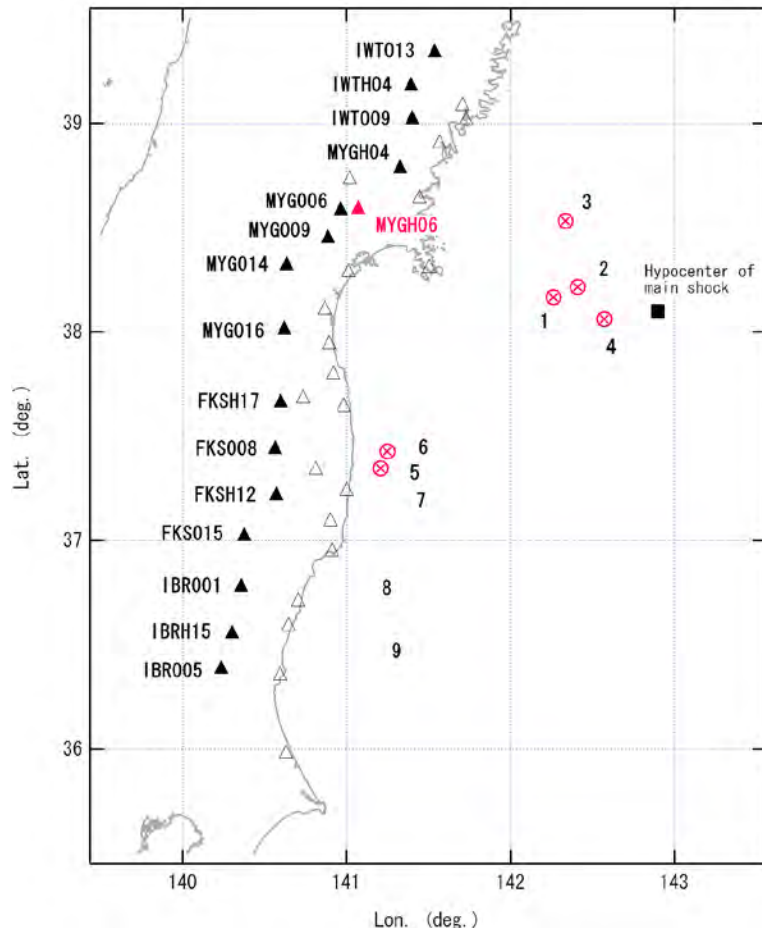
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



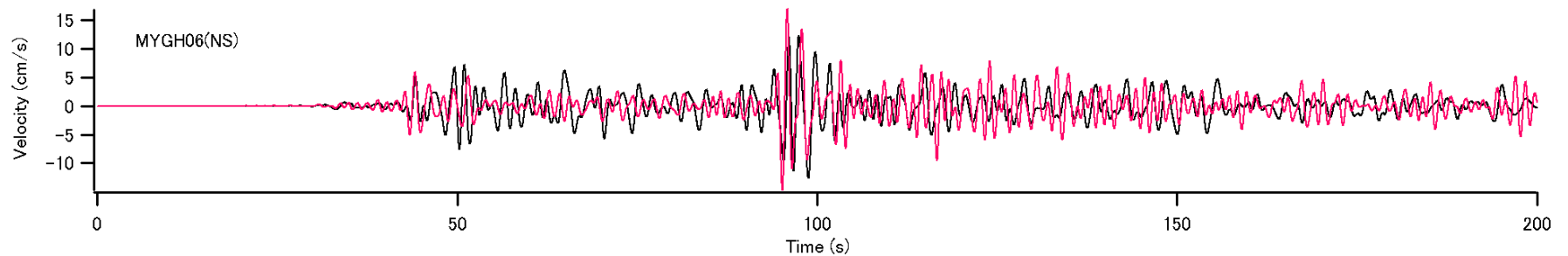
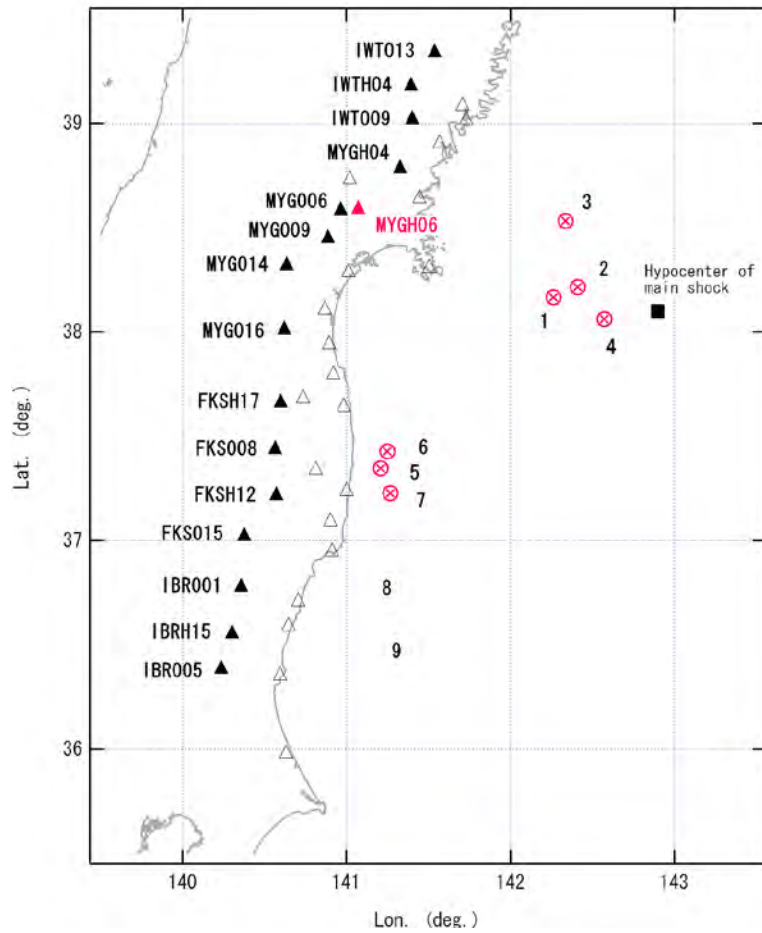
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



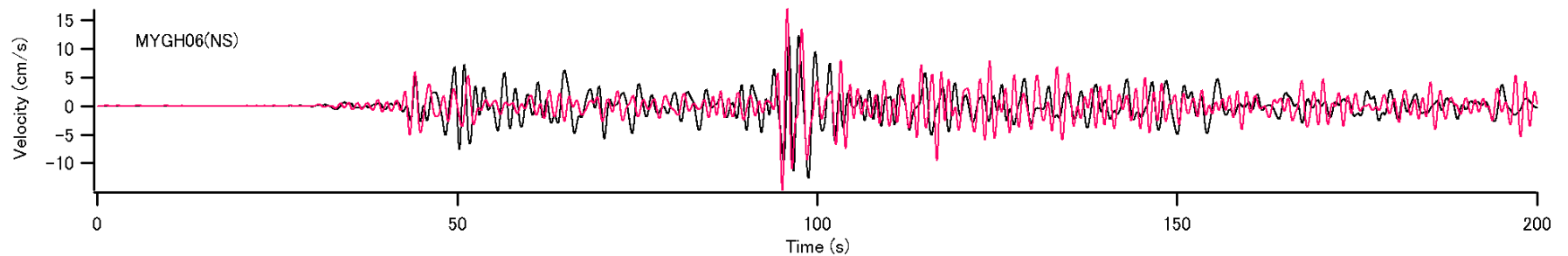
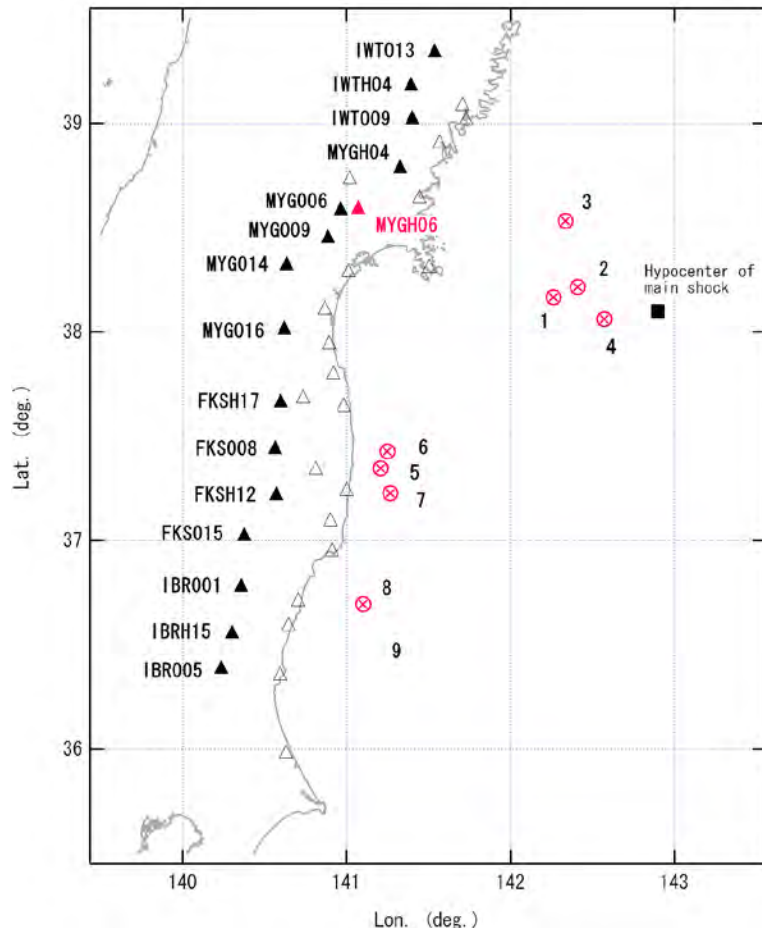
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



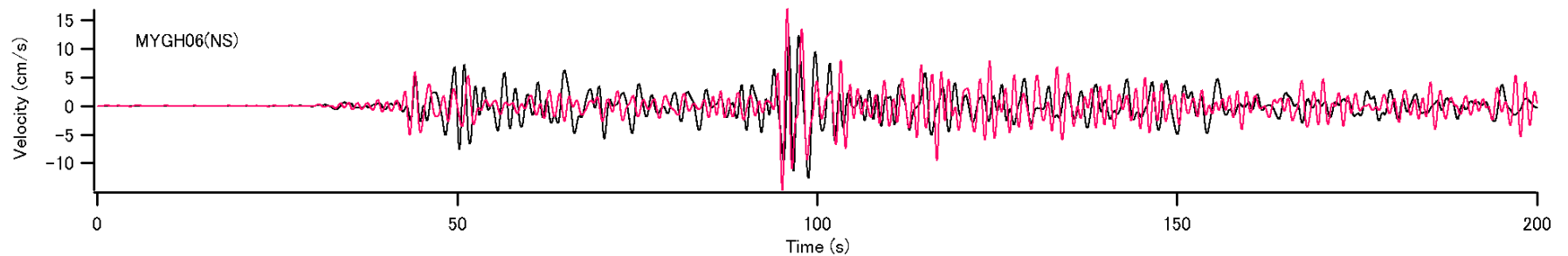
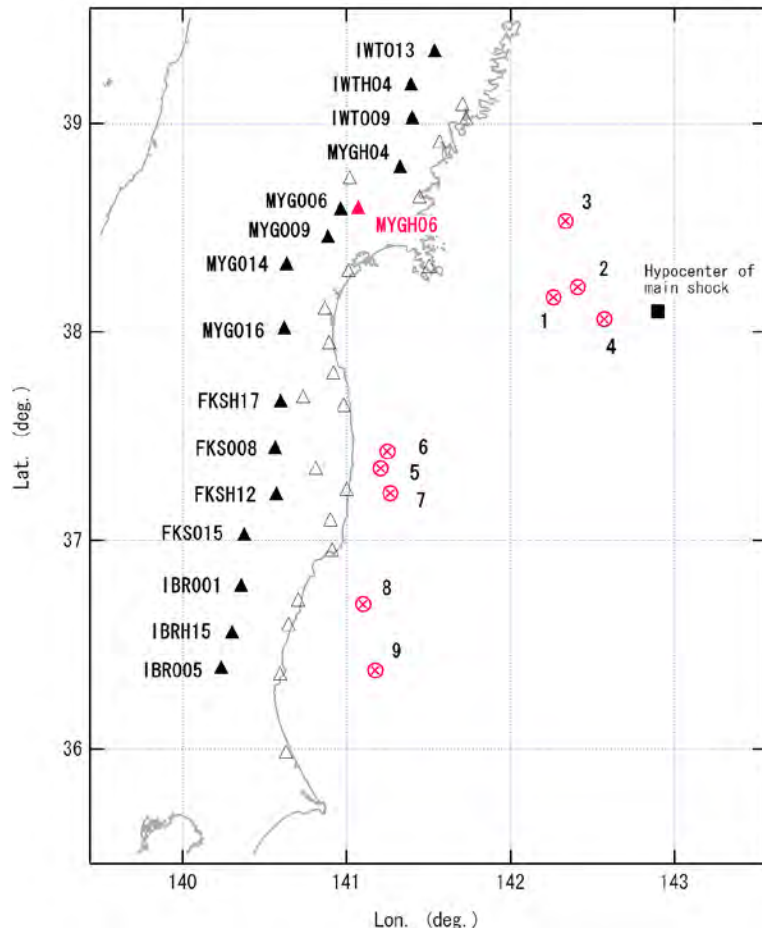
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



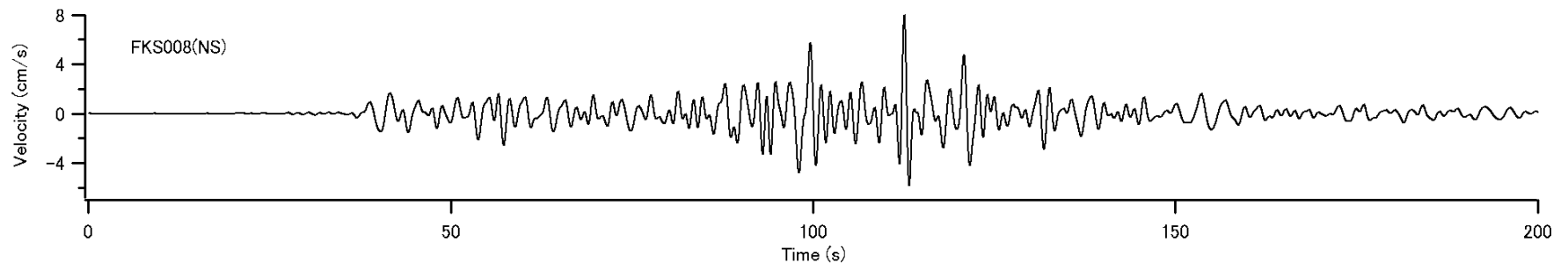
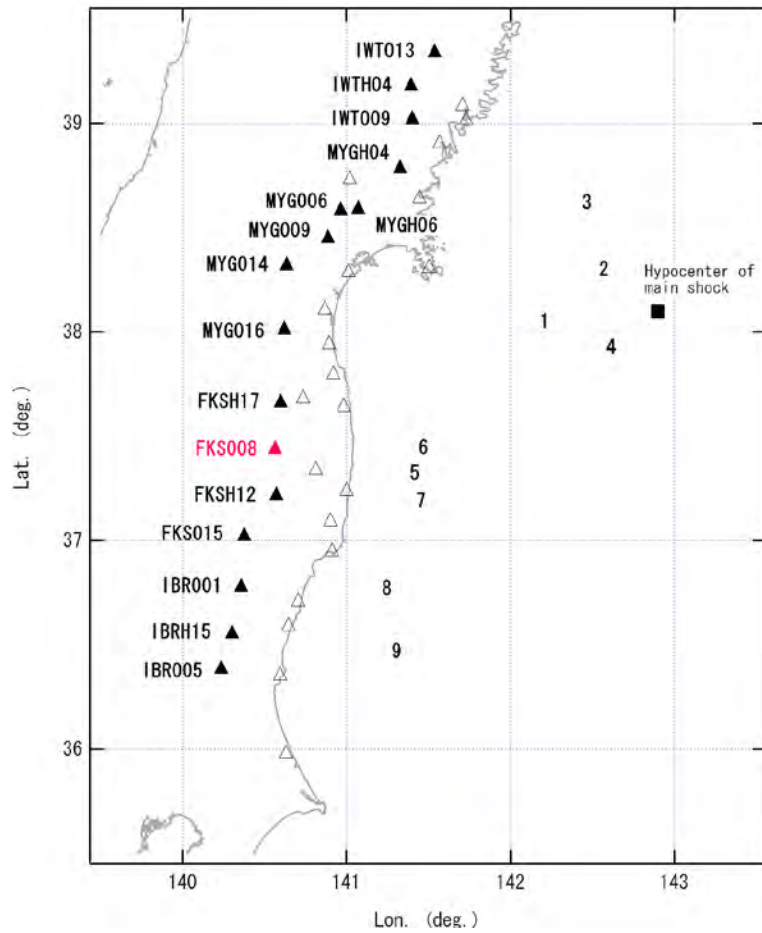
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



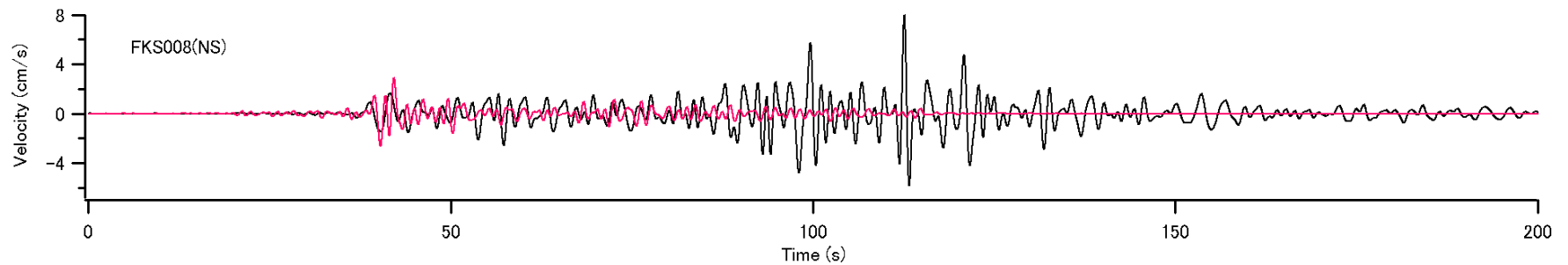
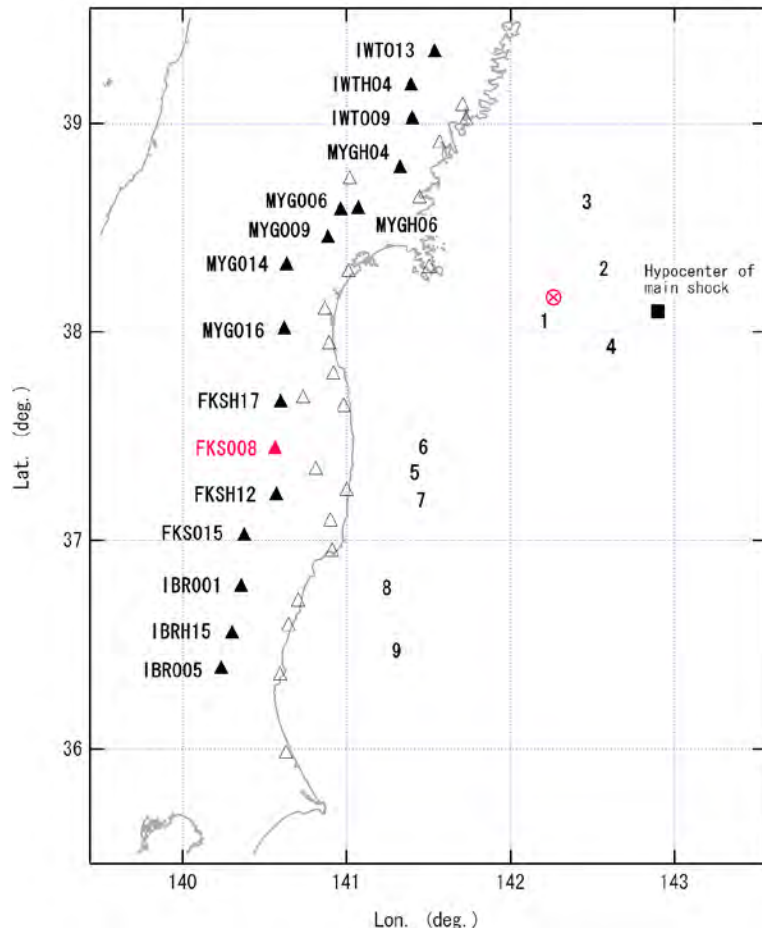
Kik-net田尻の波形に対する各々のサブイベントの寄与



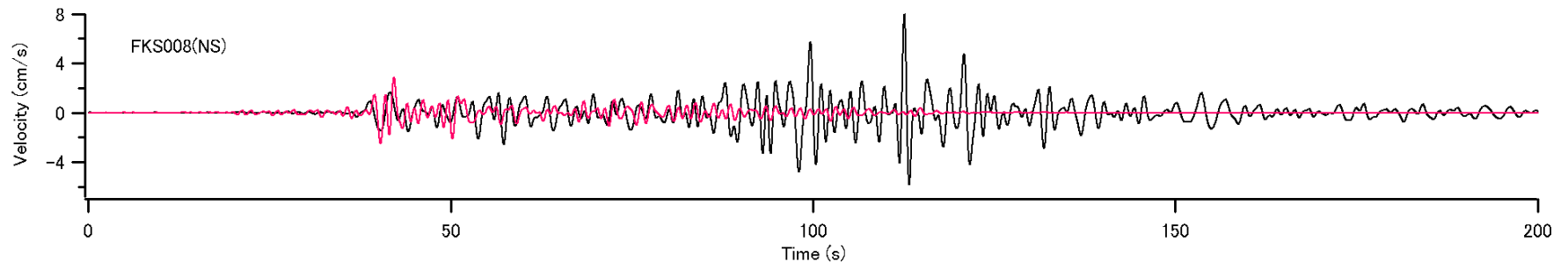
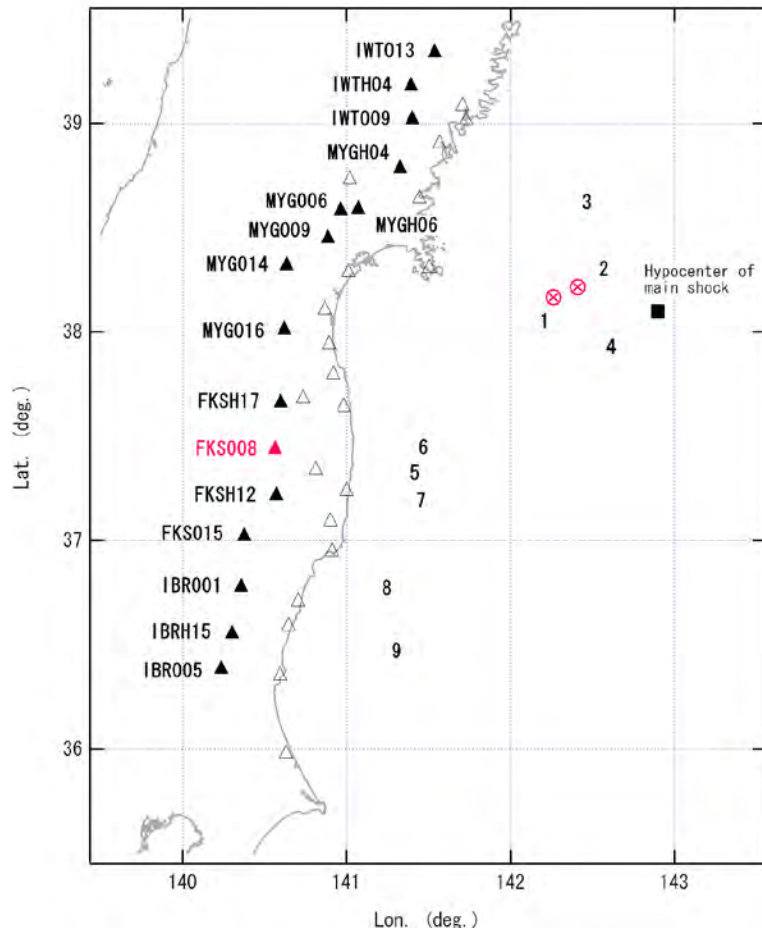
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



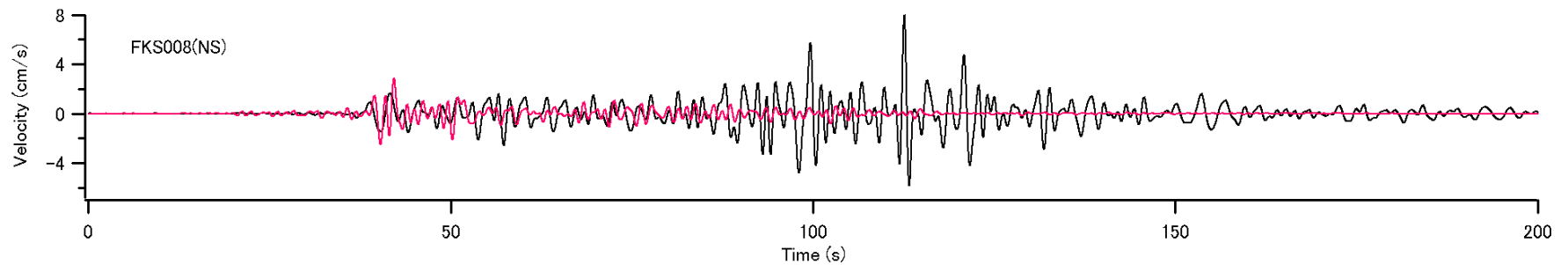
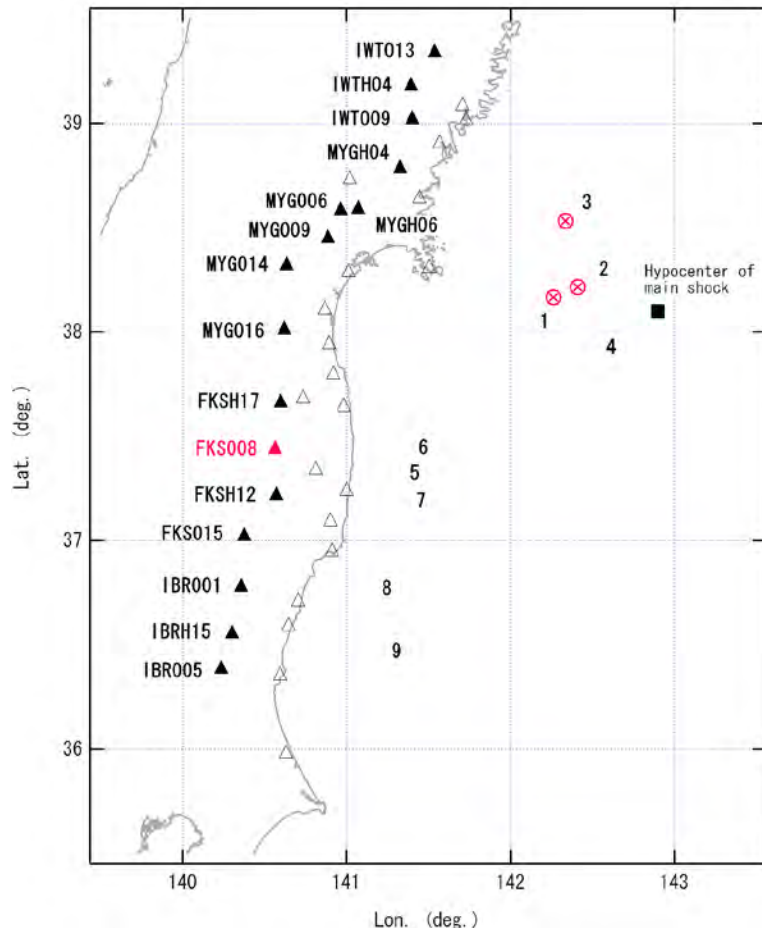
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



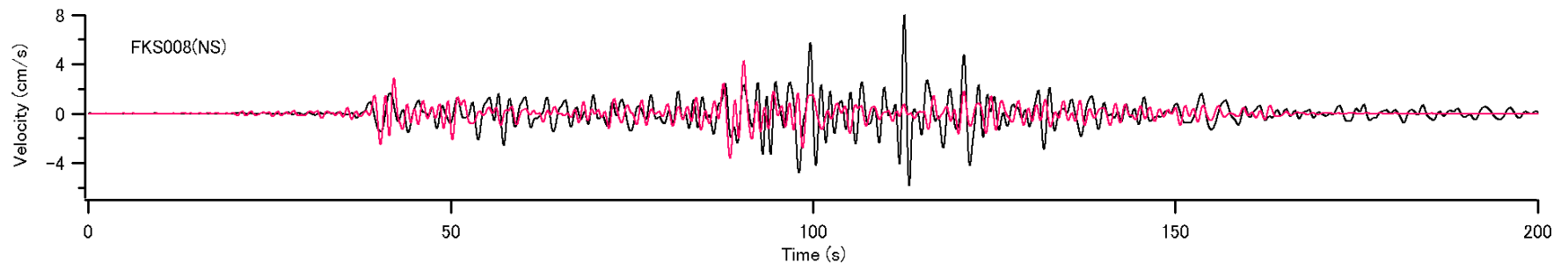
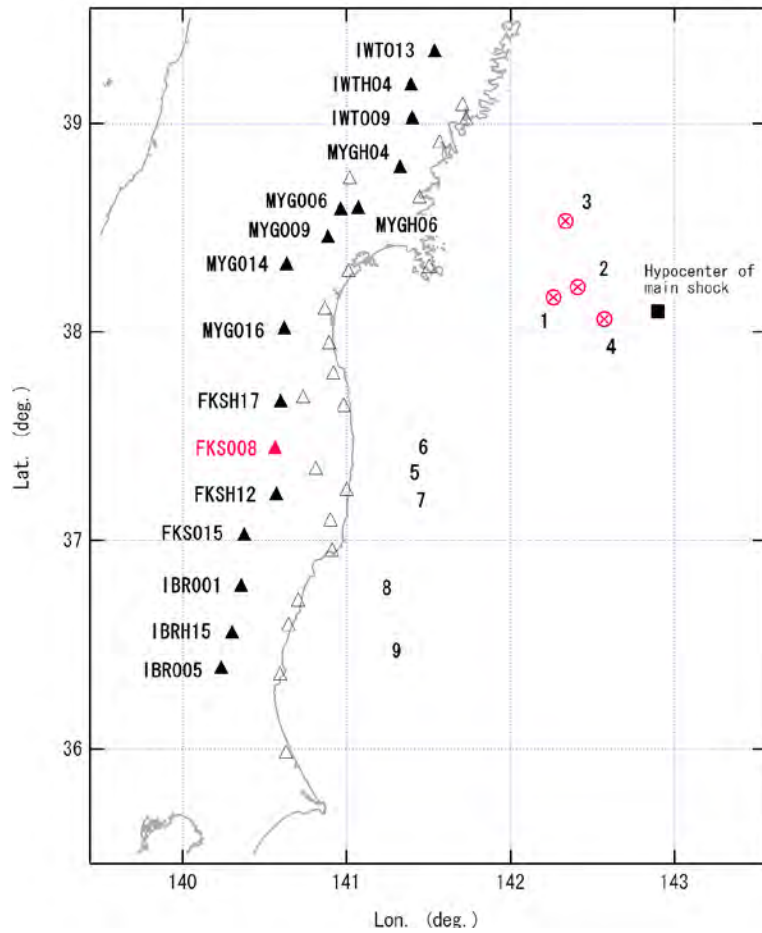
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



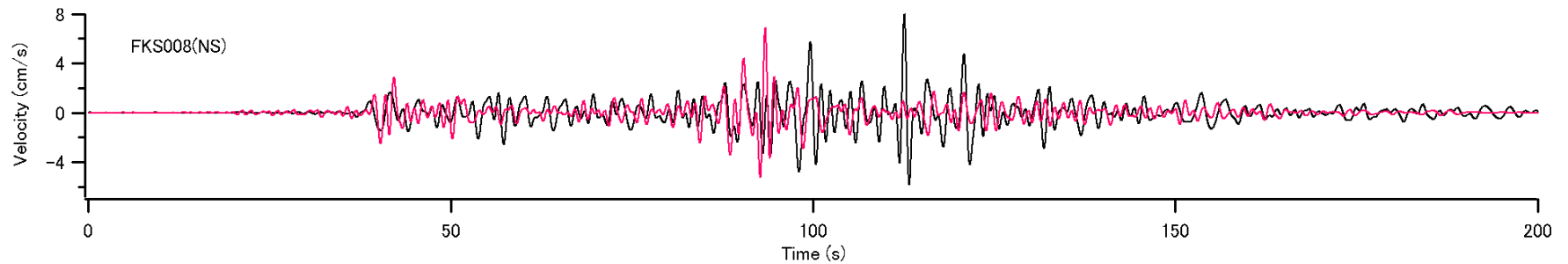
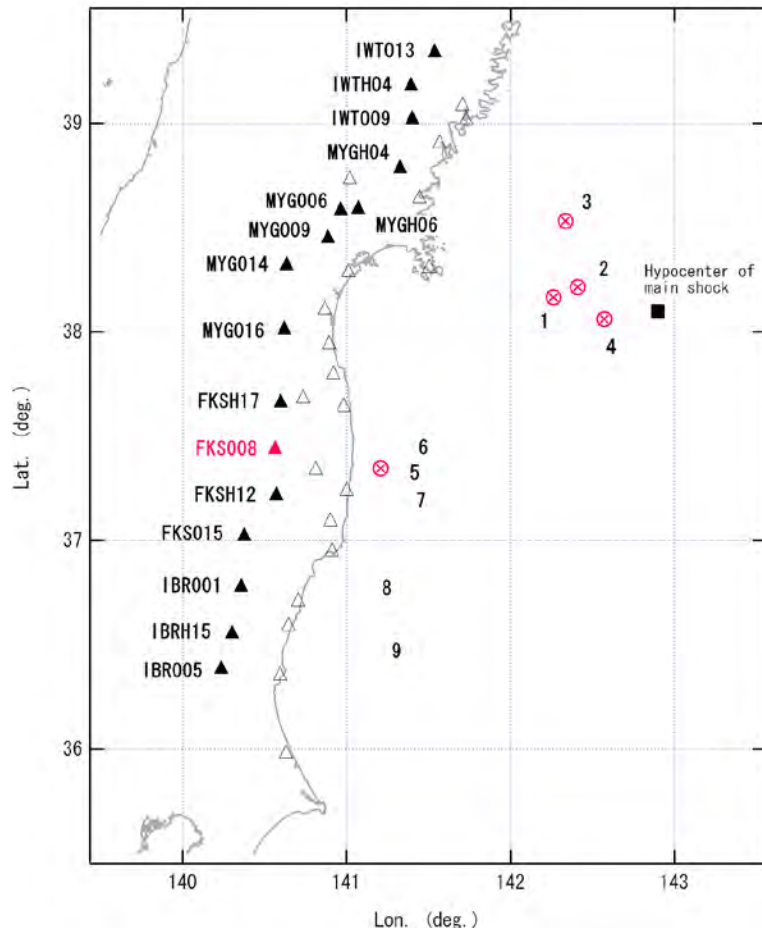
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



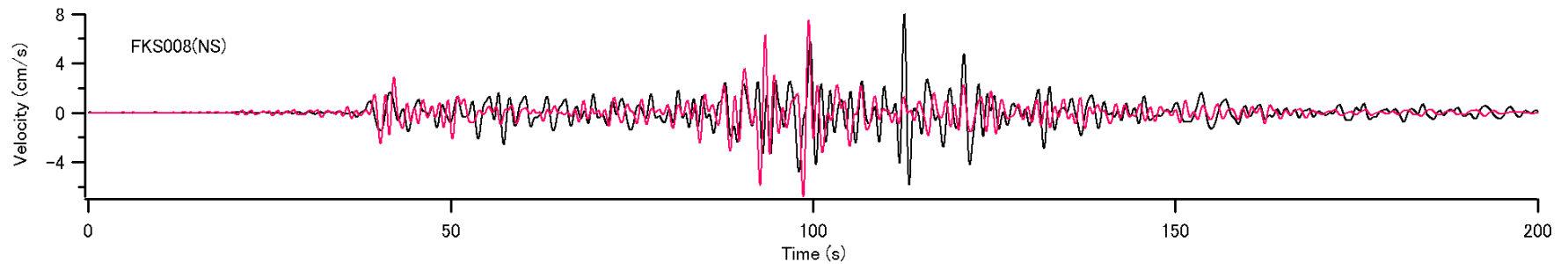
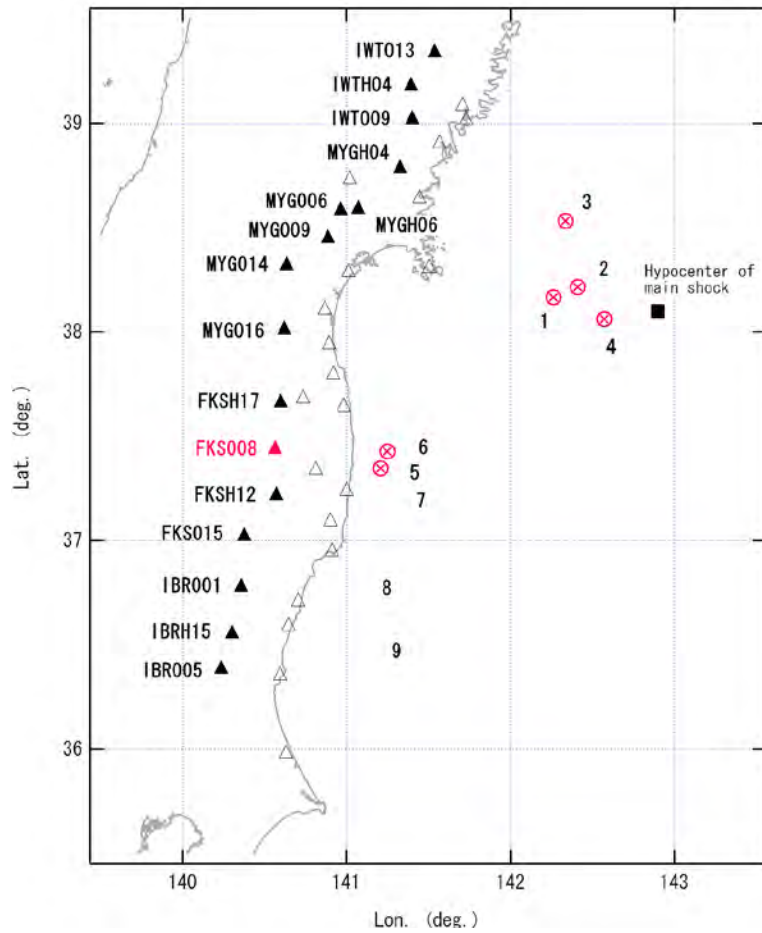
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



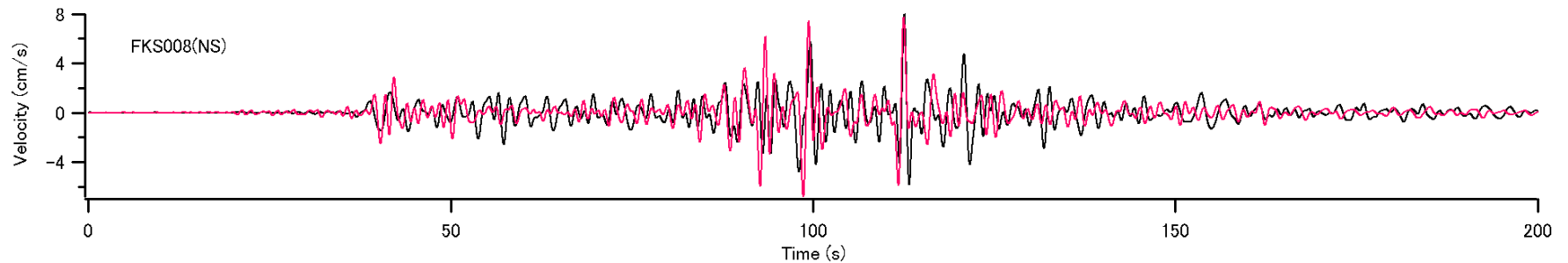
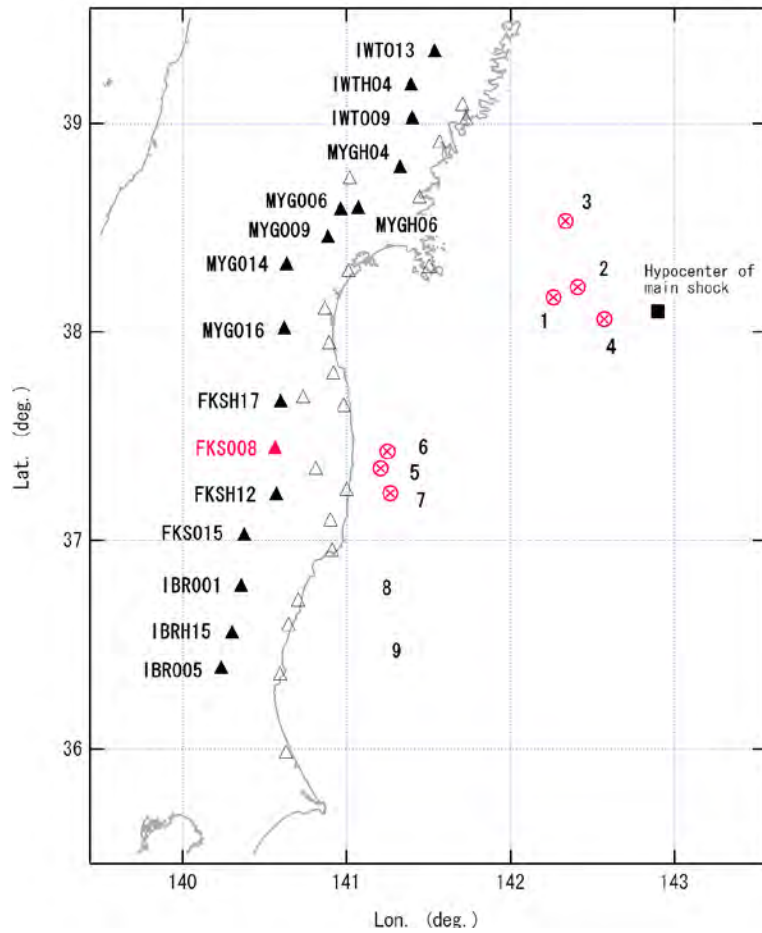
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



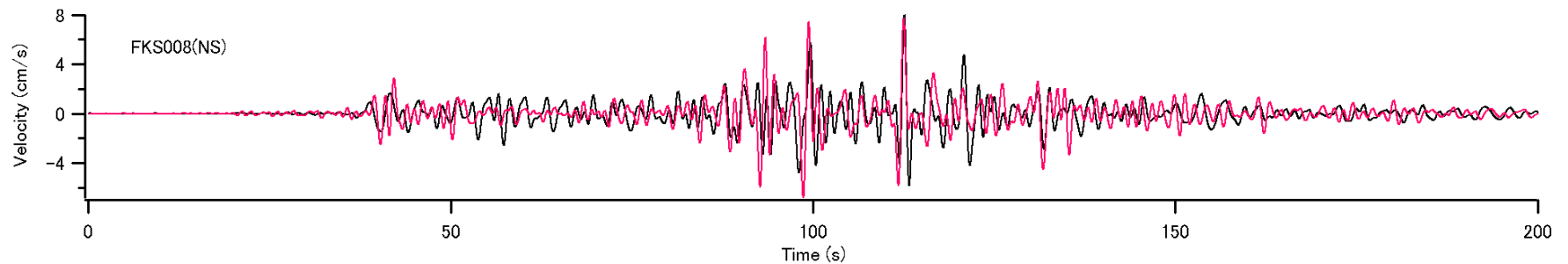
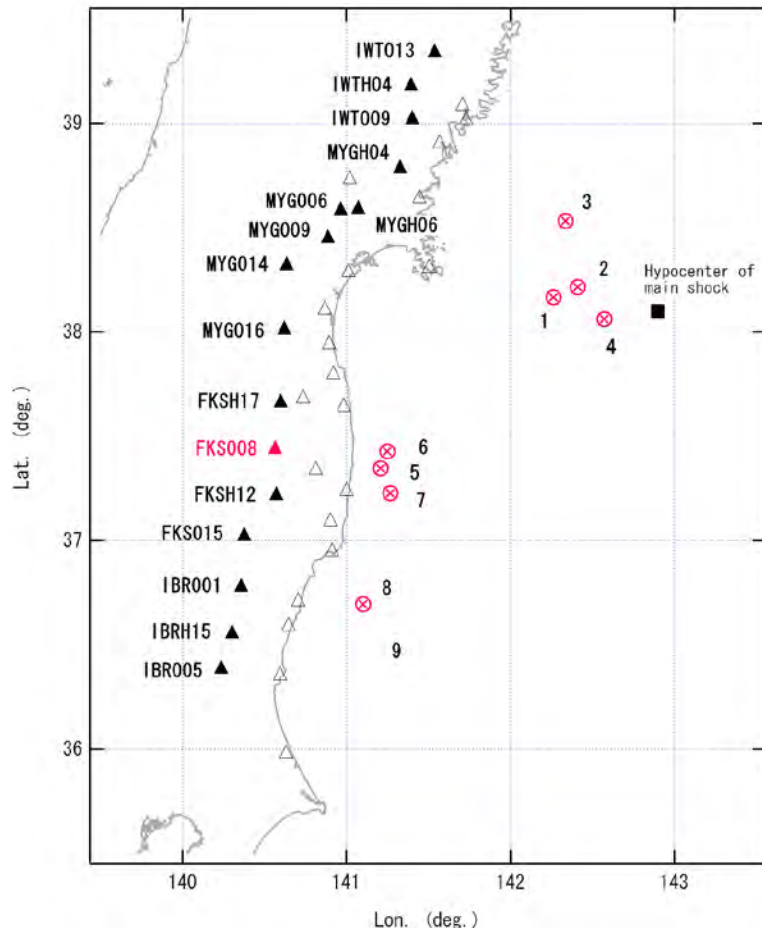
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



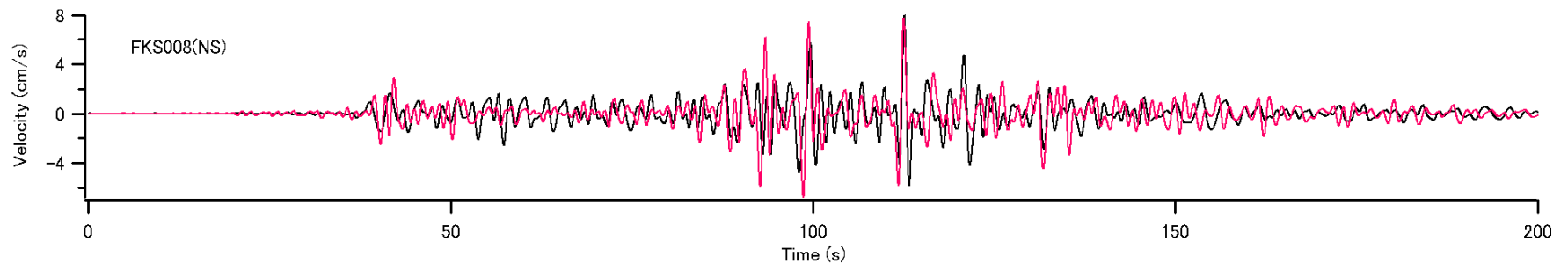
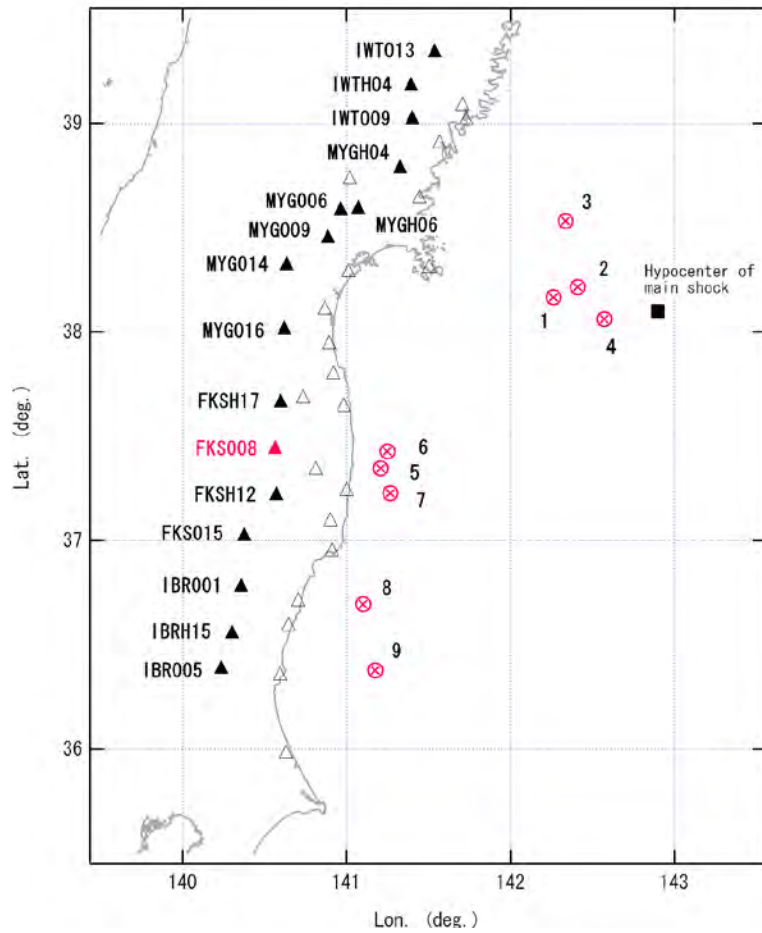
K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



K-NET船引の波形に対する各々のサブイベントの寄与



(まとめ)

★宮城県沖から茨城県沖にかけて、一辺が数km程度の9つのサブイベント（SPGA）を配した震源モデルを用いれば、各地で実際に観測された強震動、特に、工学上重要性の高い0.2-1Hzの帯域の速度波形（パルス状のものを含む）を、精度良く再現することができる。

★東北地方太平洋沖地震発生以前の段階において、発表者は、海溝型巨大地震による地震動の予測について次のような提案を行ってきた（例えば野津，2010，地震学会秋季大会）。

①震源モデルとしては、海溝型地震において実測されるパルスの幅と調和的な（つまり小さめの）アスペリティの組み合わせからなる特性化震源モデルを用いること。

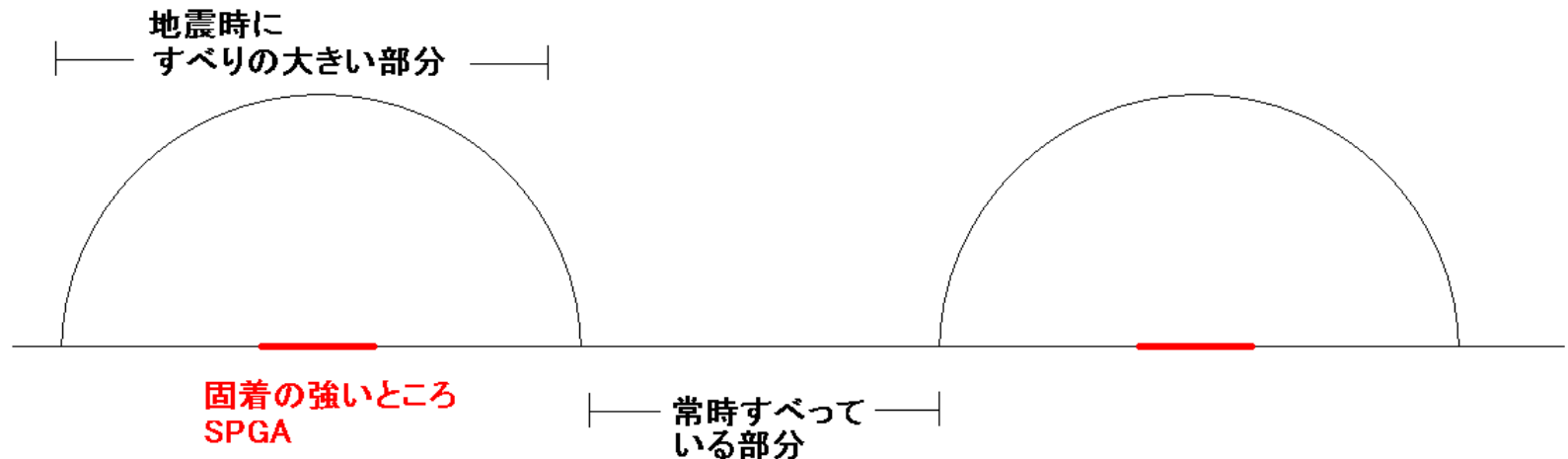
②計算手法としては、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を用いること。

同様のスキームがM9の地震に対しても適用可能であることがわかった。

※本研究のSPGAは松島・川瀬（2006）の提唱したスーパーアスペリティに対応するものであると考えられる。

SPGAについての解釈(以下は想像の域を出ない)

- ・固着域の中でも特に固着の強い部分
- ・おそらくは海山の潜り込みと関係



- ★固着の強い部分の「たがが外れる」ことによって、その外側にすべりの大きい領域が広がる.
- ★強震動は主に固着の強い部分から出る.
- ★長周期地震動(周期10秒以上, 波長40km以上)のインバージョンでは、すべりの大きい部分全体が見える.

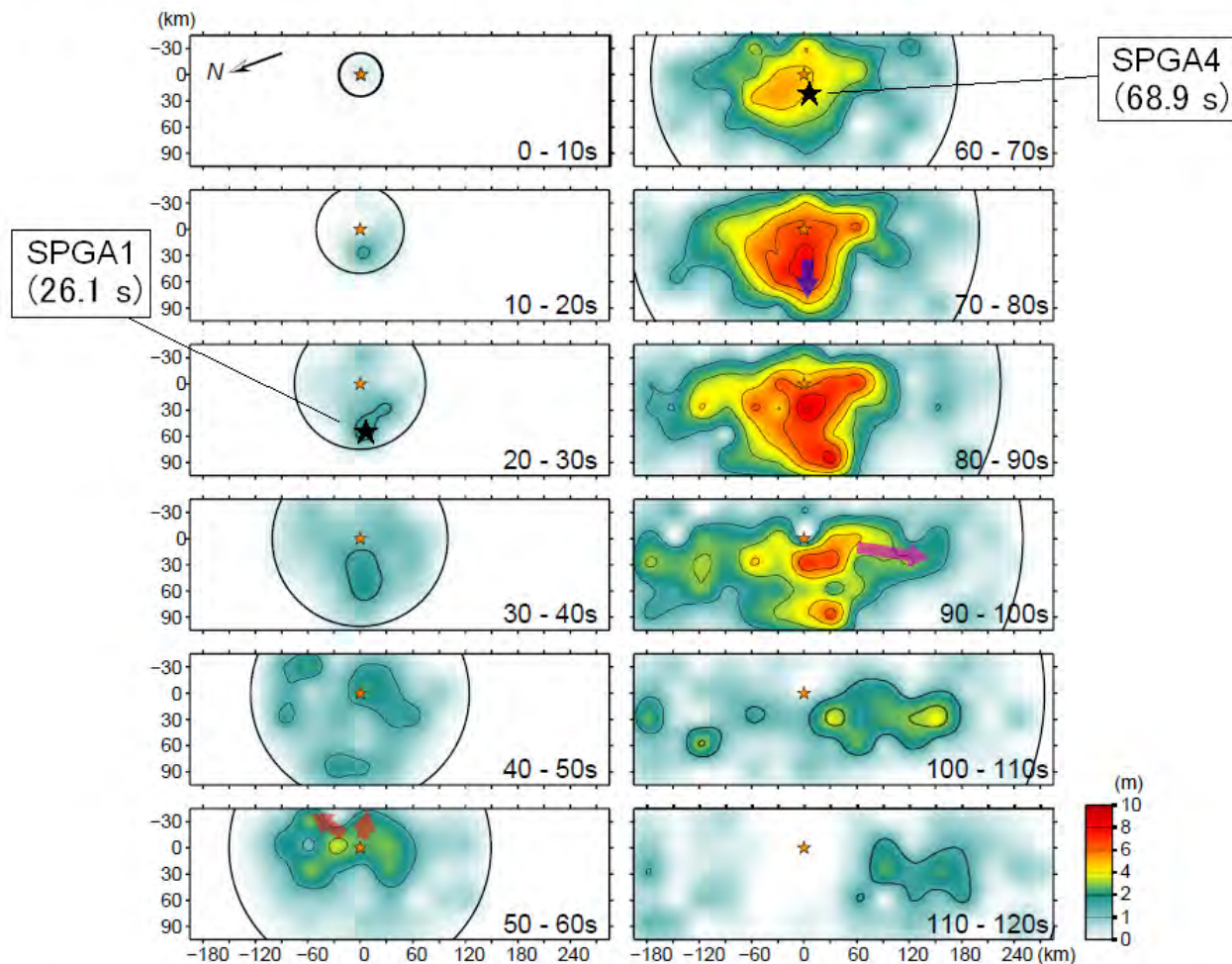
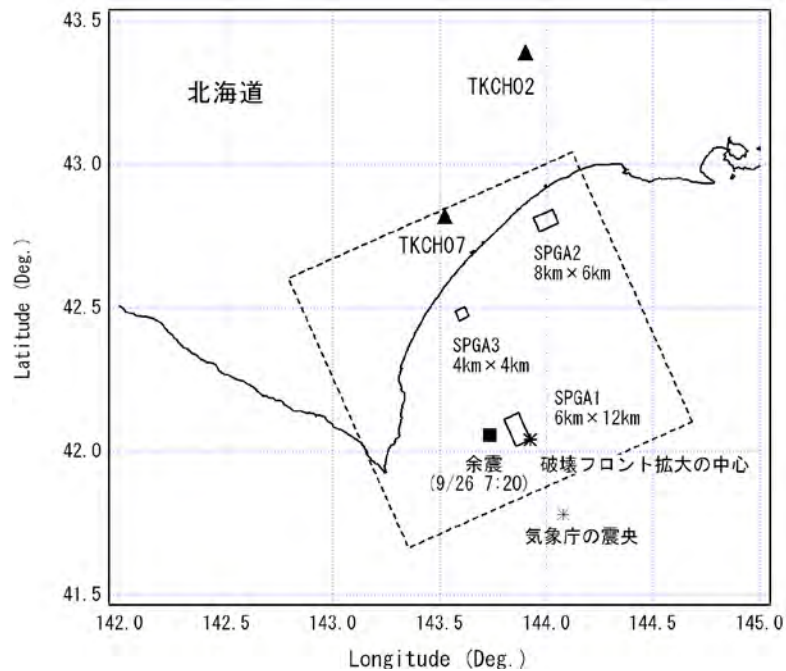
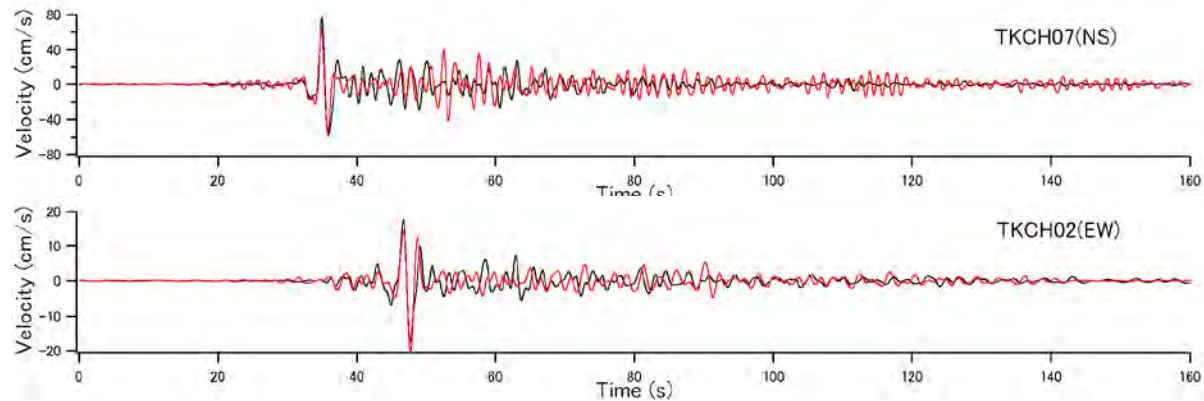


Fig. 9. Progress of the source rupture represented by snapshots of slip distribution of the joint inversion at every 10 s after rupture initiation at the JMA hypocenter (orange star). Black circles indicate rupture propagation at a speed of 2.5 km/s. Red, blue, and purple arrows schematically illustrate the propagation of three main ruptures.

Koketsu(2011)に加筆. SPGA4の破壊の後, 30秒ほどかけて, SPGA4の周辺で大きなモーメントが解放されているように見える.

SPGAモデルの系譜

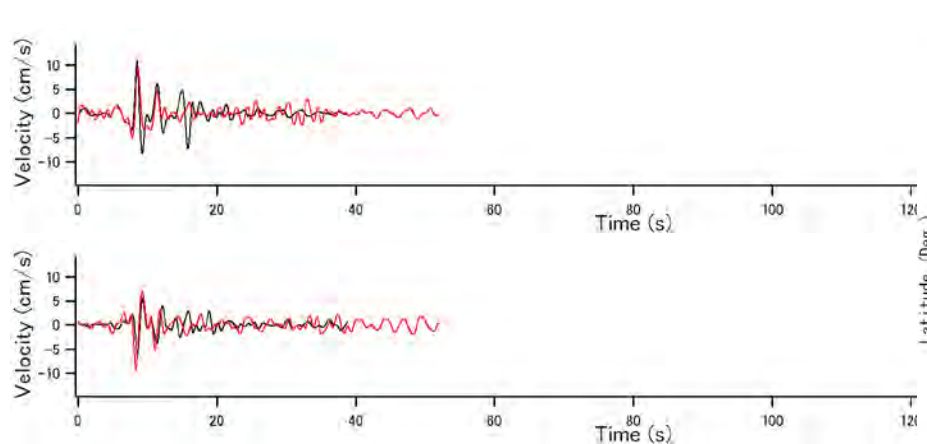
★ 野津(2006, 港空研資料)



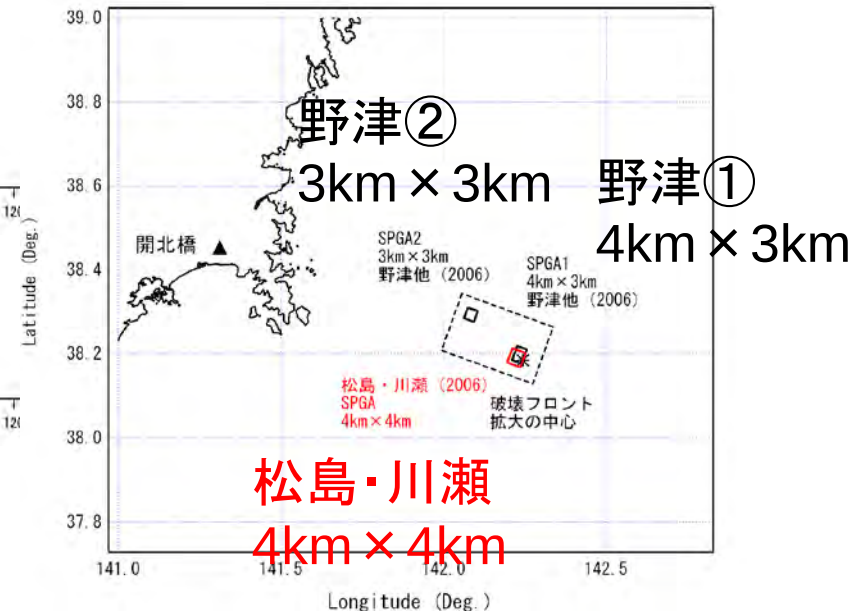
2003年十勝沖地震
速度波形(0.2-1 Hz)

SPGAモデルの系譜

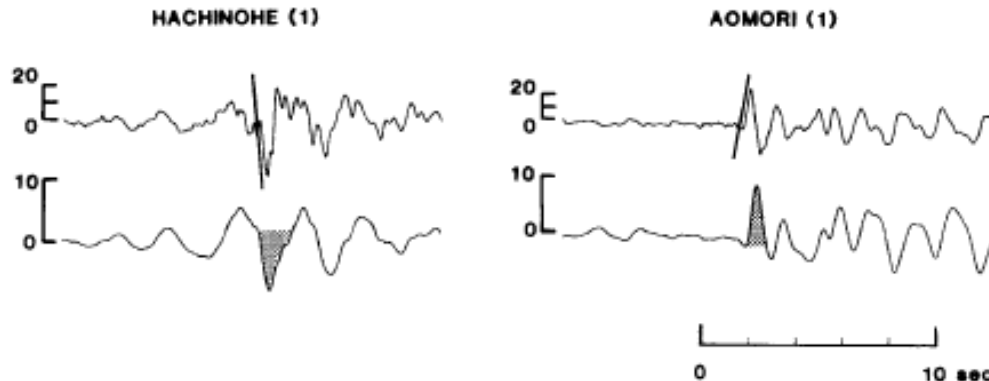
★松島・川瀬(2006, 月刊地球), 野津(2006, 港空研資料)



1978年宮城県沖地震
開北橋の速度波形(周期1-5秒)



★Mori and Shimazaki (1984, BSSA)



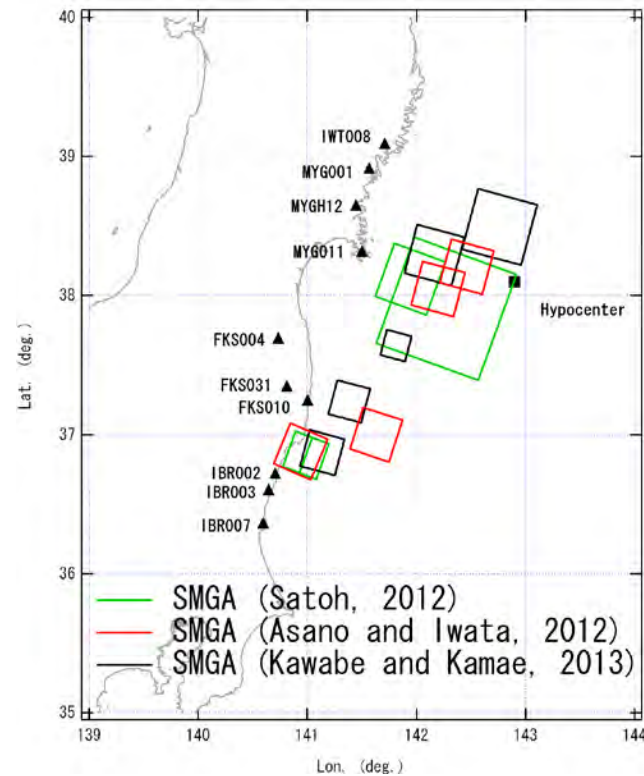
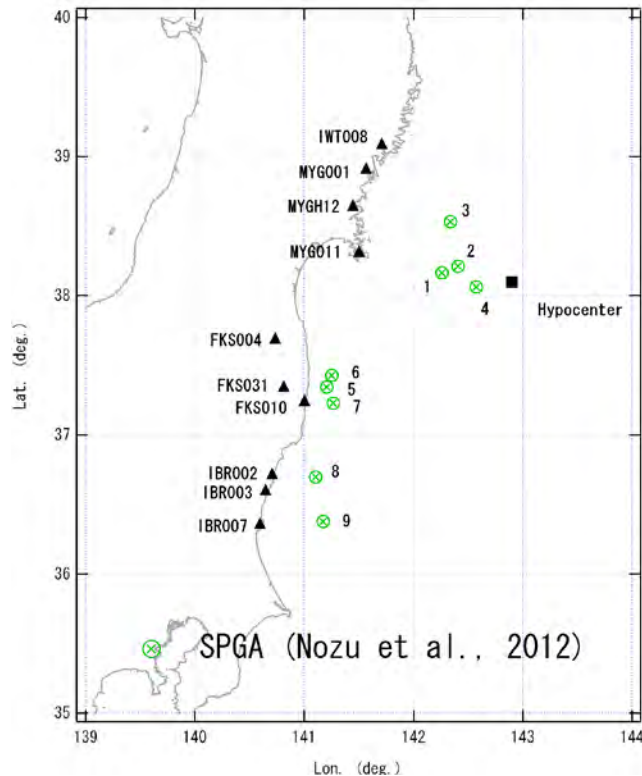
1968年十勝沖地震
速度波形および変位波形に含まれる顕著なパルスの時間幅が1.5～3秒であることに着目し、サブイベントの半径を2.9kmと推定している。

SPGAモデル

東北地方太平洋沖地震をはじめとする海溝型巨大地震において特徴的な強震動パルスのパルス幅と調和的なサイズのサブイベント(SPGA)から構成される震源モデルであり、サブイベントのサイズは対象地震の場合**一辺が数km程度**.

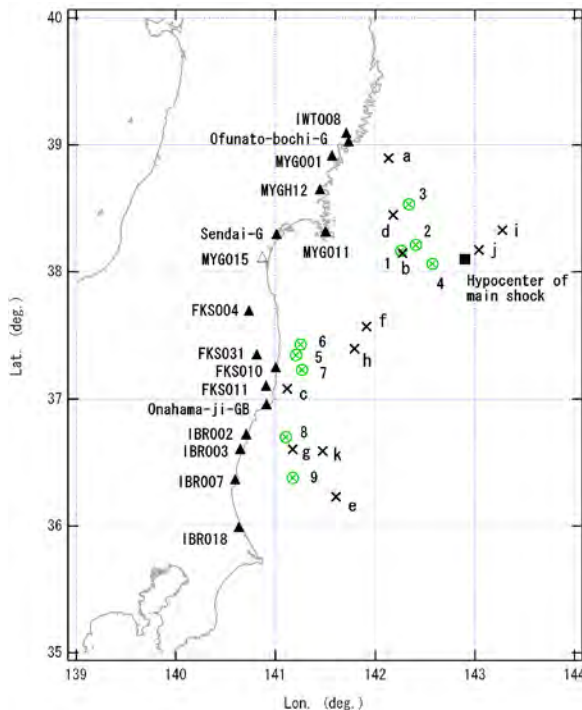
SMGAモデル

より広い領域(対象地震の場合、**一辺が数十km程度**)からまんべんなく強震動が生成されるとする震源モデル.



疑似点震源モデル

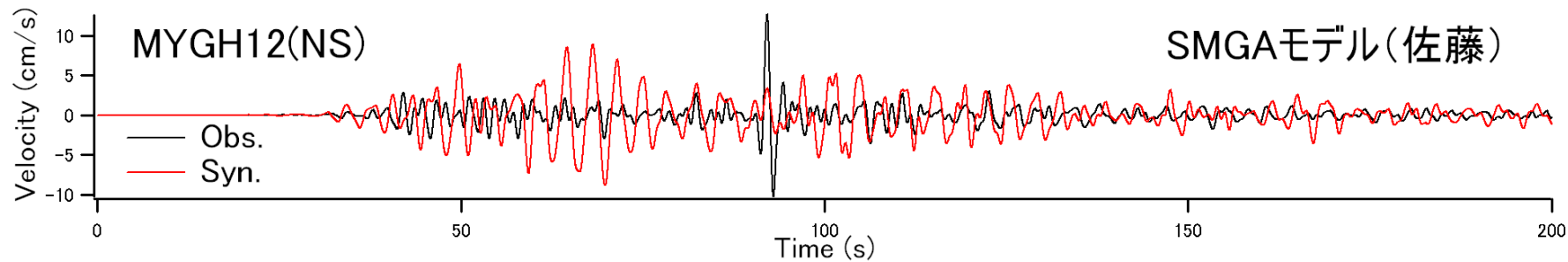
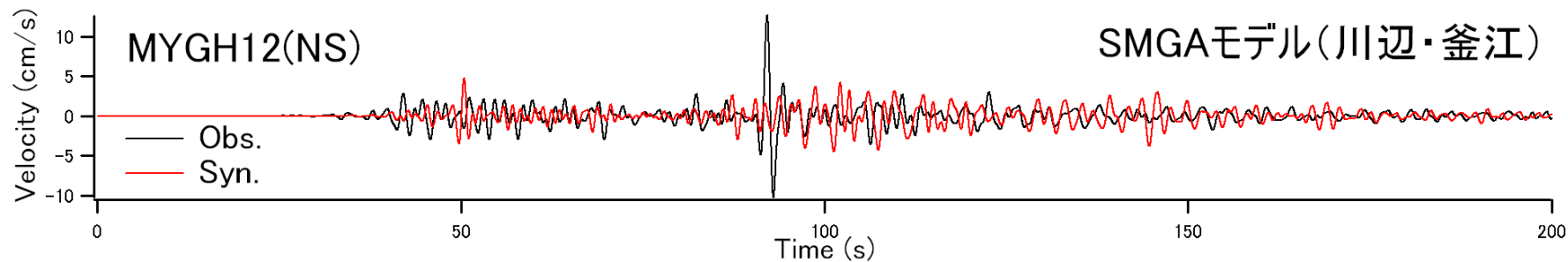
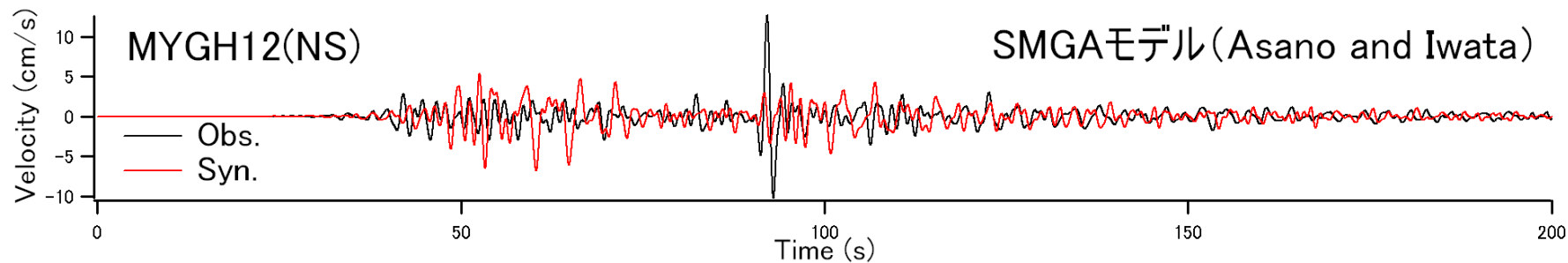
- ①サブイベントの破壊に起因する震源スペクトル $S(\omega)$ はオメガスクエアモデルに従うと仮定する.
- ② $O(\omega)=S(\omega)P(\omega)G(\omega)$
- ③これと対象地点における中小地震記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することにより、サブイベントからの地震動の時刻歴波形が求まる.
- ④すべてのサブイベントについて和をとる.



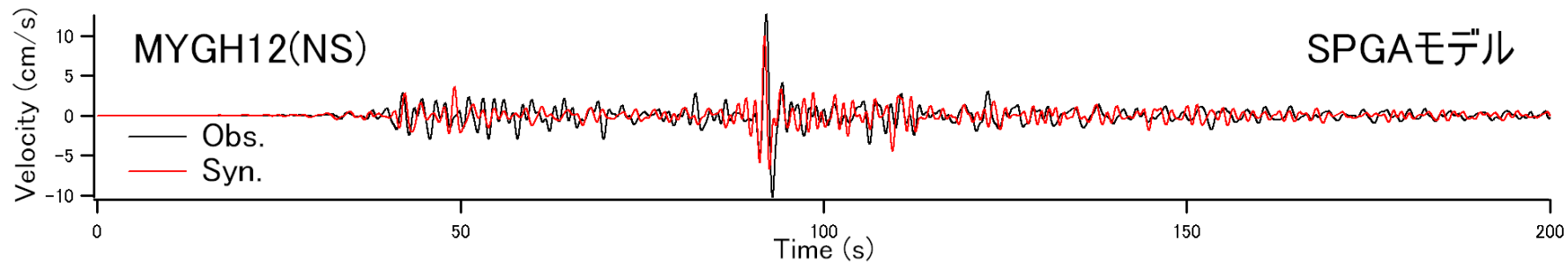
	Rupture time (h:m:s)	Depth km	Moment Nm	Corner frequency Hz
Subevent 1	14:46:43.5	33.6	8.0E+18	1.05
Subevent 2	14:46:46.9	31.8	8.0E+18	0.74
Subevent 3	14:47:33.4	35.3	4.0E+18	0.91
Subevent 4	14:47:26.3	28.3	2.3E+19	0.79
Subevent 5	14:47:57.1	42.2	2.5E+18	0.74
Subevent 6	14:48:04.4	42.2	2.5E+18	0.74
Subevent 7	14:48:15.0	40.5	5.0E+18	0.74
Subevent 8	14:48:25.8	38.8	8.0E+18	0.53
Subevent 9	14:48:30.9	35.3	1.6E+19	0.37

代表的な地点での波形の計算結果
(0.2-1Hzの速度波形)

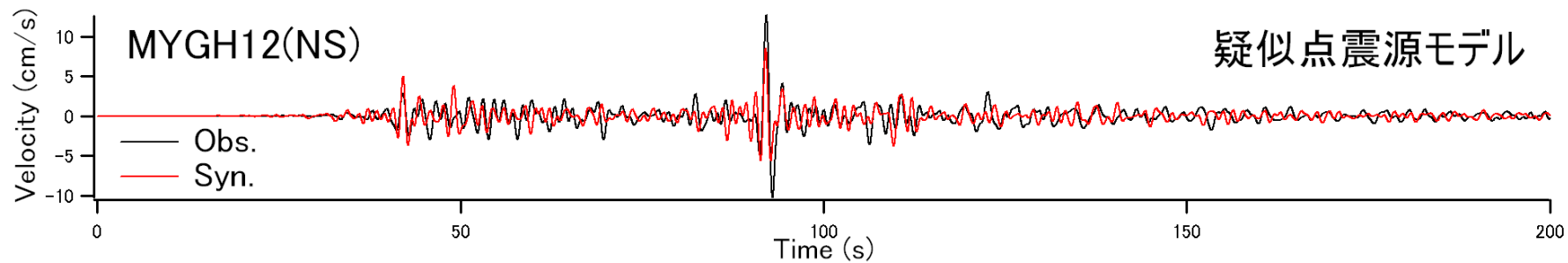
SMGAモデル



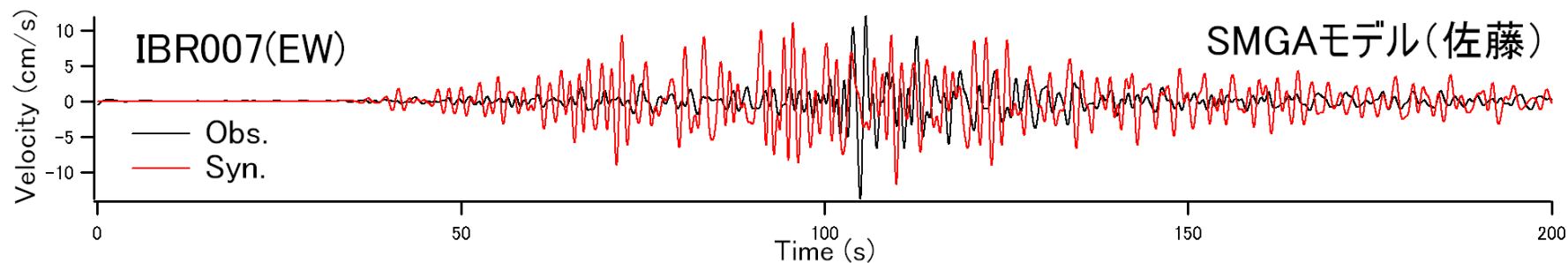
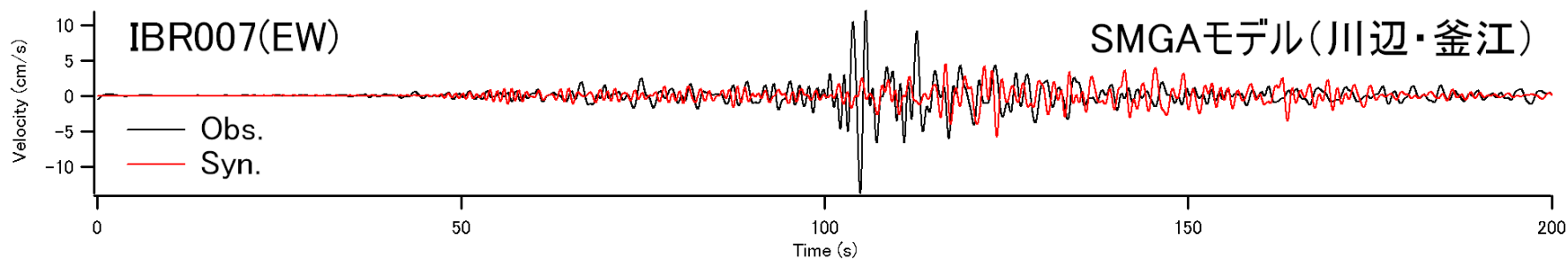
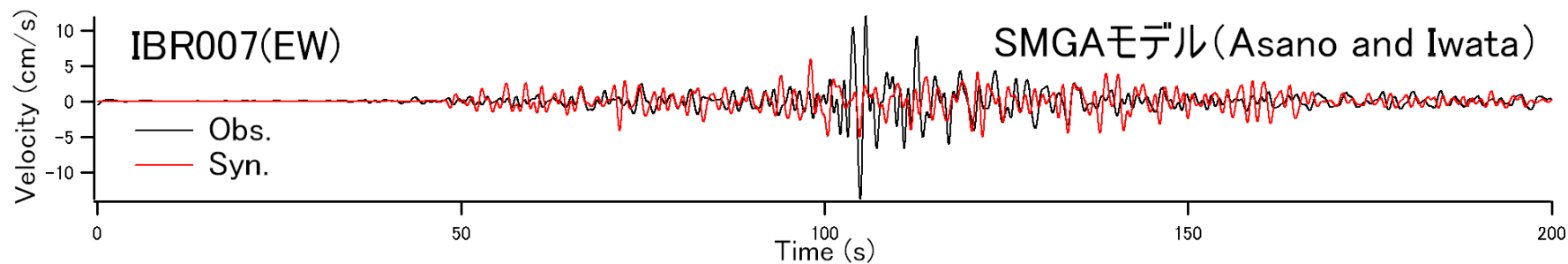
SPGAモデル



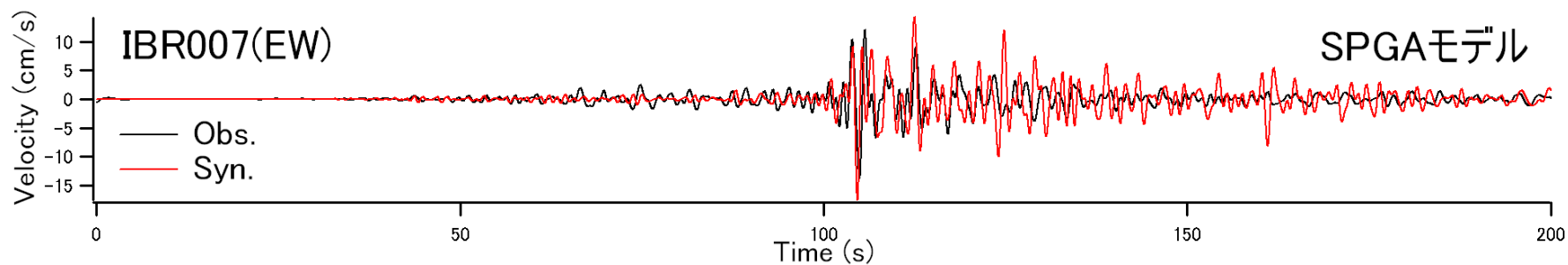
疑似点震源モデル



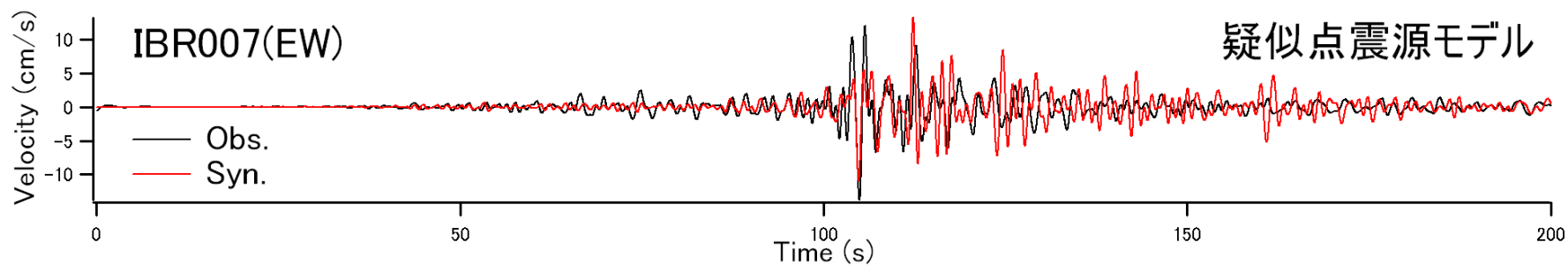
SMGAモデル



SPGAモデル

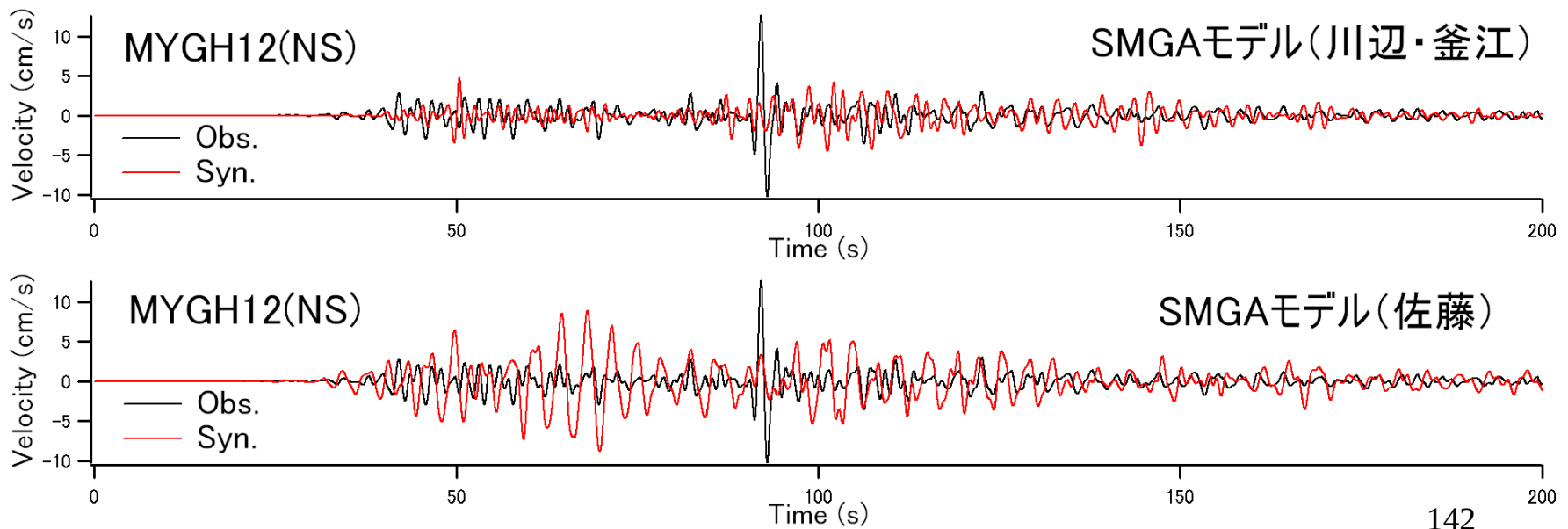


疑似点震源モデル



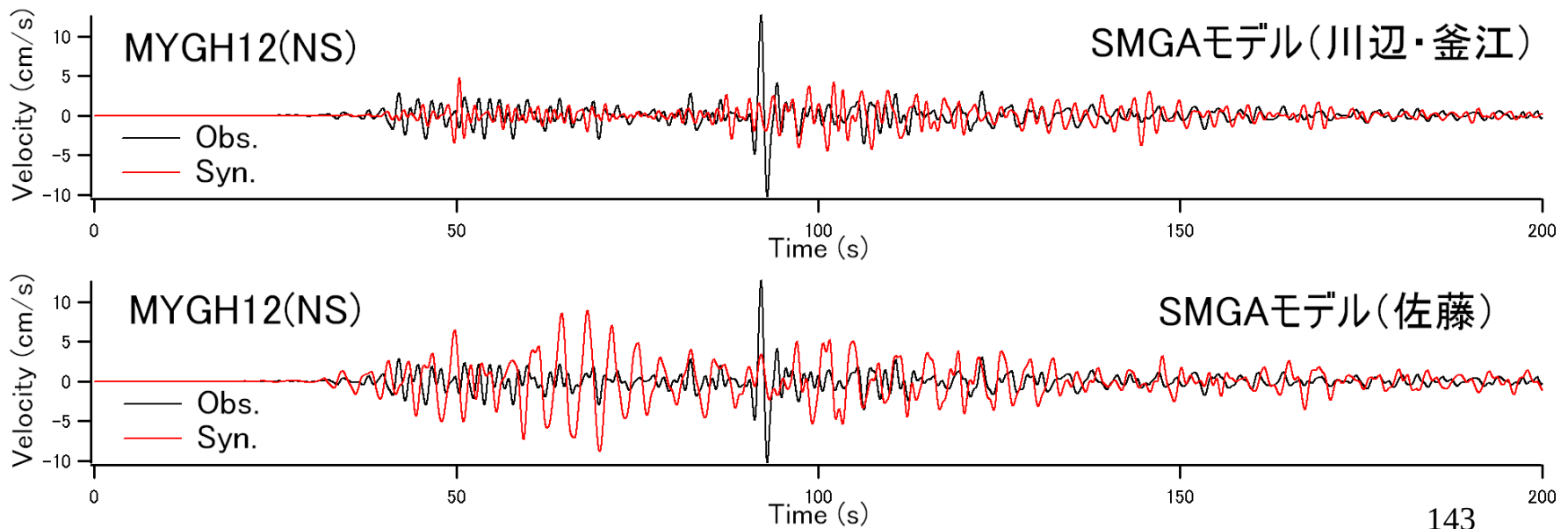
SMGAモデルで0.2-1Hzの帯域の地震動が上手く計算できない原因

※もともと、SMGAモデルやSPGAモデルの構築に用いられている入倉他の波形合成法では、低周波側では要素波がコヒーレントに重なり合ってパルスを生成し、高周波側では要素波がランダムに重なり合うように工夫されている。ただし、ここで言う「低周波」「高周波」がどの程度「低周波」「高周波」なのかが問題。



SMGAモデルで0.2-1Hzの帯域の地震動が上手く計算できない原因

※入倉他の方法で生成されるコヒーレントなパルスは、サブイベントのサイズに起因した時間幅を持っている。この時間幅に対応したコーナー周波数(patch corner frequencyと呼ばれる)よりも高周波側では、入倉他の方法では、ランダムな波形が生成される。サイズの大きいSMGAモデルにおいては、patch corner frequencyは0.1Hz程度あるいはそれよりも低周波側となるので、0.2-1Hz程度の帯域はランダムな波形にしかならず、この帯域にコヒーレントなパルスを生成することは不可能である。



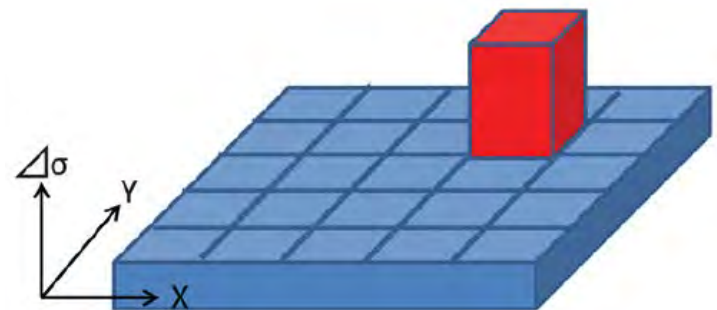
まとめ

※SMGAモデルは、工学的に最も重要と考えられる周期帯域の地震動を精度良く計算することに成功しなかったと評価せざるを得ない。

※その原因もはっきりしている。

※現時点では、この帯域の地震動を一定の精度で計算できることが確認されている震源モデルはSPGAモデルと疑似点震源モデルだけである。

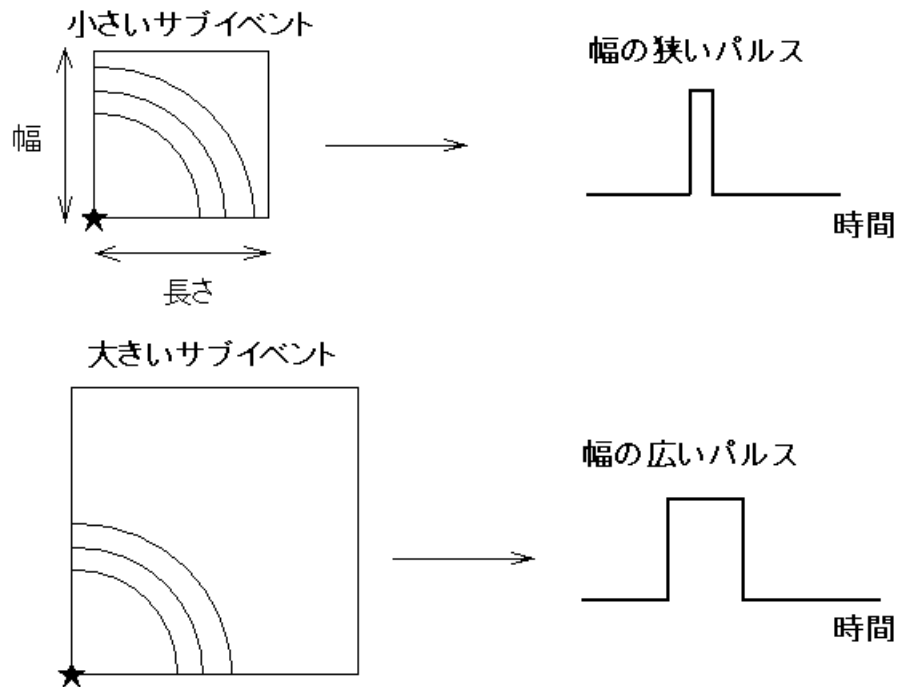
※一般的な構造物の耐震検討に用いる地震動を評価するための震源モデルとしてはSPGAモデル(または疑似点震源モデル)が適していると考えられる。



SMGAモデルに関する将来展望
(Kurahashi and Irikura, 2013)¹⁴⁴

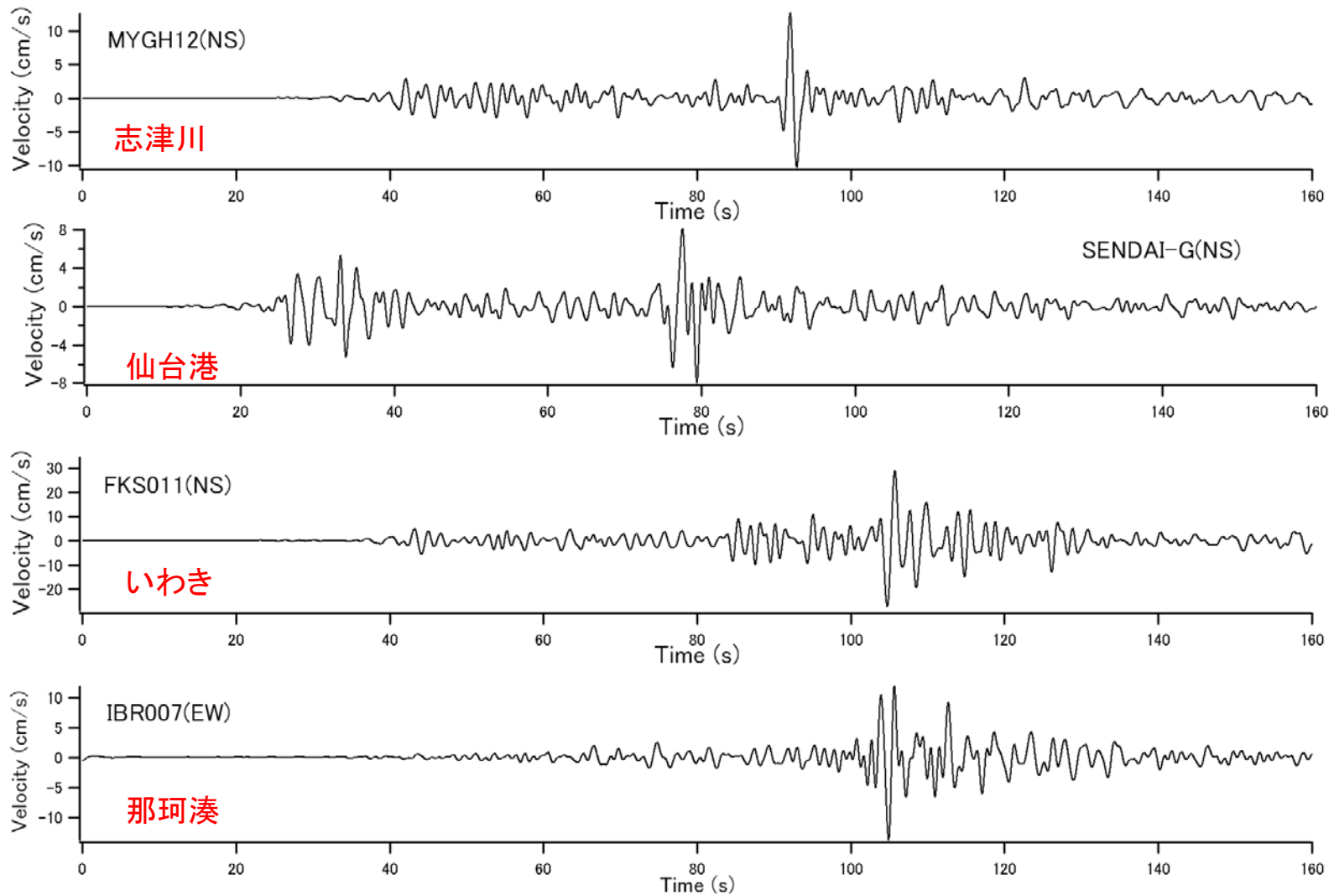
SPGAモデルの作成手順

- ①サブイベントの位置については走時から設定(SMGAモデルの場合と同じ)
- ②サブイベントのサイズについては, パルスの幅が再現されるように設定する(釜江・入倉, 1997, 日本建築学会構造系論文集). ← $V_r=3.0\text{km/s}$ とした



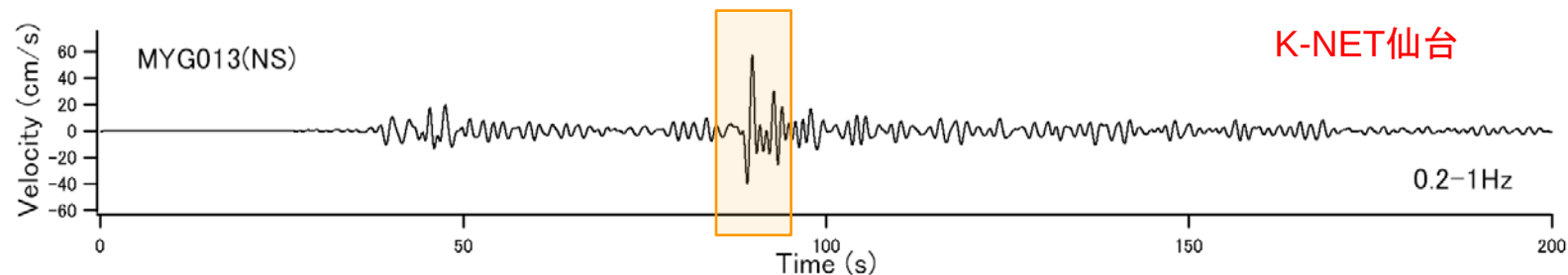
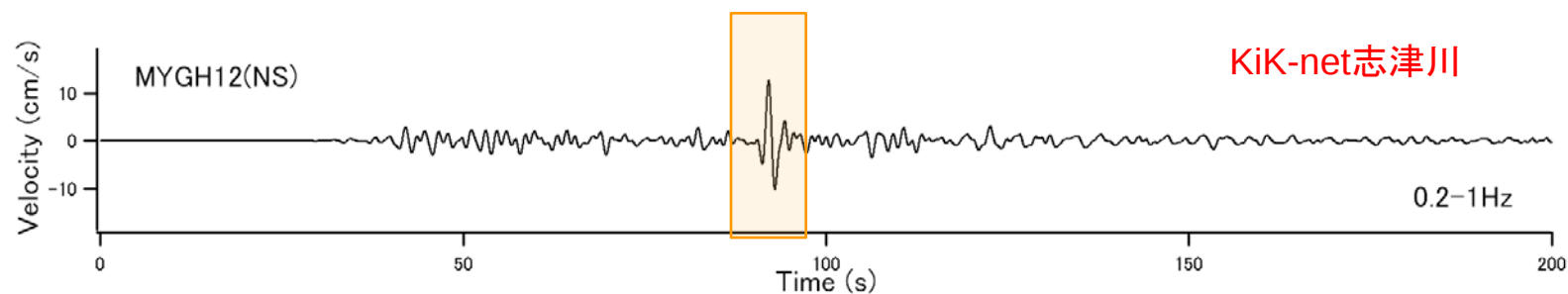
- ③波形の計算には修正経験的グリーン関数法(古和田他, 1998; 野津他, 2009)を用いた.

2011年東北地方太平洋沖地震による強震動パルスの例



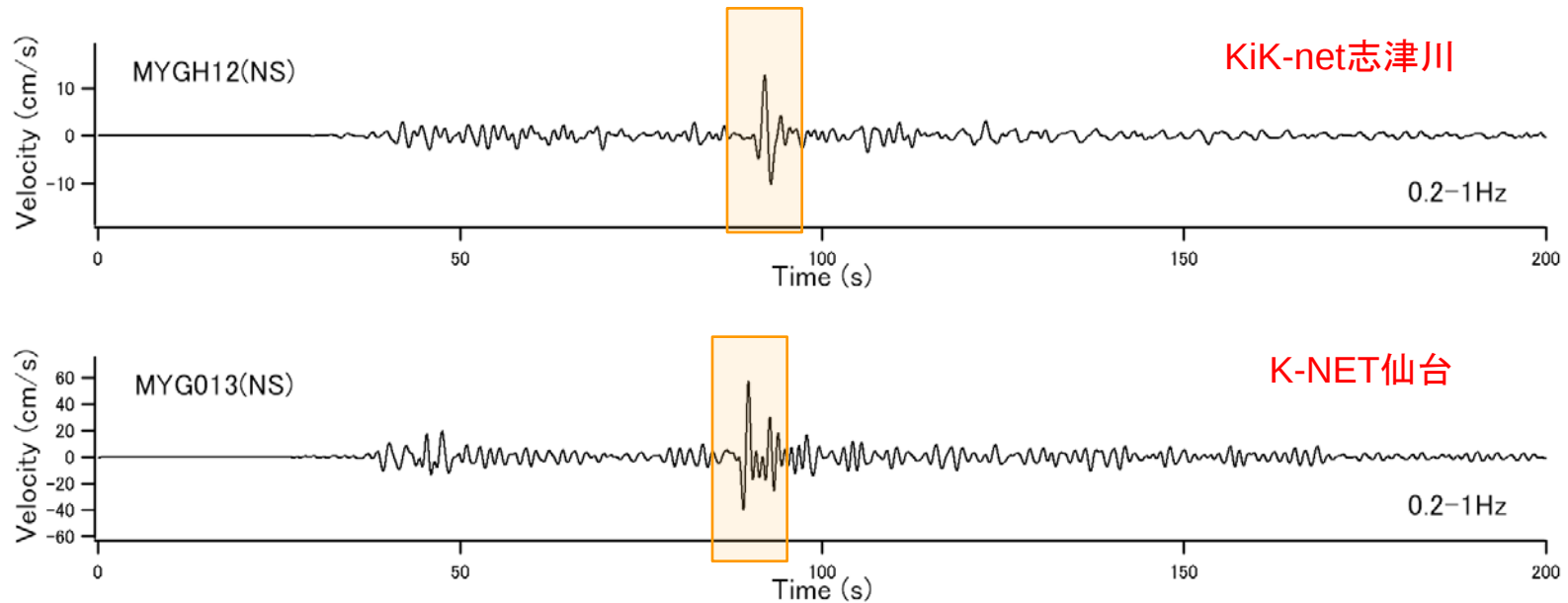
速度波形(0.2-1 Hz)

東北地方太平洋沖地震の際に観測された強震動パルスの例



さらに周期1秒以下をカット

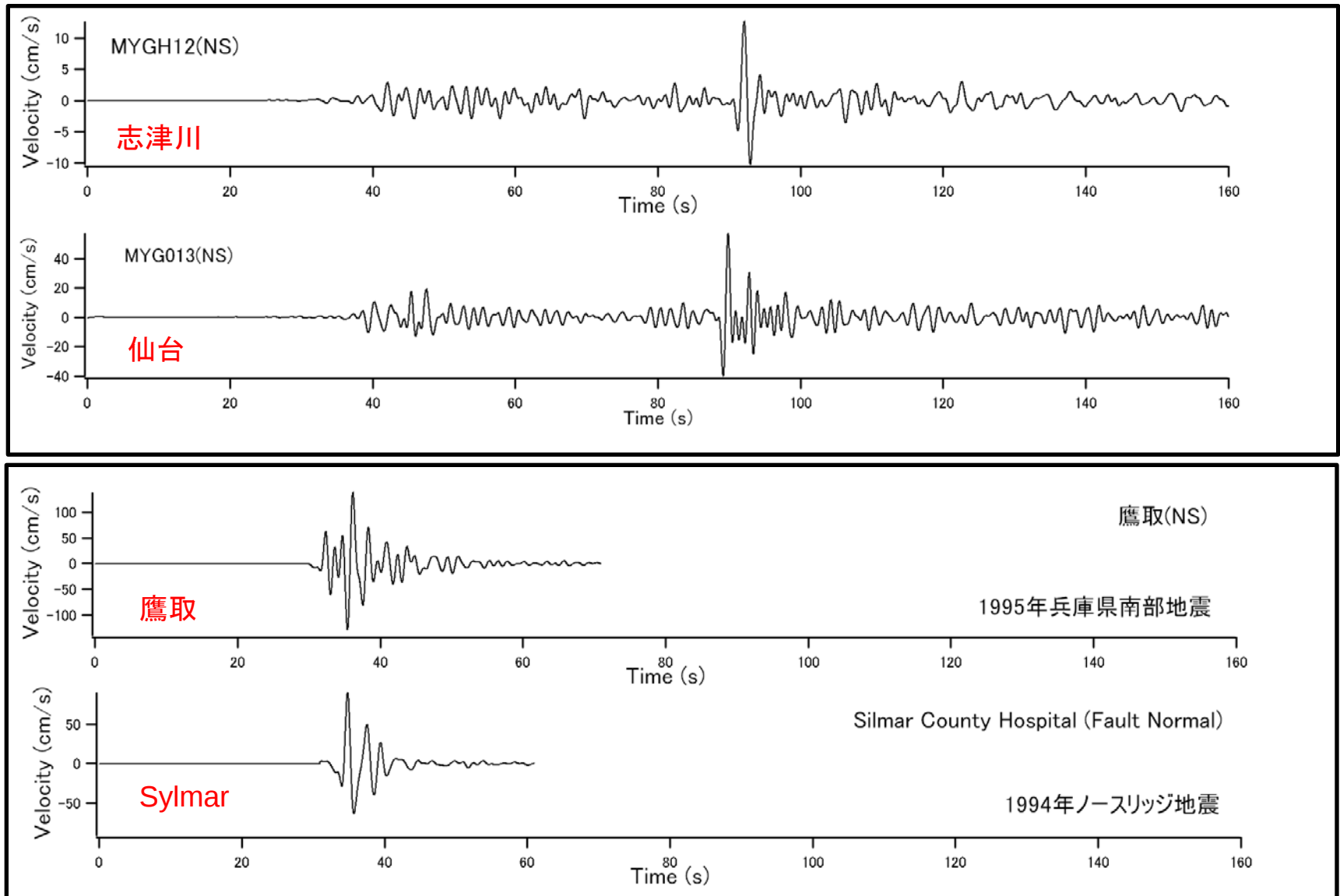
東北地方太平洋沖地震の際に観測された強震動パルスの例



さらに周期1秒以下をカット

●周期1-5秒の帯域の波形は離散的な複数のパルスから構成されていると言っても過言ではない。

海溝型巨大地震と内陸地殻内地震の強震動パルスの比較



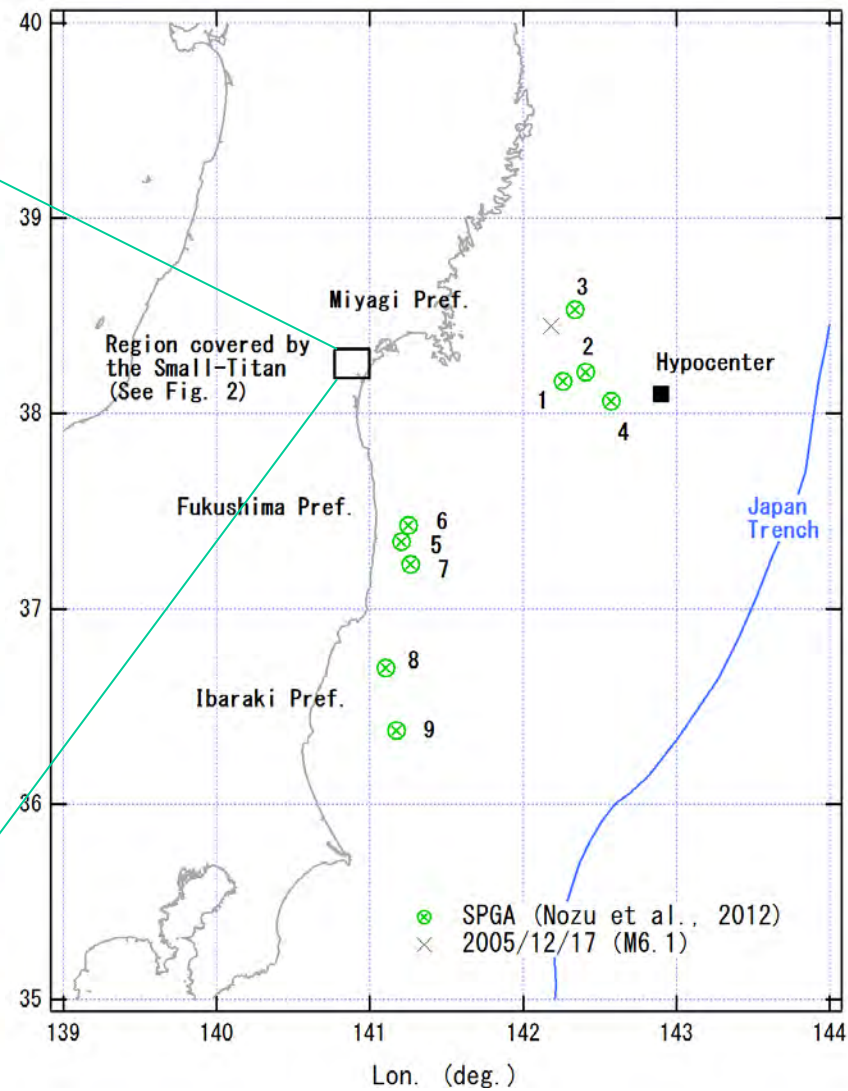
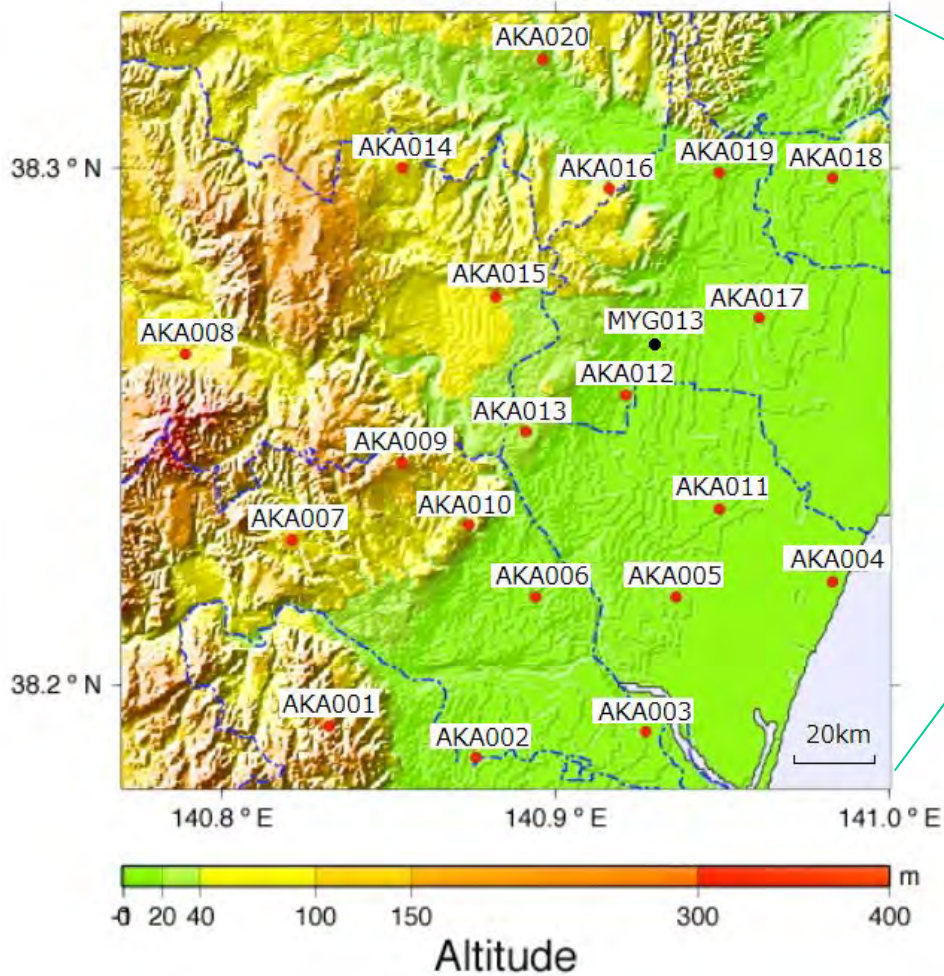
※スケールを考えれば奇妙なことではあるが....

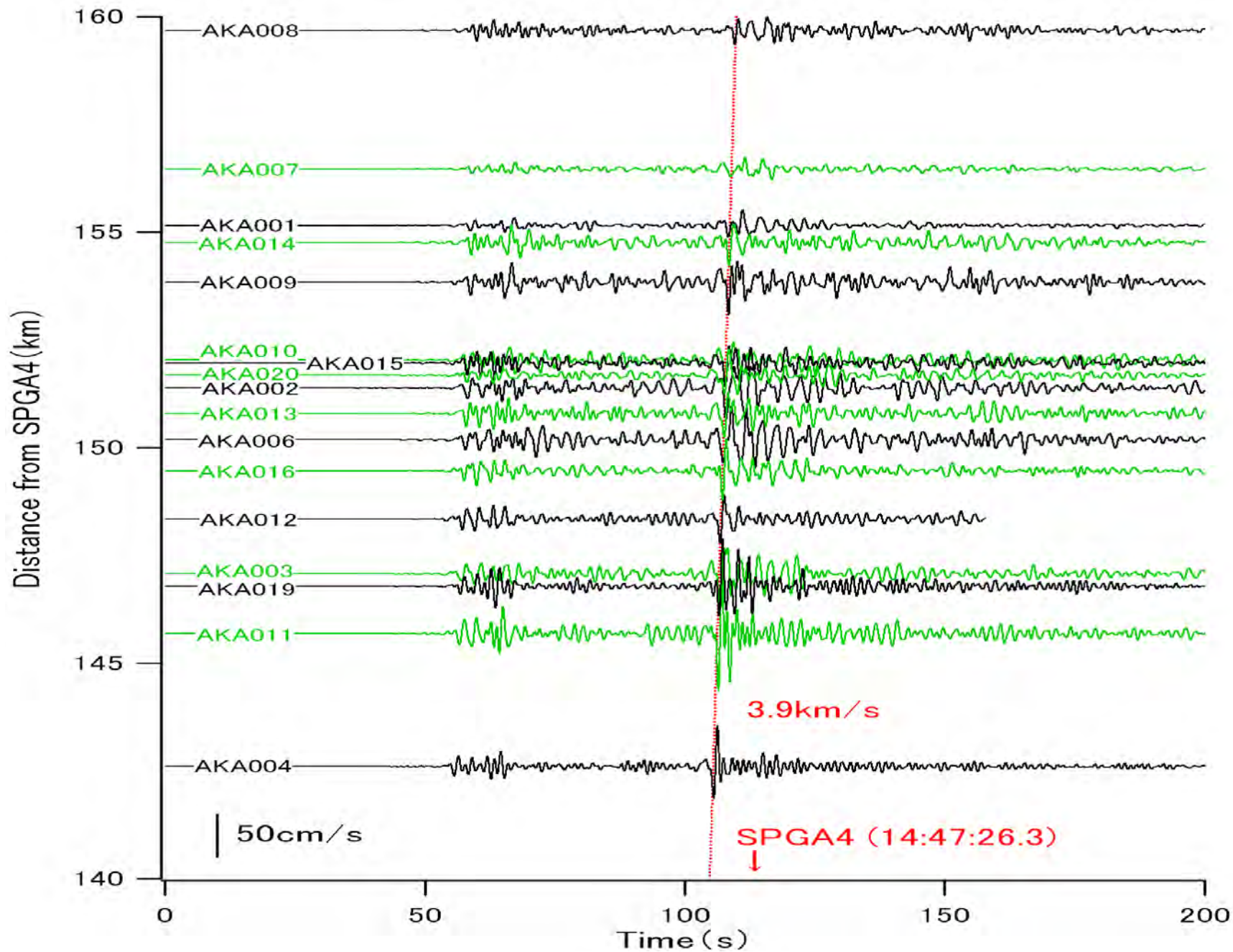
○大野他(2012)は仙台市内の17地点における速度波形(ほぼNS成分)を示している. それによると, 地点によっては堆積層による後続波群の発達が見られるが, 最大速度は全ての地点で第二波群先頭のパルスで決まっている.

○同様のパルスは東北工業大学のSmall-Titanによっても捉えられている.

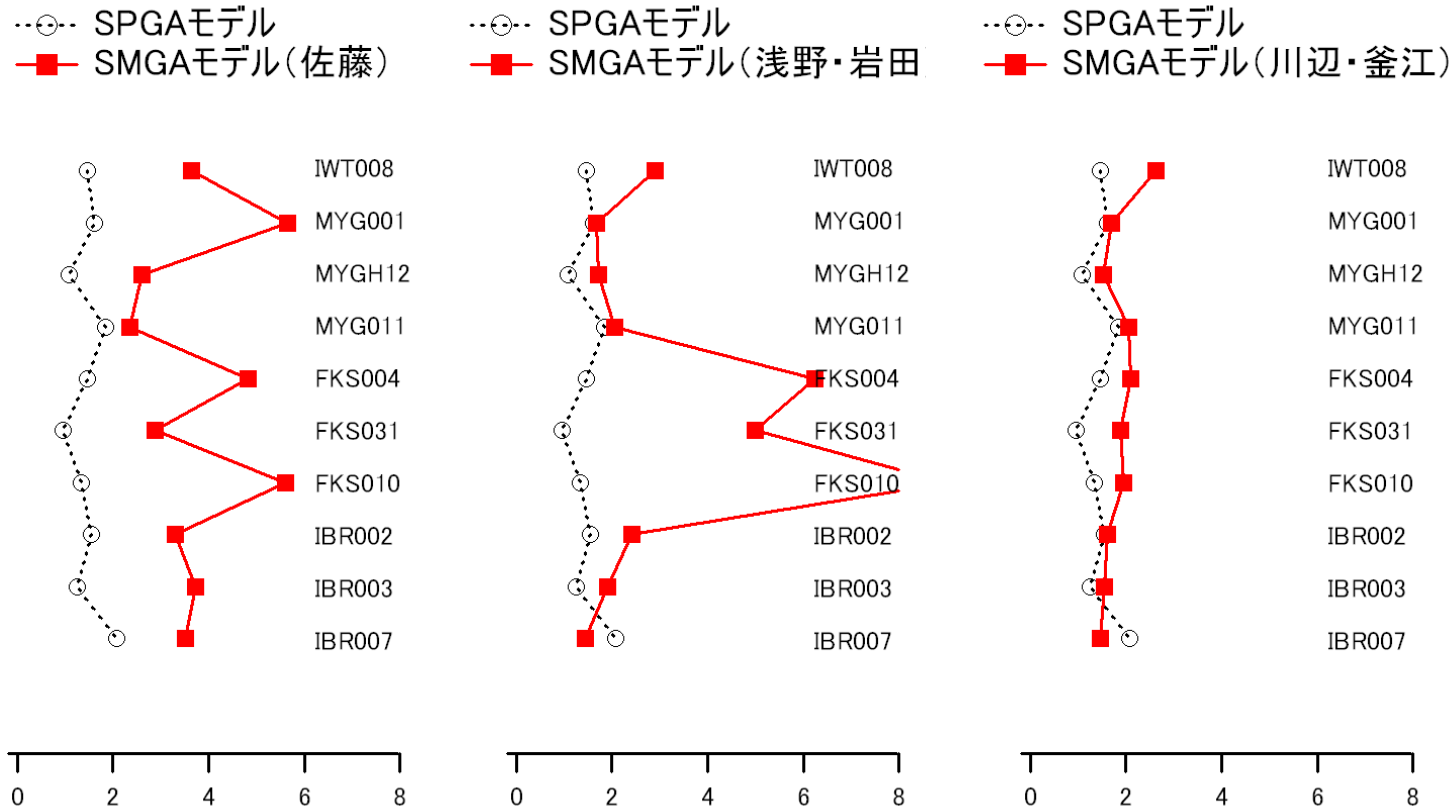
Small-Titan

• Observation Point



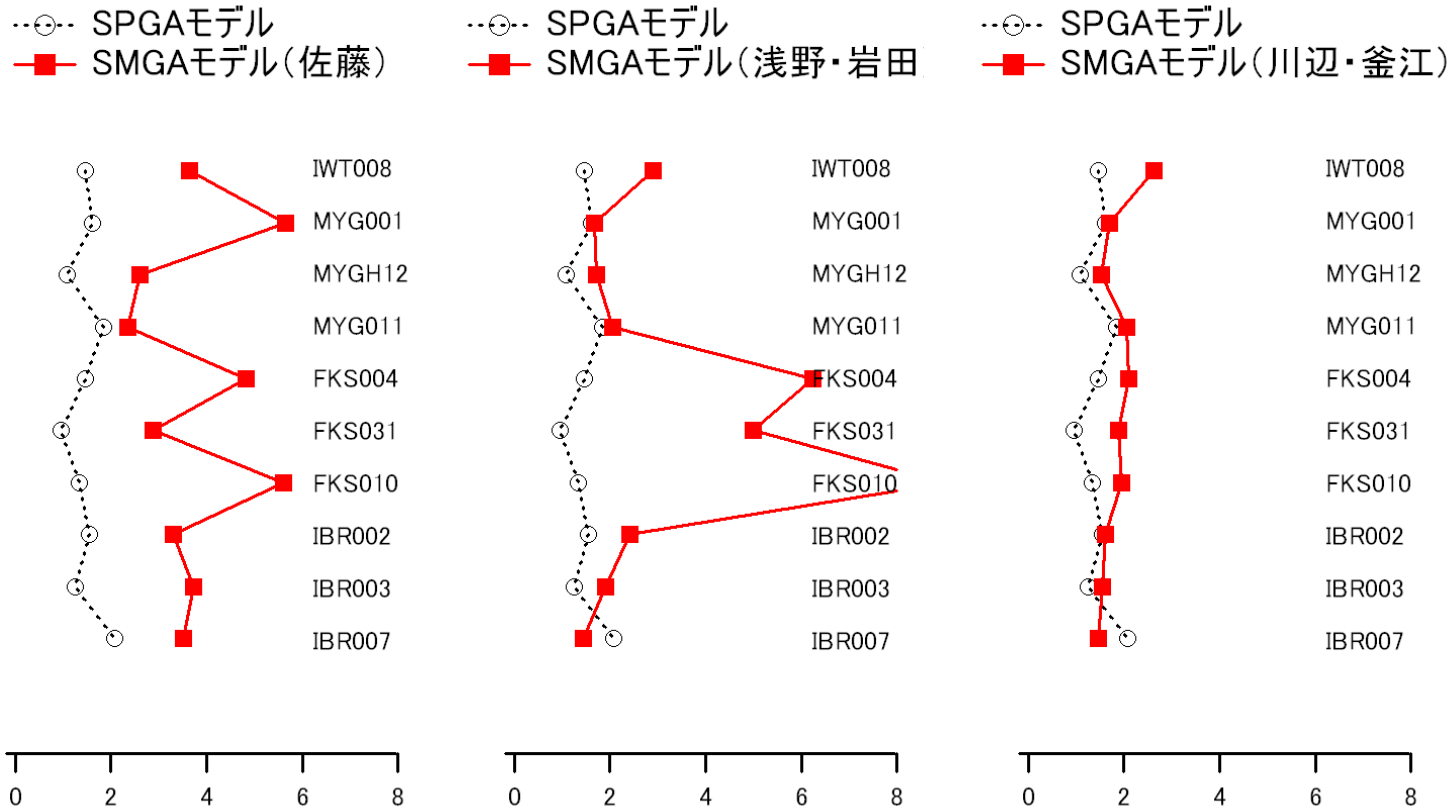


速度波形（0.2-1Hz）の誤差



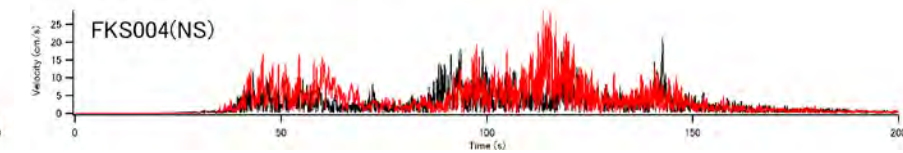
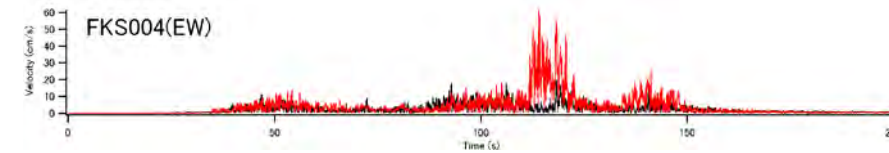
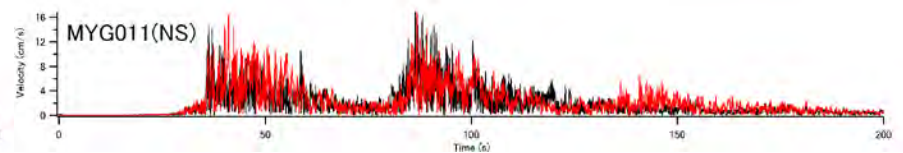
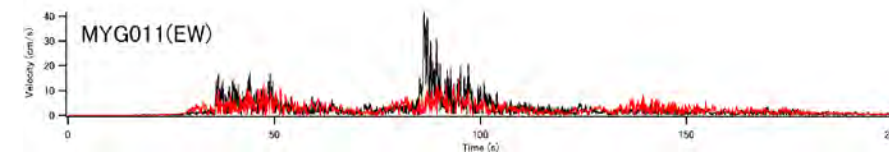
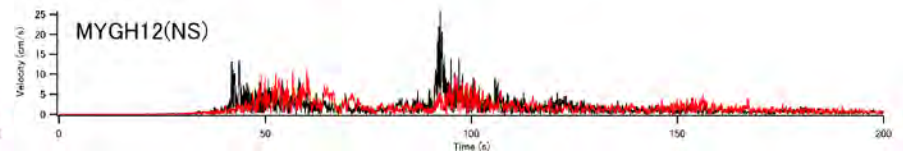
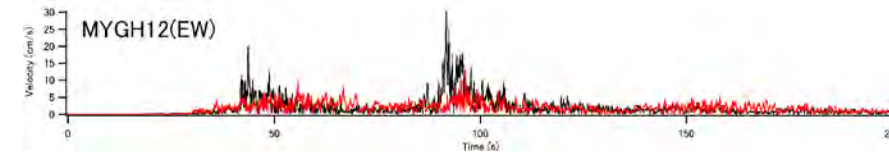
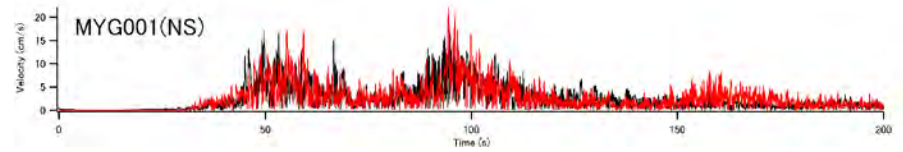
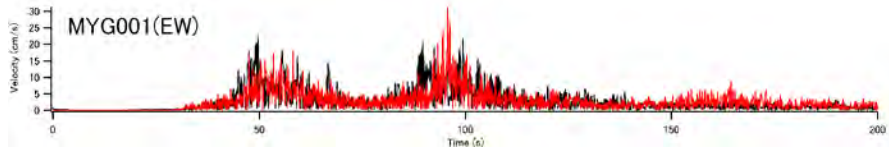
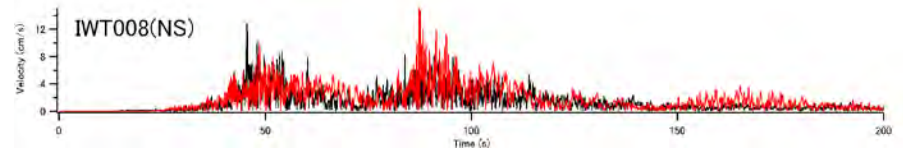
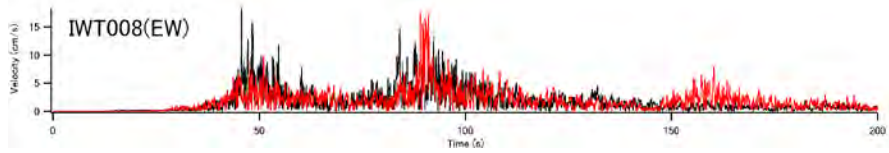
$$\int \left(v_{syn}(t) - v_{obs}(t) \right)^2 dt$$

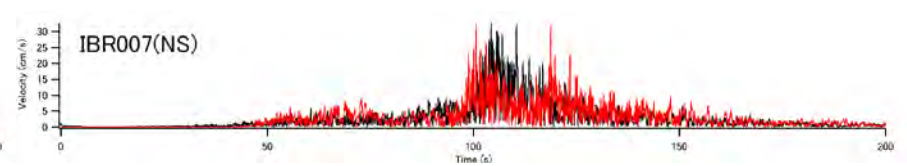
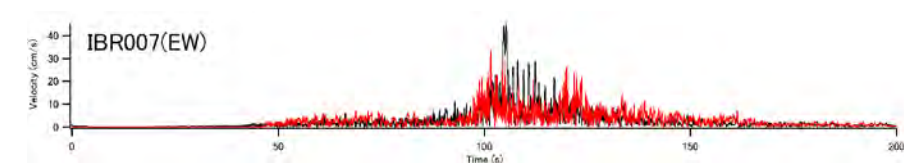
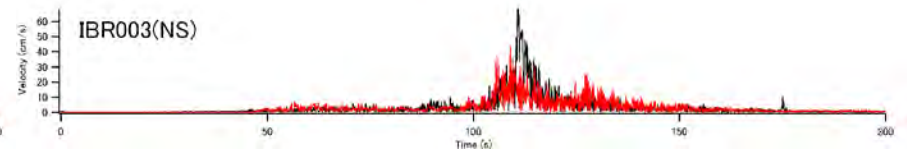
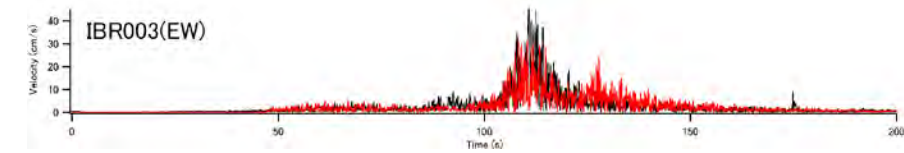
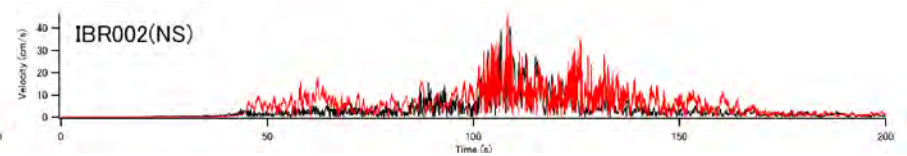
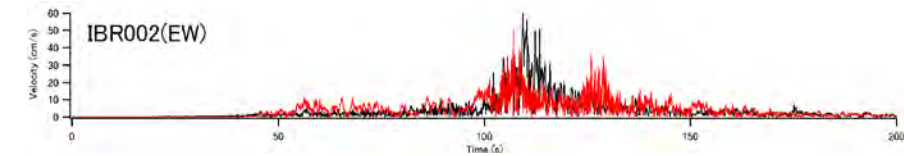
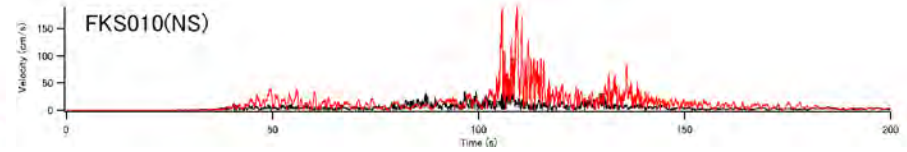
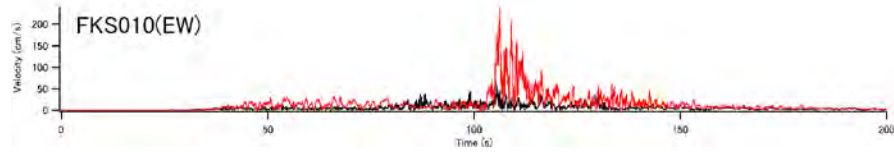
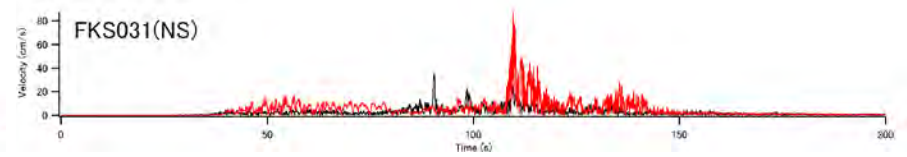
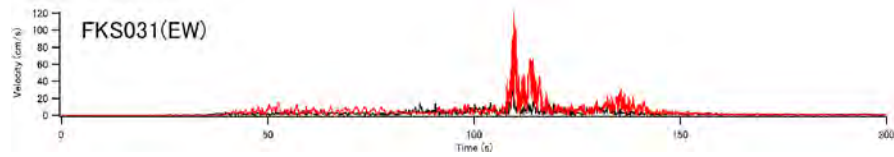
速度波形 (0.2-1Hz) の誤差



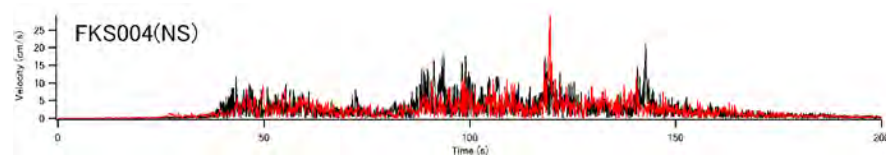
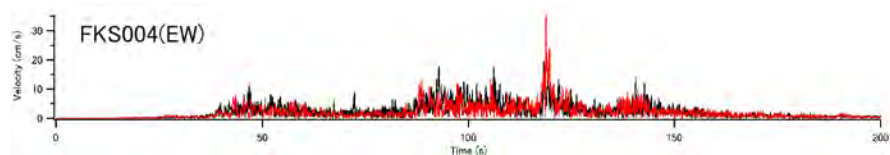
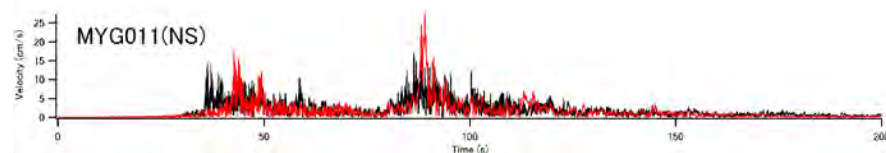
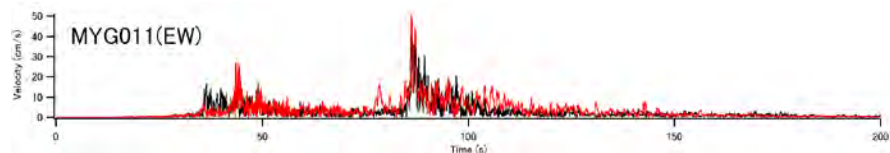
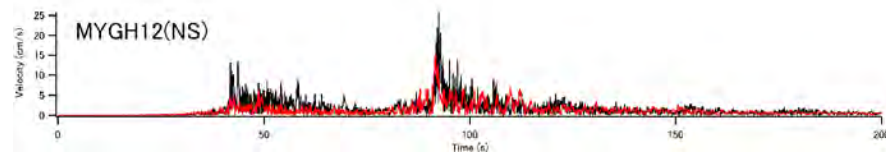
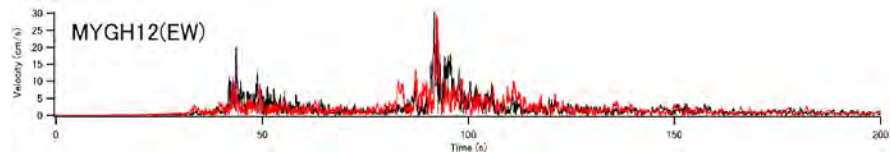
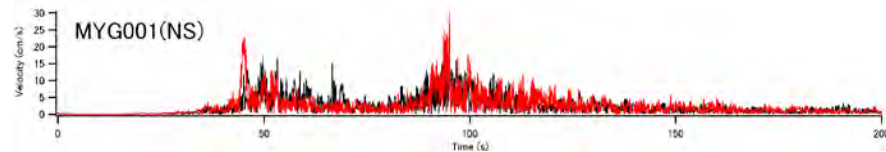
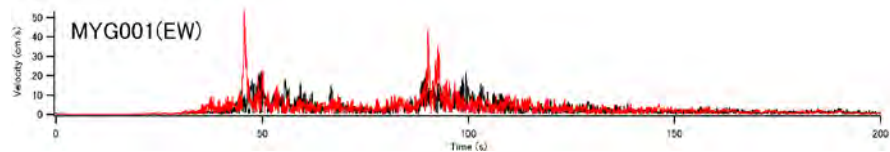
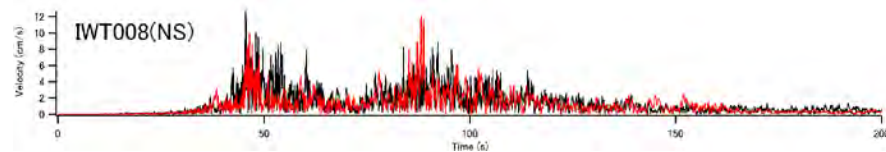
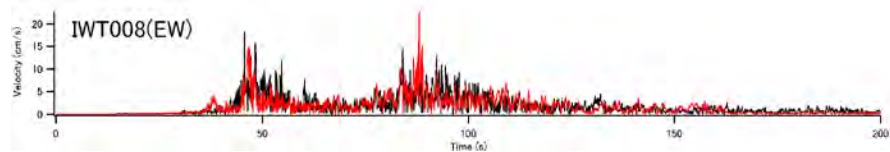
- ・ 佐藤のSMGAモデルは全般に誤差が大きい
- ・ Asano and IwataのSMGAモデルは福島県で誤差が大きい
- ・ SMGAモデルの中では、川辺・釜江のものが、最も誤差が小さい。しかし、SPGAモデルおよび疑似点震源モデルと比較すると誤差が大きい。 154

— 速度envelope (0.2-10Hz) —

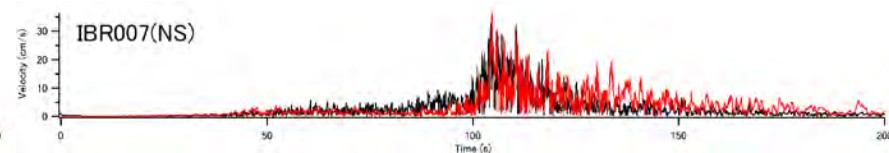
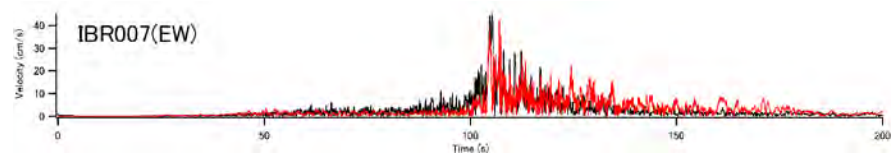
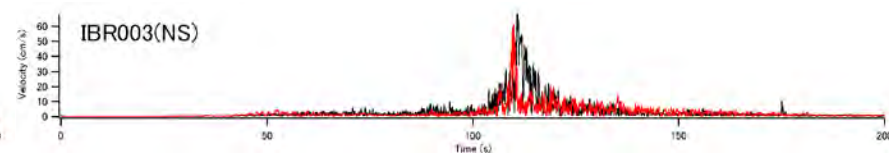
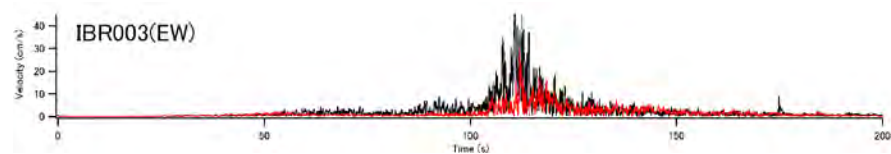
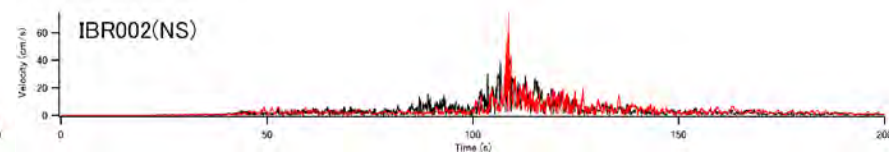
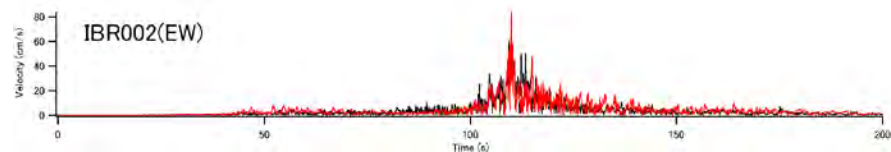
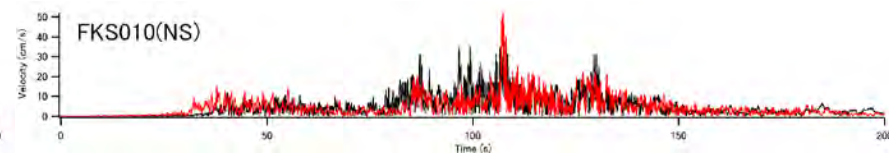
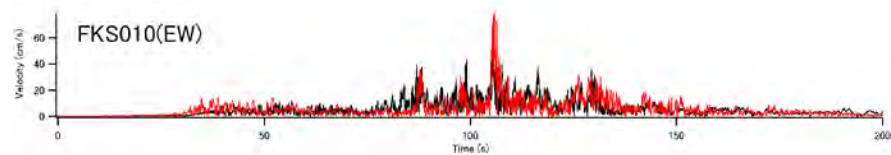
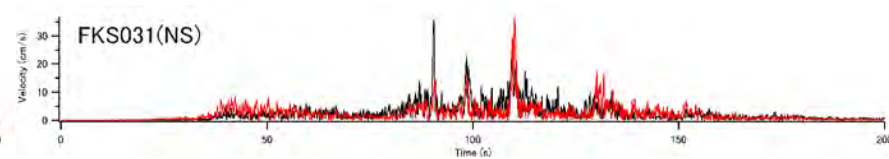
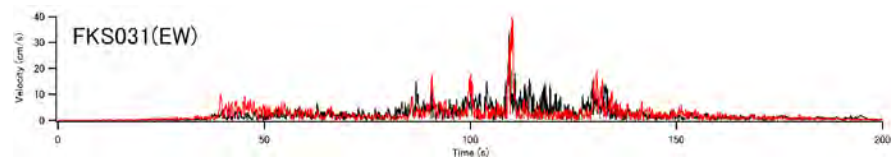




SPGAモデル



SPGAモデル



強震動研究の現在の到達点，将来予測の限界について

強震動研究により、何ができ、何ができないか

実際に起こった地震に関する事後の分析	今後に起こりうる事象の予測
大きく発展	まだまだ発展途上の段階

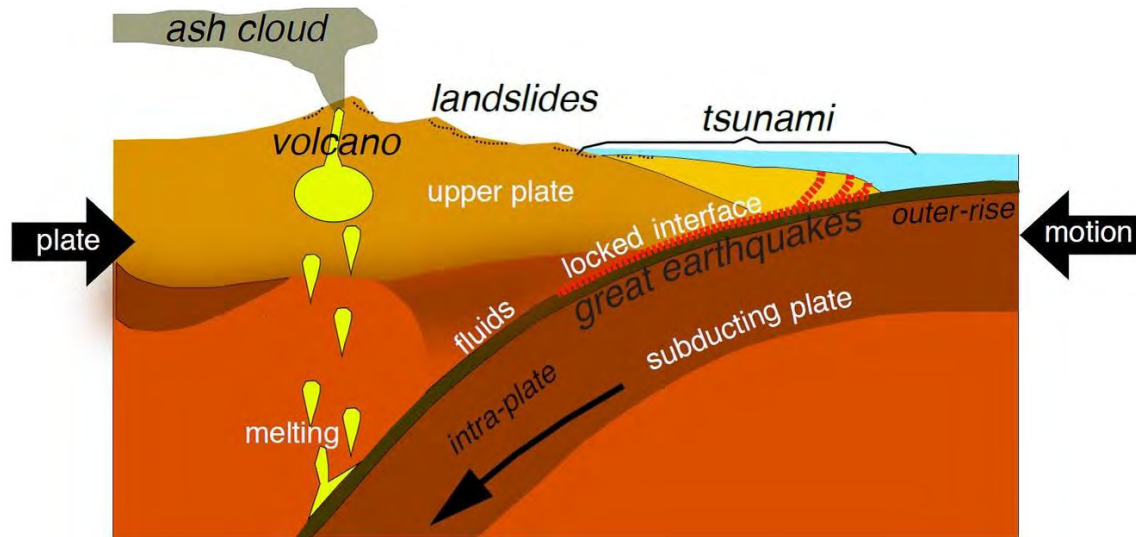
※強震動研究の成果によって原子力発電所の安全性が保証できるほどこの分野の研究が成熟してはいない。

強震動研究の発展の経緯

※強震動研究だけでなく、地震学そのものが若い学問.

※現代の地震学が依拠しているプレートテクトニクスが発展したのは1960年代後半以降.

※石橋(2015)が指摘しているように、1966年に福島第一原発の1号機の設置が許可されたとき、その沖合にプレート境界があり足元に太平洋プレートが沈み込んでいることに誰も気付いていなかった.



(USGSのホームページより)

強震動研究の発展の経緯

※強震動研究は若い学問

→被害地震が起こる度に、それ以前の知見では予測できなかったような事態が生じ、それによって強震動研究の知見は塗り替えられてきた。

※1995年兵庫県南部地震

・この地震がもたらした強い揺れとそれによる大被害は当時の専門家の想像を大きく越えるものであった。

・神戸市内で観測された最大加速度800Gal, 最大速度100kineといった強い揺れは、それ以前の土木構造物の耐震設計で考慮されていた地震動レベルよりもはるかに大きいものであったため、これをきっかけとして土木構造物の耐震設計に用いられる設計地震動は大きく改められた(土木学会, 1995;1996)。

強震動研究の発展の経緯

※2011年東北地方太平洋沖地震

- ・この地震の発生以前は日本海溝においてM9クラスの巨大地震の発生は想定されていなかった(ゲラー, 2012; 松澤, 2012).
- ・2011年3月11日の時点で, 宮城県沖から茨城県沖にかけての日本海溝には, M9の地震がいつ発生してもおかしくない程度に応力とひずみが蓄積されていたことになる. この応力とひずみは一朝一夕に蓄積されたものではなく, 少なくとも500年程度の長い時間をかけて蓄積されたものと考えられる. 従って, 地震発生前の数十年程度は, M9の地震がいつ発生してもおかしくない程度に応力とひずみが蓄積した状態が継続していたと考えられるにも関わらず, そのことに誰も気付いてはいなかった. このことは, 巨大地震の「位置」と「規模」の予測がいかに難しいかを示している.
- ・なお, 日本海溝においてM9クラスの巨大地震の発生を想定できなかったという反省から, 南海トラフにおける想定地震の規模は東北地方太平洋沖地震と同等のM9クラスまで引き上げられた.

強震動研究の発展の経緯

※2016年熊本地震

- ・基本的に既に知られていた布田川・日奈久断層帯に沿って発生した地震ではあるが、この地震の発生以前に公表されていた地震調査研究推進本部による長期評価は地震規模を過小評価していた。
- ・地震後に確認された地表地震断層の長さをもとに地震調査研究推進本部の「レシピ」に従って評価された地震規模も実際のものを下回っていた(森川他, 2016)。
- ・これを踏まえて地震動予測手法をどのように改良すべきかの議論が続けられている。

強震動研究の発展の経緯

※これらに加え、1995年兵庫県南部地震から2016年熊本地震までの間にわが国で発生した規模の大きい内陸地殻内地震のうち

2000年鳥取県西部地震(M7.3)

2005年福岡県西方沖の地震(M7.0)

2007年能登半島地震(M6.9)

2007年新潟県中越沖地震(M6.8)

2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)

はいずれも事前に「その規模の地震がその場所で起こる」とは考えられていなかった地震である.

強震動研究の発展の経緯

※このように、強震動研究およびそれに関連する研究分野では、これまでの数十年間、被害地震が起こる度に、それ以前の知見では予測できなかったような事態が生じ、それによって知見が塗り替えられてきています。言い換えればパラダイムシフトが繰り返し起きています。

※したがって、今後も、少なくとも数十年間程度は、それ以前の知見を覆すような事態が度々生じるであろうと考えられます。これが、強震動研究の成果によって原子力発電所の安全性が保証できるほどこの分野の研究が成熟してはいないと考える理由です。

将来予測の限界

※強震動研究のリーダーの一人である地震学者の武村は、2011年の段階で、

「地震の発生予測が短期であろうが長期であろうが簡単でないことは誰の目にも明らかです。地震学者や国やマスコミは予測をあまりに楽観的に考えすぎていませんか。地震学者はもっと広い視野に立って、自分達の持つ不完全な知識をどのような方面でどのようにして社会に役立てることができるか、地震工学者をはじめ他分野の方々の知恵も借りながら真剣に考えるべきです」

と述べています(武村, 2011)。この指摘は現時点でもそのまま当てはまります。

将来予測の限界

※土木分野の耐震の専門家の間では

「入力地震動はどのみちよく分からないものだから、その部分を精緻に検討しても、設計の改善につながらないのではないか」

といった考え方が支配的です。

※例えば高橋他(2016)は

「地震や津波などの将来予測には、依然として圧倒的な不確実性を伴っており、現状の技術レベルでは、これらに対して確かな安全を保証することはできない」

と述べています。

将来予測の限界

※長年土木分野の耐震研究をリードしてきた川島はその著書の中で「まだよくわかっていない強震動の特性」という節を設け、「強震動の推定には多くの未知の領域が残されている」と述べています(川島, 2019).

※別な専門家の方からは

「M9.0地震の発生を予測できないのになぜ強震動予測の結果を設計に使えるだろうか」

という趣旨の意見をいただいたこともあります(ここで言っている予測とは短期予測のことではなく長期予測のことです). これらはいずれも強震動研究の成熟度に対する疑念の表明であると言えます.

将来予測の限界

※私は、これらの土木分野におけるいわゆる「主流」の考えが、現時点での強震動研究の実力をある意味で正確に見抜いていることを認めざるを得ないと思います。すなわち、現状の強震動研究の実力の下では、地震動の振幅レベルの将来予測に大きな不確実性を伴うことを、事実として認めなければならないと考えます。

※これらの御意見が出てくる背景として、私は、これらの方々がいずれも電力会社との間に利益相反がなく、自由闊達に御発言されているということがあるのではないかと思います。私は、これらの意見が、わが国における専門家の主流の意見であると考えています。

※「強震動研究の成果を活用することで原子力発電所の安全性が保証できる」という見解を述べる専門家も多くいるように見えるかも知れませんが、注意していただければ、そのほとんどは電力会社との間に何らかの利益相反のある専門家の御意見であり、客観的な立場からの御意見ではありません。

将来予測の限界

※今後も

「考えてもいなかったような場所で」

「考えてもいなかったような規模の地震が」

「考えてもいなかったような起こり方で」

起こり、それによってパラダイムは変わっていくと考えられます。したがって、強震動研究の成果を活用して原子力発電所の安全性の保証することは現段階では不可能であると考えます。しかし、それでもなお、原子力発電所の耐震検討に強震動研究の成果を活用しようとするのであれば、現状のパラダイムの下で想定される地震あるいは地震動を考えるだけでは不十分であり、物理的に確実に否定できるシナリオ以外のあらゆるシナリオを考えるべきであると考えられます。

松崎氏の陳述書の問題点について

★「地域性」という概念を，基準地震動を小さく抑えるのに役立つ時だけ持ち出しておられます．

★「伊方発電所が位置する佐田岬半島には三波川変成岩類という極めて堅硬かつ緻密な岩盤が広く分布しており，伊方発電所を設置している基礎岩盤は，地震波の伝播速度を表すS波速度が2,600m/sを有する非常に堅硬な岩盤です（なお，このS波速度2,600m/sを有する基礎岩盤は，全国の原子力発電所の中で最も硬い岩盤です．）．伊方発電所はその岩盤に直接支持されていることから，地表付近に軟らかい地盤等が堆積している地点で見られるような地震動の顕著な増幅が生じることはそもそも考え難いものの」と述べておられます（p.18）．これは正しい指摘です．

★一方でこうも述べておられます.

「地震動は、地震基盤と呼ばれる地下のやや深いところにある硬い基盤(S波速度で3,000m/s程度以上)に大きな歪みが溜まり、これに耐えきれなくなった基盤の割れ目(断層)が破壊(強い衝撃を伴う急激な破壊)され、この衝撃が地震波として伝播することによって生じるものです」(p23)

「通常、地表付近の岩盤は地震基盤に比べて軟らかく、また、地下の圧力が小さく、大きな歪みが溜まりにくいいため、強い衝撃を伴う急激な破壊(地震)が生じることはありません」(p.23)

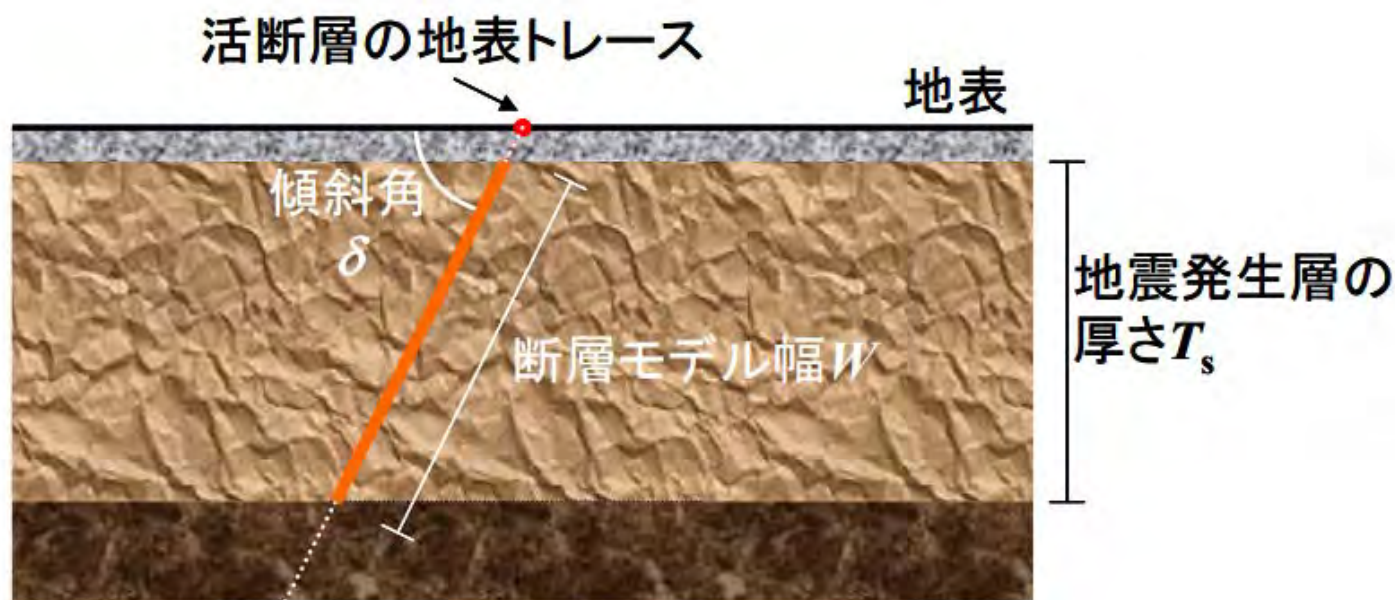
確かに、「通常は」、地表付近の岩盤は地震基盤に比べて軟らかいため、短周期成分を生成するような破壊は2km程度より深いところで生じると仮定する場合が多いのはその通りです. しかし伊方発電所は、「S波速度が2,600m/sを有する非常に堅硬な岩盤」に「直接支持されている」ことから、短周期成分を生成するような破壊が他の地域よりも一層浅い位置で生じる可能性があります. このことは、震源を特定せず策定する地震動の設定において、より慎重を期する必要があることを意味します.

★このように、S波速度が2,600m/sを有する非常に堅硬な岩盤に立地しているという事実は有利な方向にも不利な方向にも働きうるにも関わらず、有利な方しか述べられていません.

★一方でこうも述べておられます。

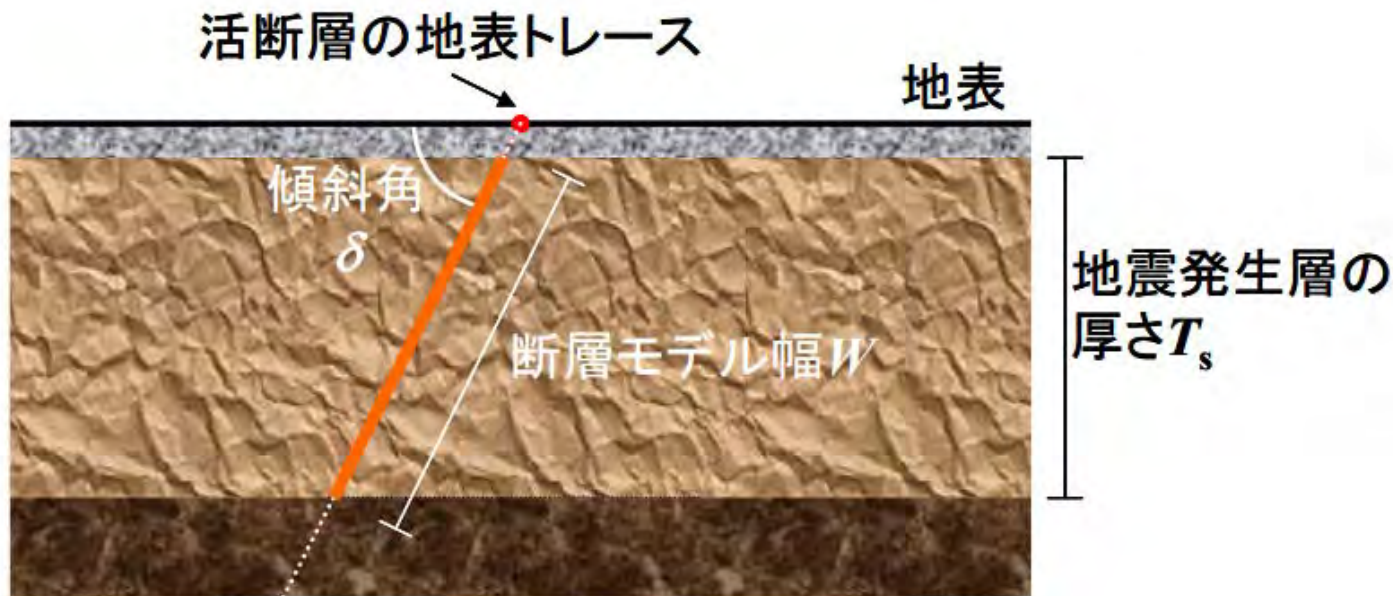
「地震動は、地震基盤と呼ばれる地下のやや深いところにある硬い基盤（S波速度で3,000m/s程度以上）に大きな歪みが溜まり、これに耐えきれなくなった基盤の割れ目（断層）が破壊（強い衝撃を伴う急激な破壊）され、この衝撃が地震波として伝播することによって生じるものです」（p23）

「通常、地表付近の岩盤は地震基盤に比べて軟らかく、また、地下の圧力が小さく、大きな歪みが溜まりにくいいため、強い衝撃を伴う急激な破壊（地震）が生じることはありません」（p.23）



（地震調査研究推進本部の資料より）

★確かに、「通常は」、地表付近の岩盤は地震基盤に比べて軟らかいため、短周期成分を生成するような破壊は2km程度より深いところで生じると仮定するケースが多いのはその通りです。しかし伊方発電所は、「S波速度が2,600m/sを有する非常に堅硬な岩盤」に「直接支持されている」ことから、短周期成分を生成するような破壊が他の地域よりも一層浅い位置で生じる可能性があります。このことは、震源を特定せず策定する地震動の設定において、より慎重を期する必要があることを意味します。



(地震調査研究推進本部の資料より)

★確かに、「通常は」、地表付近の岩盤は地震基盤に比べて軟らかいため、短周期成分を生成するような破壊は2km程度より深いところで生じると仮定するケースが多いのはその通りです。しかし伊方発電所は、「S波速度が2,600m/sを有する非常に堅硬な岩盤」に「直接支持されている」ことから、短周期成分を生成するような破壊が他の地域よりも一層浅い位置で生じる可能性があります。このことは、震源を特定せず策定する地震動の設定において、より慎重を期する必要があることを意味します。

★このように、S波速度が2,600m/sを有する非常に堅硬な岩盤に立地しているという事実は有利な方向にも不利な方向にも働きうるにも関わらず、有利な方しか述べられていません。

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動を対象とした 複数の震源モデルの比較

強震動を対象とする震源モデル

著者	震源モデル	強震波形計算手法
野津他(2012)	SPGAモデル	修正経験的グリーン関数法(古和田他, 1998;野津他, 2009)
佐藤(2012)	SMGAモデル	経験的グリーン関数法(壇・佐藤, 1998)
Asano and Iwata (2012)	//	経験的グリーン関数法(入倉他, 1997)
川辺・釜江(2013)	//	経験的グリーン関数法(入倉他, 1997)
Kurahashi and Irikura (2013)	//	経験的グリーン関数法(入倉他, 1997)
野津(2012)	疑似点震源モデル	疑似点震源モデル独自の計算方法

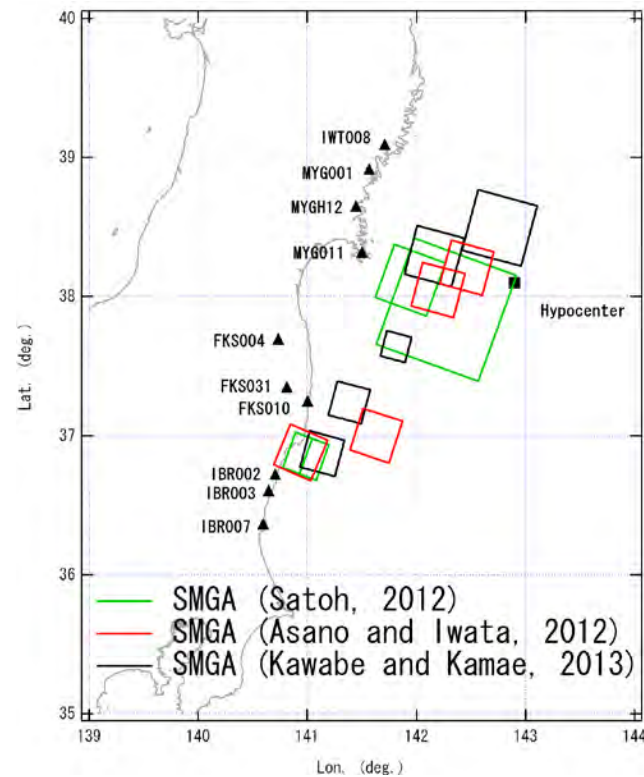
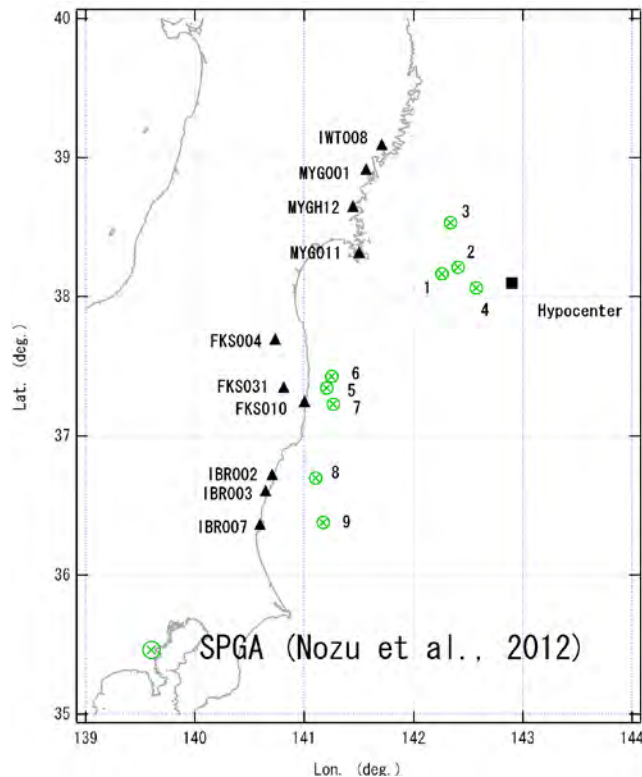
※各々の震源モデルから計算される地震動と、実際に観測された地震動との誤差を定量的に評価することにより、震源モデルのパフォーマンスに関する定量的な比較を行った。

SPGAモデル

東北地方太平洋沖地震をはじめとする海溝型巨大地震において特徴的な強震動パルスのパルス幅と調和的なサイズのサブイベント(SPGA)から構成される震源モデルであり、サブイベントのサイズは対象地震の場合**一辺が数km程度**.

SMGAモデル

より広い領域(対象地震の場合、**一辺が数十km程度**)からまんべんなく強震動が生成されるとする震源モデル.



比較の条件

※地震動の計算には、基本的に、各々の震源モデルの構築に用いられたのと同様の計算手法を用いた。

※グリーン関数イベントとして用いた中小地震も、個々の文献に示されたものと同様。

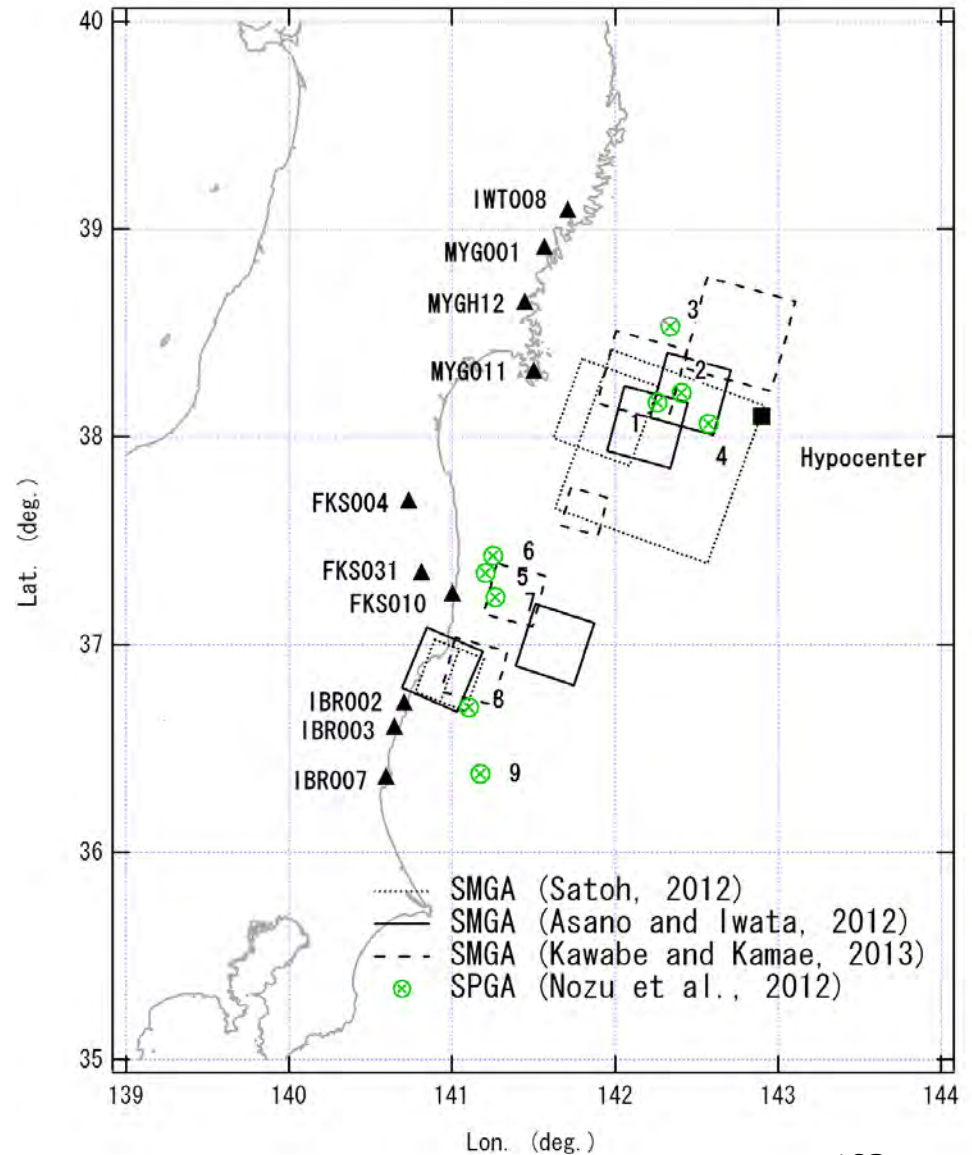
著者	震源モデル	強震波形計算手法
野津他(2012)	SPGAモデル	修正経験的グリーン関数法(古和田他, 1998;野津他, 2009)
佐藤(2012)	SMGAモデル	経験的グリーン関数法(壇・佐藤, 1998)
Asano and Iwata (2012)	//	経験的グリーン関数法(入倉他, 1997)
川辺・釜江(2013)	//	経験的グリーン関数法(入倉他, 1997)
Kurahashi and Irikura (2013)	//	経験的グリーン関数法(入倉他, 1997)

※Kurahashi and Irikuraの震源モデルにおいては、2005/8/16宮城県沖の地震(M_w 7.2)の記録の後半部分がグリーン関数として用いられているが、一部の観測点では、記録を前半部分と後半部分に分けることが、著者にとっては困難であったため、今回は対象外とした。

対象地点

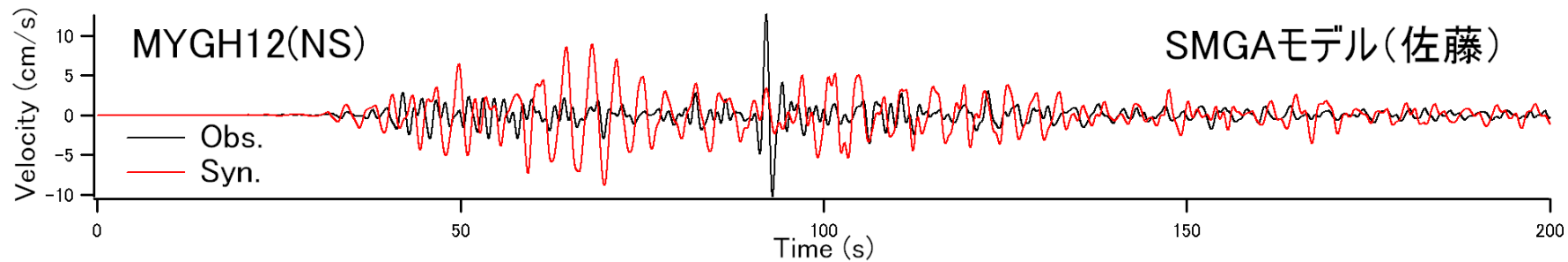
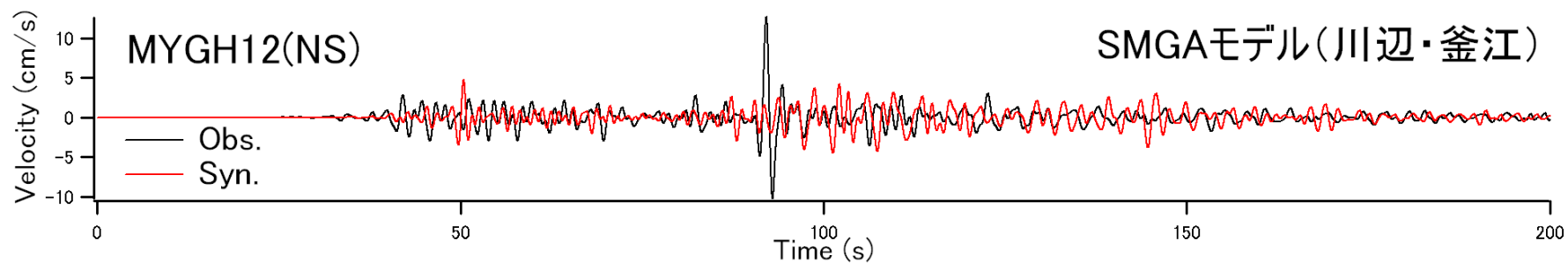
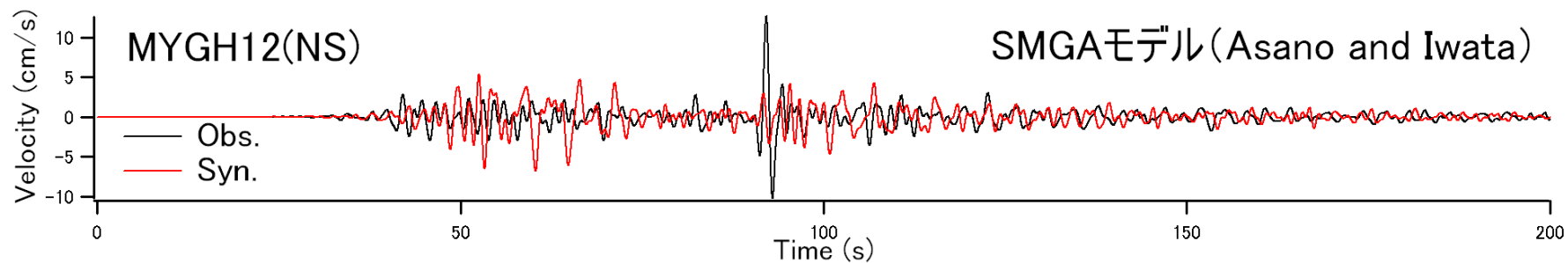
- ①サブイベントが存在する宮城県から茨城県までの範囲をカバーすること,
- ②地盤の非線形挙動の影響が大きいサイトを避けること
- ③各々の文献で用いられた中小地震記録が漏れなく観測されていること

を念頭に置き、図の10地点を選定した.

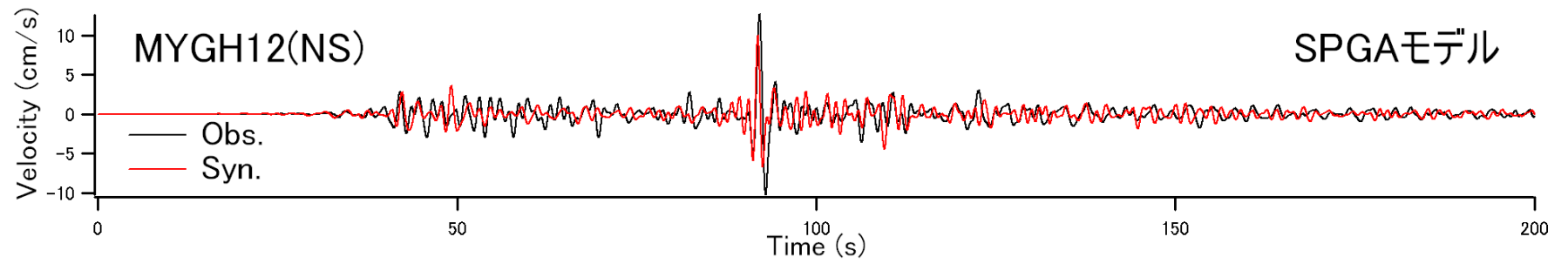


代表的な地点での波形の計算結果
(0.2-1Hzの速度波形)

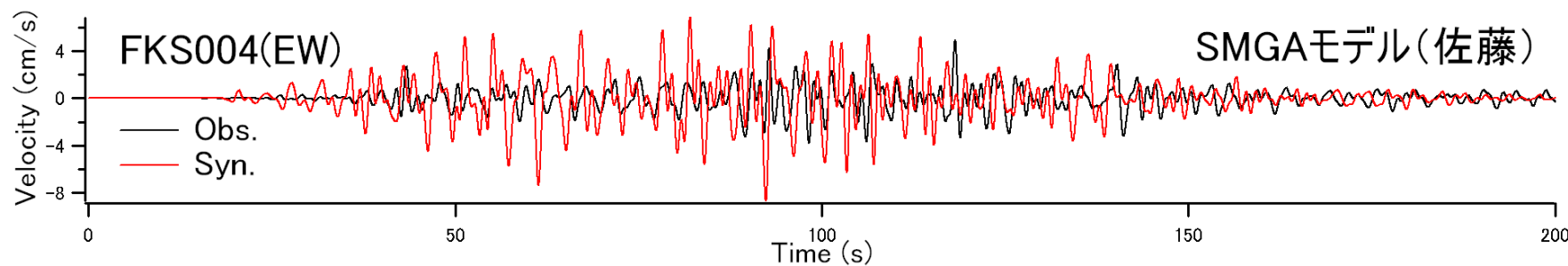
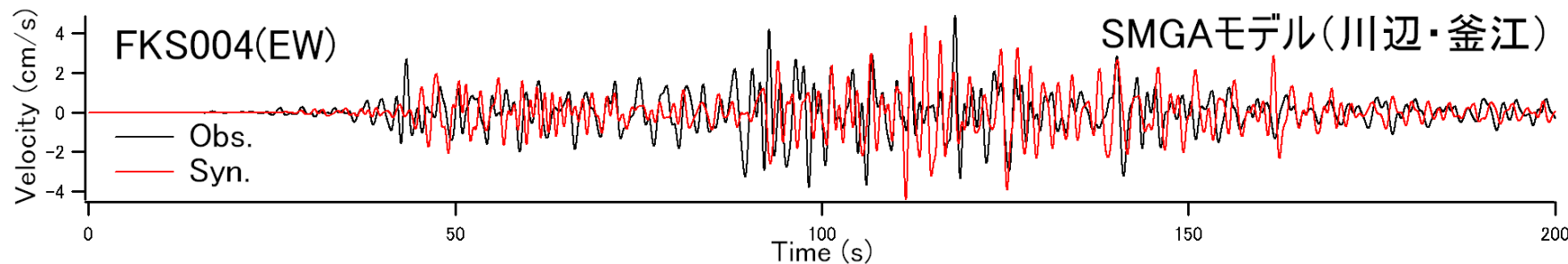
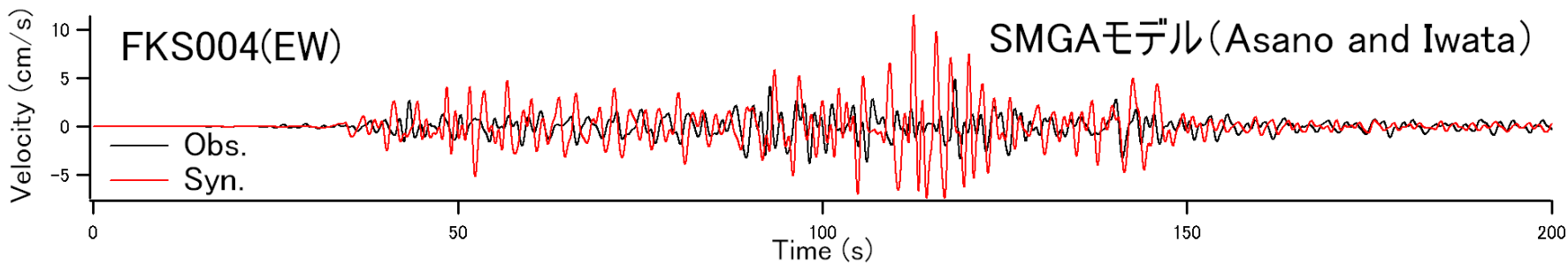
SMGAモデル



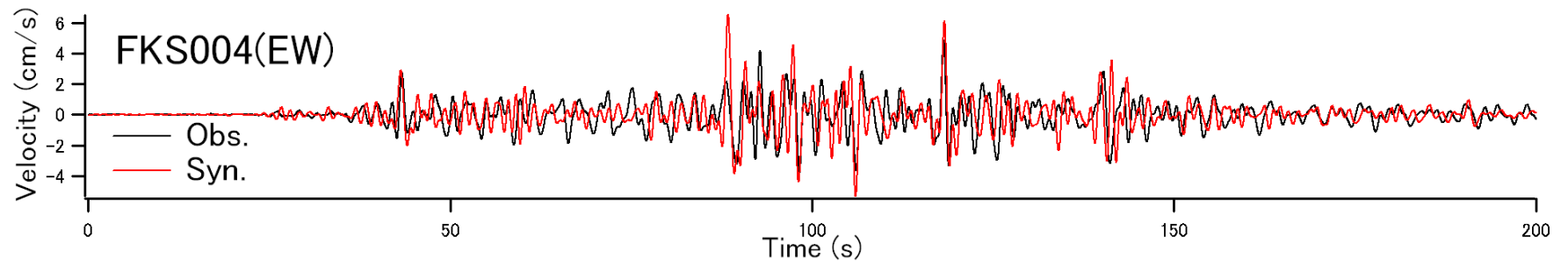
SPGAモデル



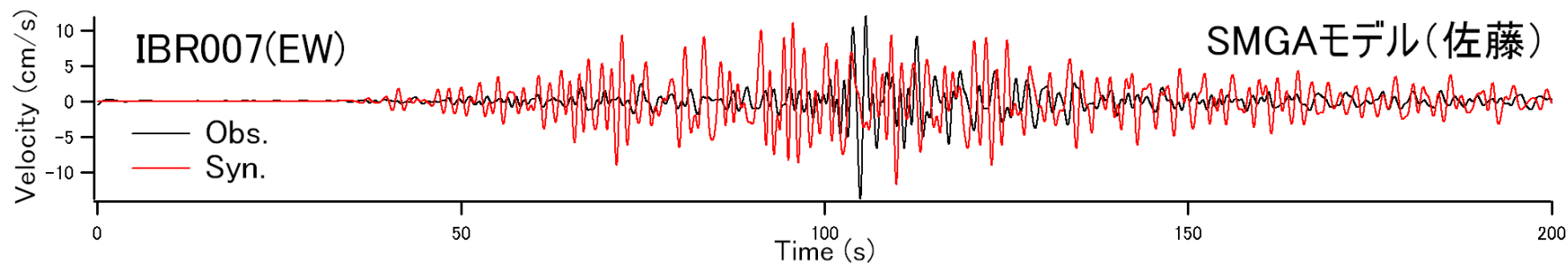
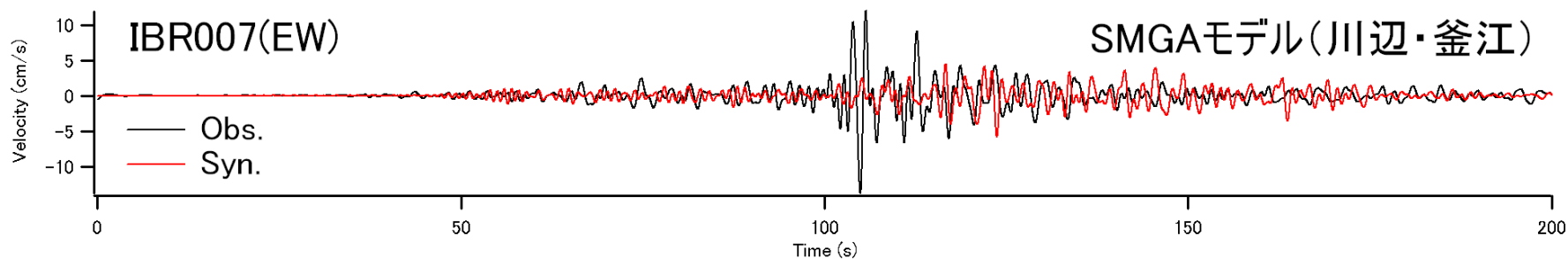
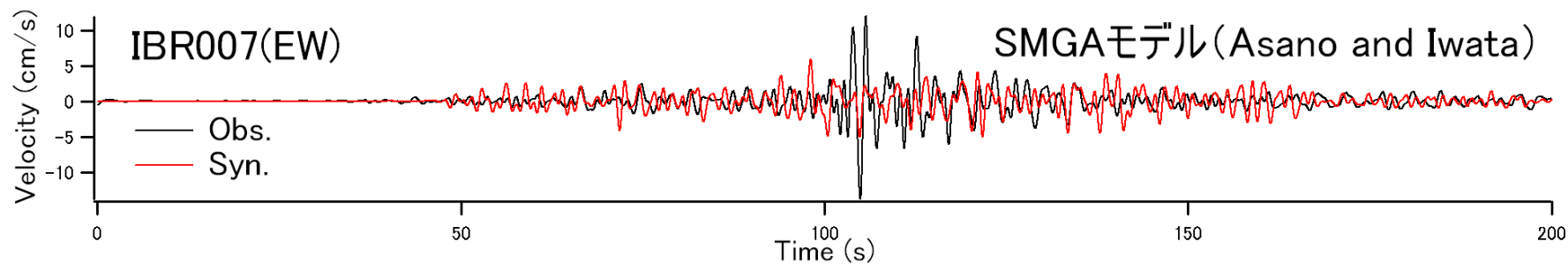
SMGAモデル



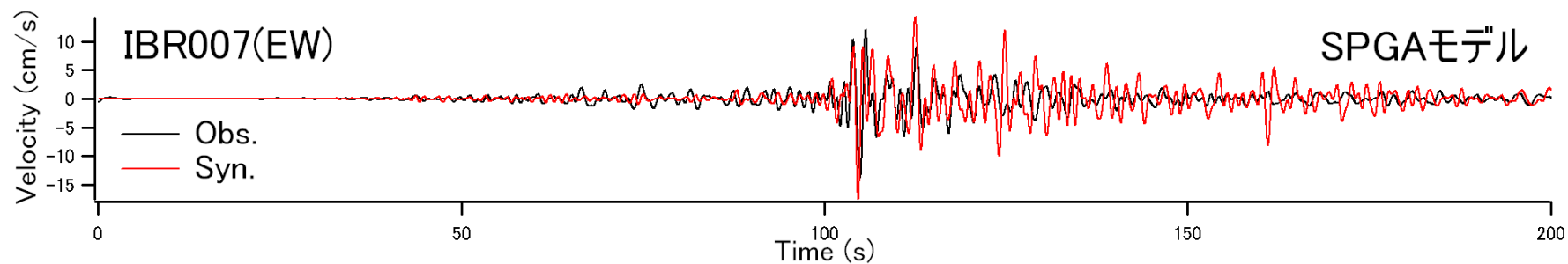
SPGAモデル



SMGAモデル



SPGAモデル

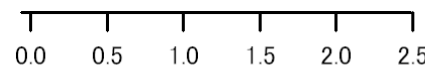
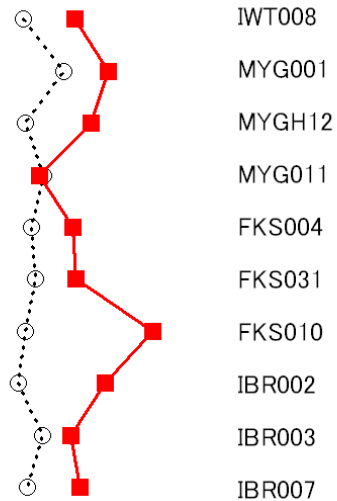


速度エンベロップ（0.2-10Hz）の誤差

速度エンベロップ

---○--- SPGAモデル

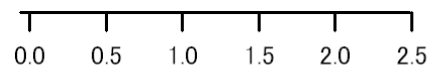
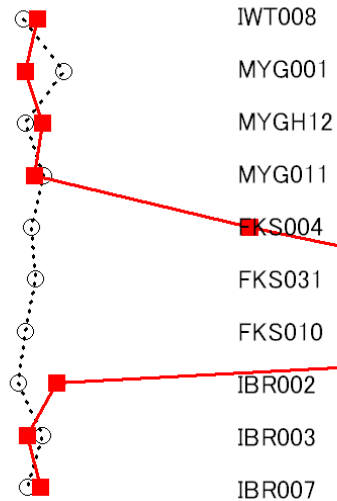
—■— SMGAモデル(佐藤)



速度エンベロップ

---○--- SPGAモデル

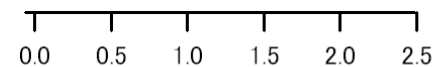
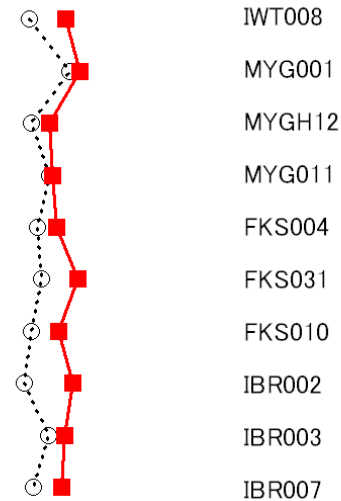
—■— SMGAモデル(浅野・岩田)



速度エンベロップ

---○--- SPGAモデル

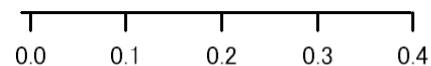
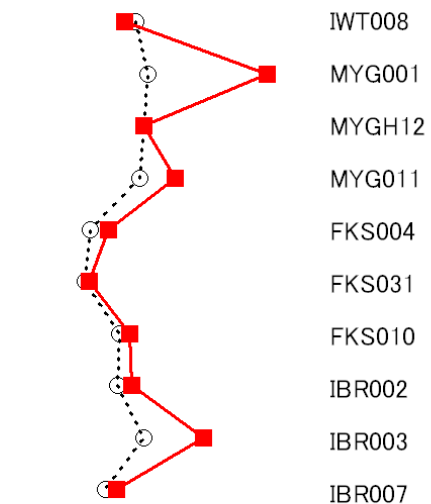
—■— SMGAモデル(川辺・釜江)



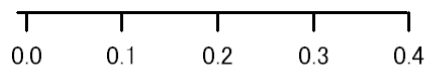
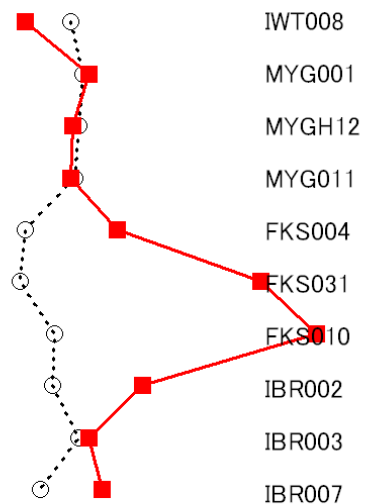
$$\int \left(v_{syn}(t) - v_{obs}(t) \right)^2 dt \quad / \quad \int v_{obs}^2(t) dt$$

フーリエスペクトル（0.2-10Hz）の誤差

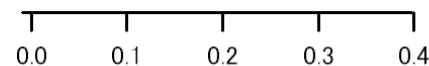
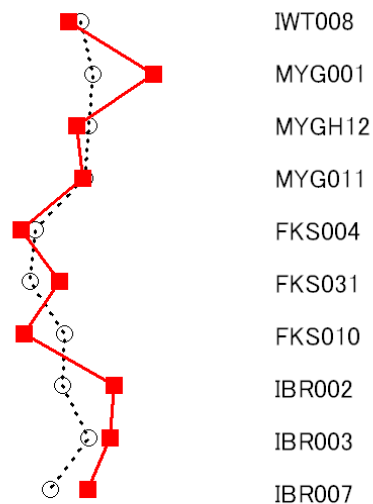
フーリエスペクトル
 ---○--- SPGAモデル
 ---■--- SMGAモデル(佐藤)



フーリエスペクトル
 ---○--- SPGAモデル
 ---■--- SMGAモデル(浅野・岩田)

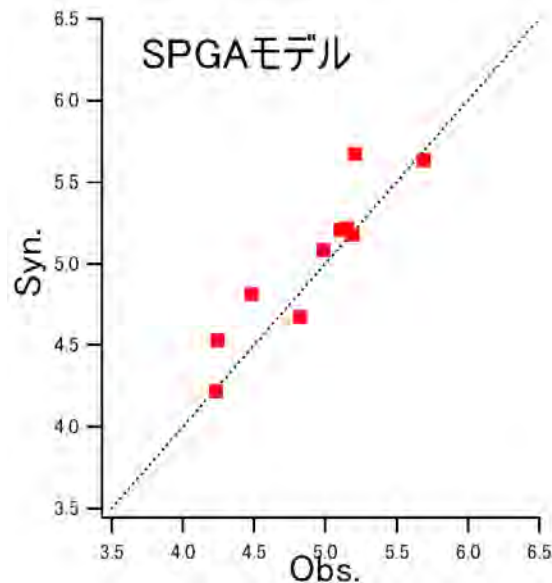
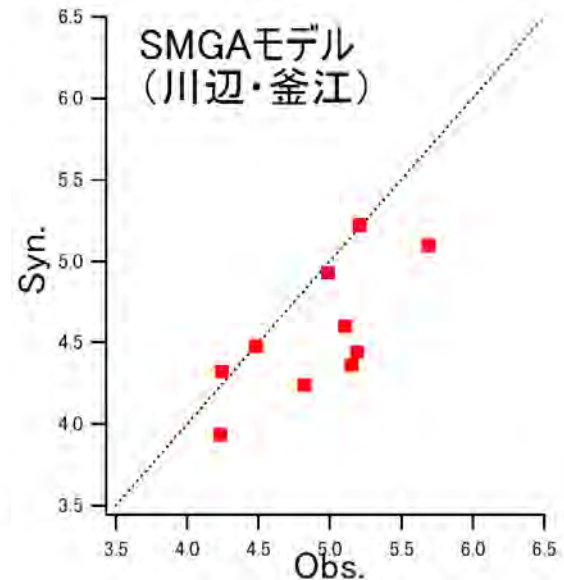
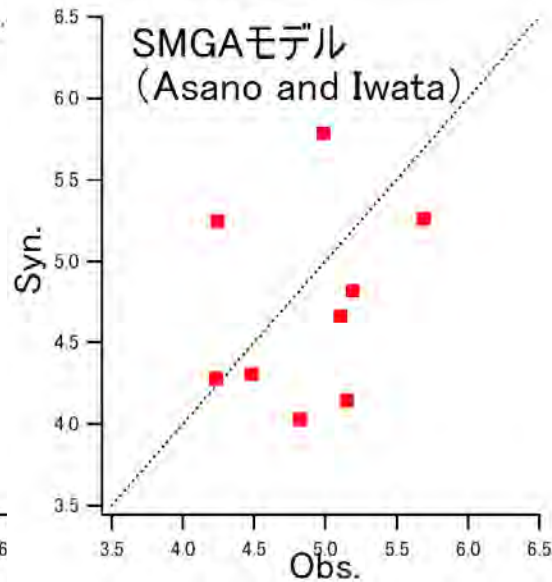
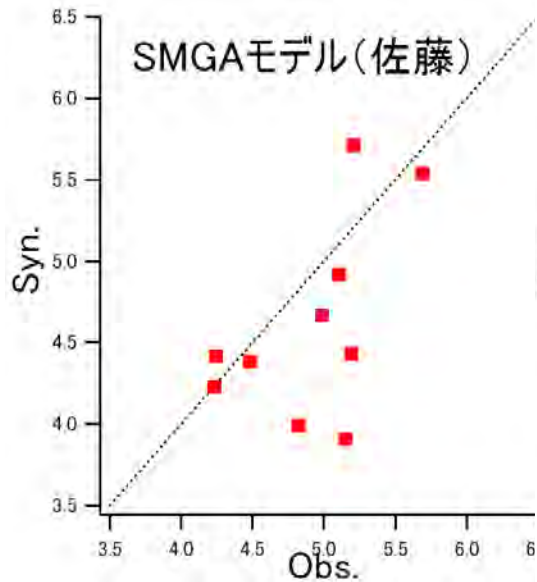


フーリエスペクトル
 ---○--- SPGAモデル
 ---■--- SMGAモデル(川辺・釜江)



$$\int (\log_{10} FS_{syn}(f) - \log_{10} FS_{obs}(f))^2 d(\log_{10} f)$$

1 - 2 秒震度（境ほか，2002，JEES）



※縦軸は各震源モデルによる強震動シミュレーション結果に基づく1-2秒震度．横軸は観測結果に基づく1-2秒震度．プロットが右上がりの1:1の線に近いほど，各震源モデルによる強震動シミュレーション結果が観測結果を適切に再現していることになる．

各種の誤差の全地点における平均

	速度 波形 0.2-1Hz	速度 envelope 0.2-10Hz	フーリエ スペクトル 0.2-10Hz	1-2秒 震度
SPGAモデル	1.46	0.52	0.096	0.21
SMGAモデル(佐藤)	3.81	0.87	0.124	0.47
SMGAモデル(浅野・岩田)	3.43	1.61	0.171	0.80
SMGAモデル(川辺・釜江)	1.84	0.68	0.109	0.57

※数字が小さいほど誤差が小さいことを意味する

※四国電力によるプレート間地震の地震動評価はSMGAモデルであるため
精度が低いと考えられる。