

女川原子力発電所2号機
基準地震動の策定のうち
海洋プレート内地震について
(コメント回答)

平成28年11月4日
東北電力株式会社

審査会合におけるコメント

No.	コメント時期	コメント内容	回答の概要(記載頁)
S134	平成28年6月3日 第367回審査会合	海洋プレート内地震の断層面の位置, SMGAの位置等の不確かさについて, 収集した知見等を踏まえ, 検討用地震の評価に至る考え方を整理すること。	収集した知見から, 検討対象地震の各検討ケースへの展開の考え方の整理を行った(pp.9~17)。
S135	平成28年6月3日 第367回審査会合	不確かさケース2の海洋地殻と海洋性マントルとの剛性率等の違いについて他の知見等も収集, 整理し説明性の向上を図ること。	地震本部(2012)の構造モデル等の知見を収集し整理を行った(pp.89~100)。
S136	平成28年6月3日 第367回審査会合	海洋地殻と海洋性マントルで剛性率等の違いを断層モデルに反映した場合の断層モデルに与える影響について説明すること。	S波速度と密度の違いが地震動評価に与える影響について検討を行った(pp.101~107)。
S137	平成28年6月3日 第367回審査会合	不確かさケース2の経験的グリーン関数法の評価結果で中周期帯の落ち込みが見られるので, その要因について要素地震の特性等を踏まえた分析を行うこと。	経験的グリーン関数法(EGF)に用いた要素地震の特性について分析を行った(pp.108~111)。
S138	平成28年6月3日 第367回審査会合	基本ケースと不確かさケース2の統計的グリーン関数法における放射特性の違い等が評価結果に与える影響について説明すること。	不確かさケース2に対し, 放射特性を一定(基本ケースで採用)とした場合の地震動を算定し, EGF結果と比較した(pp.112~114)。
S139	平成28年6月3日 第367回審査会合	不確かさケース1のSMGA位置が保守的な設定となっていることの確認のため実施した参考ケースについて, 不確かさケースとして扱った方がよいのではないか。	不確かさケースの一つとして考慮した(pp.35~51)。

目次

- 1. 資料の概要 3
- 2. 検討対象地震の地震動評価 9
- 3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定 35
- 4. 検討用地震の地震動評価 52

- 補足説明資料 88

注: 前回資料(第367回審査会合 資料1-1 女川原子力発電所2号機 基準地震動の策定のうち海洋プレート内地震(コメント回答))のうち「2. 世界の海洋プレート内地震」, 「3. 海洋プレート内地震の知見の整理」については, 前回資料のとおり。

1. 資料の概要

1.資料の概要

これまでの説明からの主要変更点

本資料は、第367回審査会合(平成28年6月3日)におけるコメントを踏まえ、海洋プレート内地震の地震動評価について再整理を行ったものである。なお、申請内容や第367回審査会合との主な相違は以下のとおり。

1. 申請内容からの主要変更点

- 検討対象地震に対して予め不確かさを考慮した地震動評価を実施した上で、4.7型地震を検討用地震として選定した。
- 検討用地震として選定した4.7型地震に対し、M7.5の規模の地震を基本ケースとし、さらに強震動生成域(SMGA)の位置の不確かさを考慮した地震動評価を実施した。

2. 第367回審査会合からの主要変更点

- 不確かさケース1※¹のSMGA位置が保守的な設定となっていることの確認のため実施していた参考ケース※²を、不確かさケースとして考慮することに変更した。

※1:不確かさケース1:4.7地震シミュレーションモデルのSMGAの一部を断層上端に近づけたケース。

※2:参考ケース:海洋性マントル内のSMGAを断層上端2箇所を集約したケース。

1.資料の概要

本資料の概要(申請内容との比較)

■申請内容(平成25年12月)から地震動評価を以下のとおり見直した。

申請の概要(平成27年1月9日審査会合での説明概要)

【地震発生様式毎の特徴の整理】

- ①沈み込んだ海洋プレート内地震 (上面)
- ②沈み込んだ海洋プレート内地震 (下面)
- ③沈み込む海洋プレート内地震 (アウターライズ)

【検討用地震の選定】

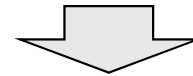
・敷地に対して最も影響の大きい2011年4月7日宮城県沖型地震(M7.5)を検討用地震として選定(基本ケース)。

【不確かさの考慮】

・アスぺリティ位置や応力降下量(短周期レベル)の大きさなどは、保守的に基本ケースに反映。

【地震動の評価】

・2011年4月7日宮城県沖地震(M7.2)の強震動シミュレーションに基づいた評価(SGF:統計的G関数法)を実施。
・基準地震動S_S-2(1000ガル)はSGF結果を包絡するよう設定。



評価の見直し(要点)

【地震発生様式毎の検討対象地震】

- ①沈み込んだ海洋プレート内地震
二重深発地震 上面の地震 4.7型地震
- ②沈み込んだ海洋プレート内地震
二重深発地震 上面の地震 2003年型地震
- ③沈み込んだ海洋プレート内地震
二重深発地震 下面の地震
- ④沈み込んだ海洋プレート内地震
沖合いのやや浅い地震
- ⑤沈む込む海洋プレート内地震
アウターライズの地震

【検討対象地震】

- ①上面の地震 4.7型地震(M7.5)
- ②上面の地震 2003年型地震(M7.3)
- ③下面の地震(M7.5)
- ④沖合いのやや浅い地震(M8.2)
- ⑤アウターライズの地震(M8.6)

【検討用地震】

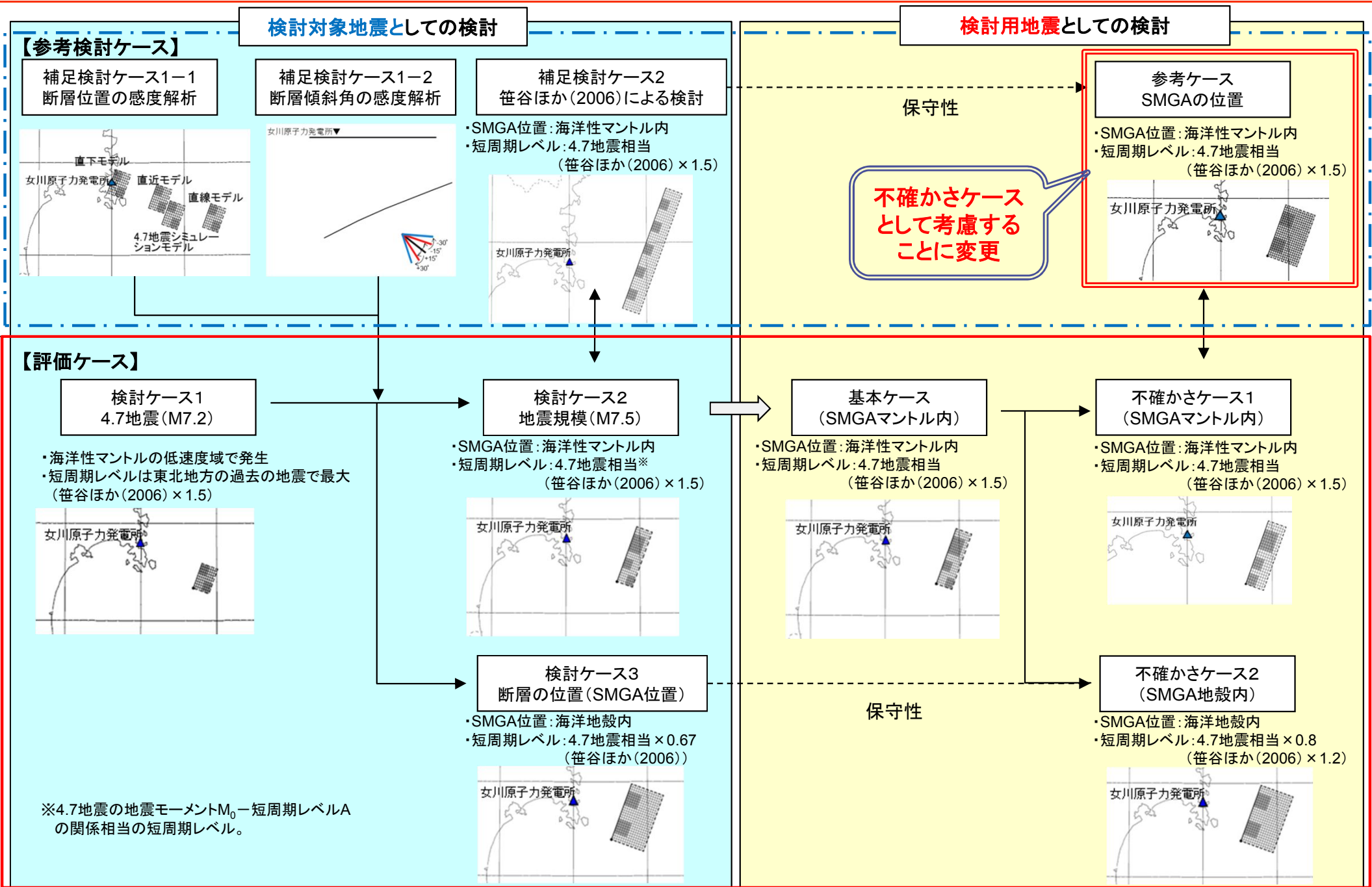
4.7型地震(2011年4月7日宮城県沖型地震)
・基本ケース, 不確かさケースについて再整理した上で地震動評価を実施。
・断層モデルを用いた手法, 応答スペクトルに基づく手法による地震動評価を実施。

余 白

1.資料の概要

前回説明(第367回審査会合(平成28年6月3日))からの主要変更点

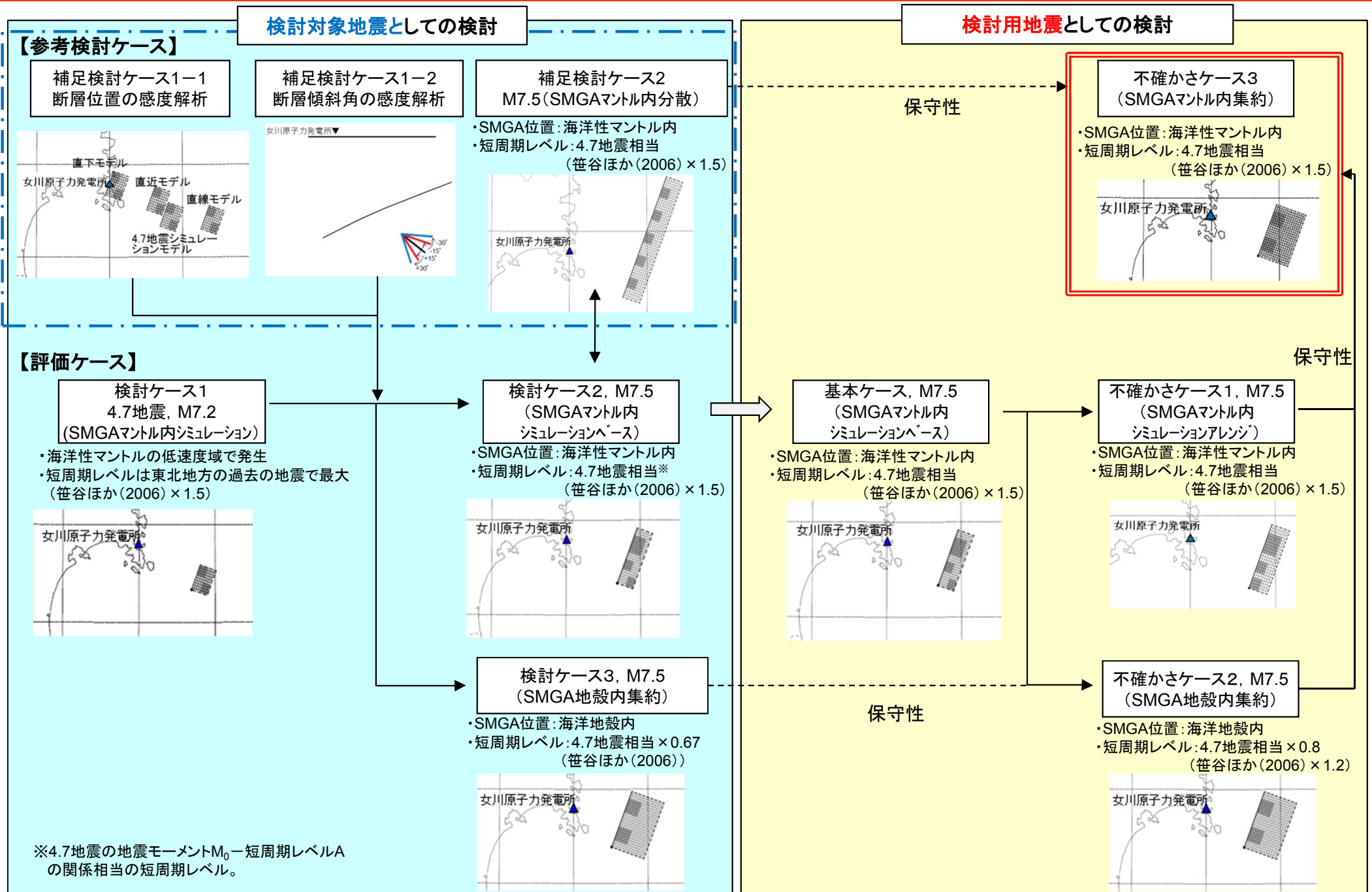
第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.26 一部修正



1. 資料の概要

検討用地震 4.7型地震 検討のフロー

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.26 一部修正



2. 検討対象地震の地震動評価

2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

No.	コメント時期	コメント内容
S134	平成28年6月3日 第367回審査会合	海洋プレート内地震の断層面の位置, SMGAの位置等の不確かさについて, 収集した知見等を踏まえ, 検討用地震の評価に至る考え方を整理すること。

2. 検討対象地震の地震動評価

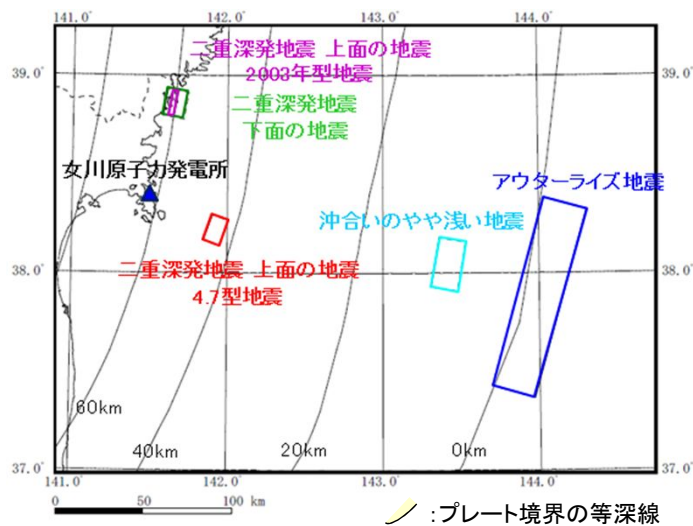
2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

発生機構などの違いも踏まえ、5つのタイプの検討対象地震を設定し、それぞれ不確かさを考慮し敷地への影響検討を行った上で、最も影響の大きいタイプの地震を検討用地震として選定している。

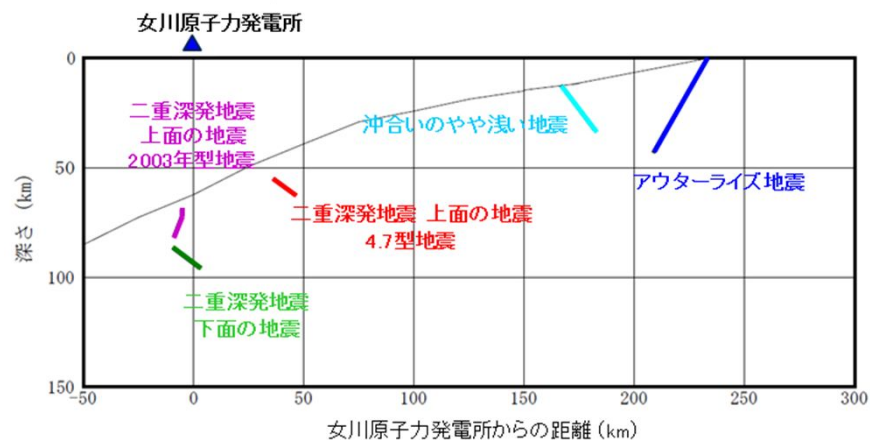
No.	タイプ名	検討した地震規模	東北地方で発生した主な地震	北海道で発生した主な地震	
1	沈み込んだ海洋プレート内の地震	二重深発地震 上面の地震 4.7型地震	M7.5	2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2) ^{※1}	
2		二重深発地震 上面の地震 2003年型地震	M7.3	2003年5月26日宮城県沖の地震(M7.1) ^{※2}	
3		二重深発地震 下面の地震	M7.5	2008年7月24日岩手県沿岸北部の地震(M6.8)	1993年釧路沖地震(M7.5)
4		沖合いのやや浅い地震	M8.2	2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)	1994年北海道東方沖地震(M8.2)
5	沈み込む海洋プレート内の地震 アウターライズの地震	M8.6	1933年三陸沖の地震(M8.1) 2011年3月11日三陸沖の地震(M7.5)		

※1: 2011年4月7日宮城県沖の地震を以下「4.7地震」という。

※2: 2003年5月26日宮城県沖の地震を以下「2003年宮城県沖の地震」という。



断層位置 模式図(平面図)



断層位置 模式図(断面図)

2. 検討対象地震の地震動評価

2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

■ 検討対象地震 断層パラメータの設定の考え方

検討対象地震に関する各種知見と断層モデルの断層面の位置, SMGAの位置等の不確かさの設定方法について, 考え方を整理した。

審査ガイドの主要記載事項

3.2.3 震源特性パラメータの設定
海洋プレート内地震の**規模の設定**においては、敷地周辺において過去に発生した地震の規模、すべり量、震源領域の広がり等に関する地形・地質学的、地震学的及び測地学的な直接・間接的な情報が可能な限り活用されていることを確認する。

3.2.3 震源特性パラメータの設定
国内のみならず世界で起きた大規模な地震を踏まえ、地震の発生機構やテクトニクス背景の類似性を考慮した上で**震源領域が設定**されていることを確認する。

3.2.3 震源特性パラメータの設定
特に、スラブ内地震については**アスペリティの応力降下量(短周期レベル)が適切に設定**されていることを確認する。

3.3.2 断層モデルを用いた手法による地震動評価
アスペリティの位置が活断層調査等によって設定できる場合は、その**根拠が示されている**ことを確認する。**根拠がない場合は**、敷地への影響を考慮して**安全側に設定**されている必要がある。

検討対象地震の断層パラメータの設定の考え方

【地震の想定位置(断層の位置)】
○過去の地震の発生状況, テクトニクス背景, 地震観測から得られるトモグラフィの知見等を踏まえ, 地震タイプ毎に想定位置を決定。
・特に, 陸域に近い位置で発生する地震(2003年型地震, 下面の地震)については, 安全側に敷地直下に想定したケースも考慮。

【地震規模】
○沈み込んだ海洋プレート内地震に対しては, 東北地方の太平洋プレート内で発生した過去の地震の最大規模M7.3を全ての地震タイプで共通的に考慮。
・テクトニクス背景に相違のある北海道で発生した地震の最大規模(下面の地震M7.5, 沖合いのやや浅い地震M8.2(M8.2は世界的にも最大規模))を該当する地震タイプに考慮。
・低速度域の存在が指摘されている場合はそれを考慮(4.7型地震)。

【強震動生成域の応力降下量(短周期レベル)】
○過去に敷地周辺で発生した規模の大きい地震の短周期レベルを基本的に採用。沈み込んだ海洋プレート内地震に対しては, 不確かさとして4.7地震の短周期レベル(東北地方で最大レベル)も考慮。
・過去に規模の大きい地震が発生していない地震タイプ(海洋地殻内に強震動生成域が位置する地震, 下面の地震)に対しては, 他の地震タイプとのテクトニクスの違いや過去の中規模地震の特徴等を考慮し, 安全側に設定。

【強震動生成域の位置】
○過去の地震の強震動生成域の位置が特定されているものについてはそれを採用。
・低速度域が認められる場合は, それをベースに安全側に設定(4.7型地震)。
・根拠が無い場合は, 敷地への影響を考慮して安全側に設定(下面の地震他)。

注1: 審査ガイドの記載内容については, 一部簡略化して記載。

注2: アスペリティを強震動生成域(SMGA)という。

2. 検討対象地震の地震動評価

2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

■二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

知見

検討ケース

知見

検討ケース

地震波トモグラフィから、4.7地震の発生位置は太平洋プレート内の海洋性マンテルの低速度域と対応している。

4.7地震は相対的に敷地に対して最も厳しい位置で発生した地震(補足検討ケース1-1, 1-2の検討結果)。

4.7地震の地震規模はM7.2。

4.7地震の短周期レベルは、東北地方で発生した規模の大きい海洋プレート内地震としては最大レベル(笹谷ほか(2006)の短周期レベルの約1.5倍)。

検討ケース1
M7.2, 1.5As*
位置: 発生位置

*As: 笹谷ほか(2006)による短周期レベル

東北地方で発生した海洋プレート内地震の最大規模はM7.3。

余震域の北側の海洋性マンテルに低速度域が広がっている。

破壊は海洋プレート内の応力中立面付近から始まり海洋性マンテル内に留まる。

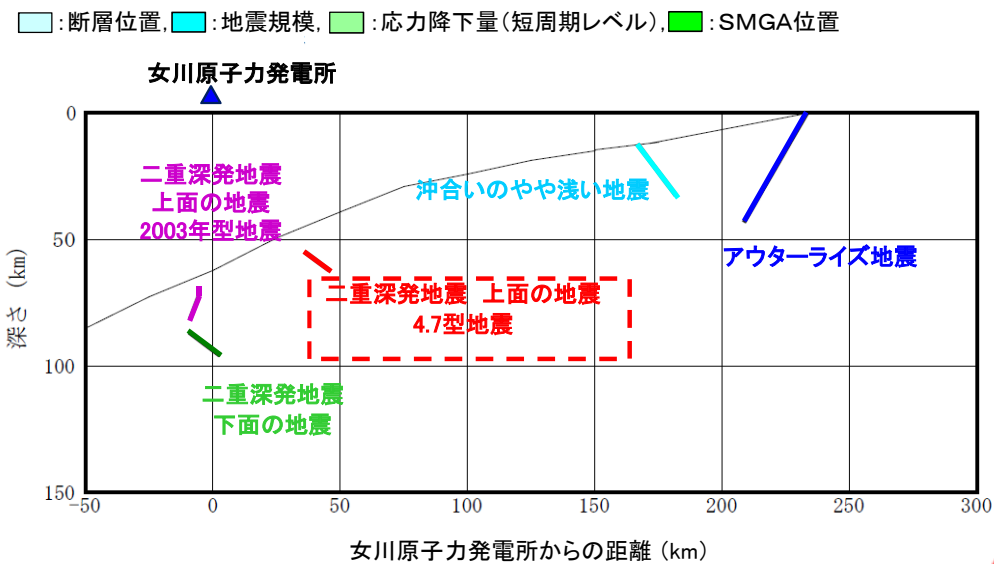
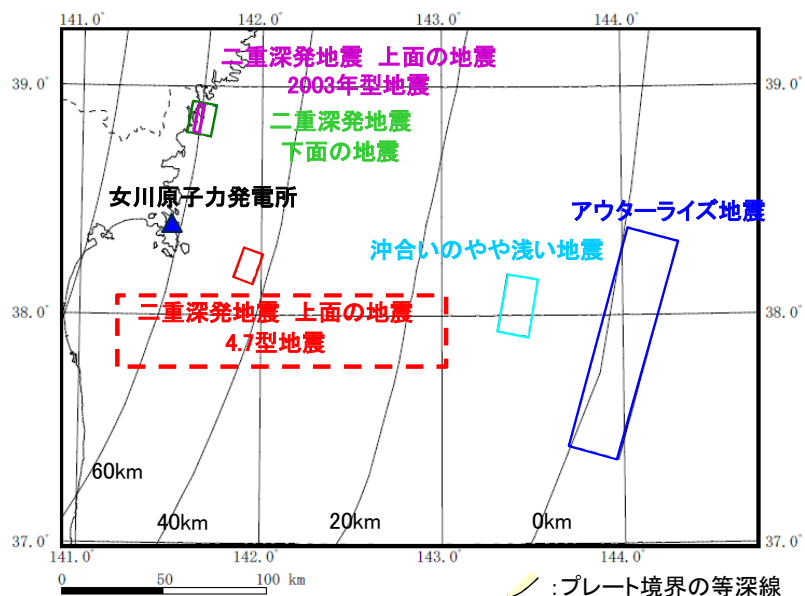
保守性(SMGAを敷地の近くに評価するという観点から、破壊領域を海洋地殻まで拡大)

北海道における中小地震の分析から、海洋地殻と海洋性マンテルでは応力降下量に1.9倍程度の違いがある。

検討ケース2
M7.5, 1.5As
位置: 低速度域の位置(SMGAはマンテル内敷地寄り)

検討ケース3
M7.5, 1.0As
位置: 海洋地殻まで断層面を考慮(SMGAは海洋地殻内)

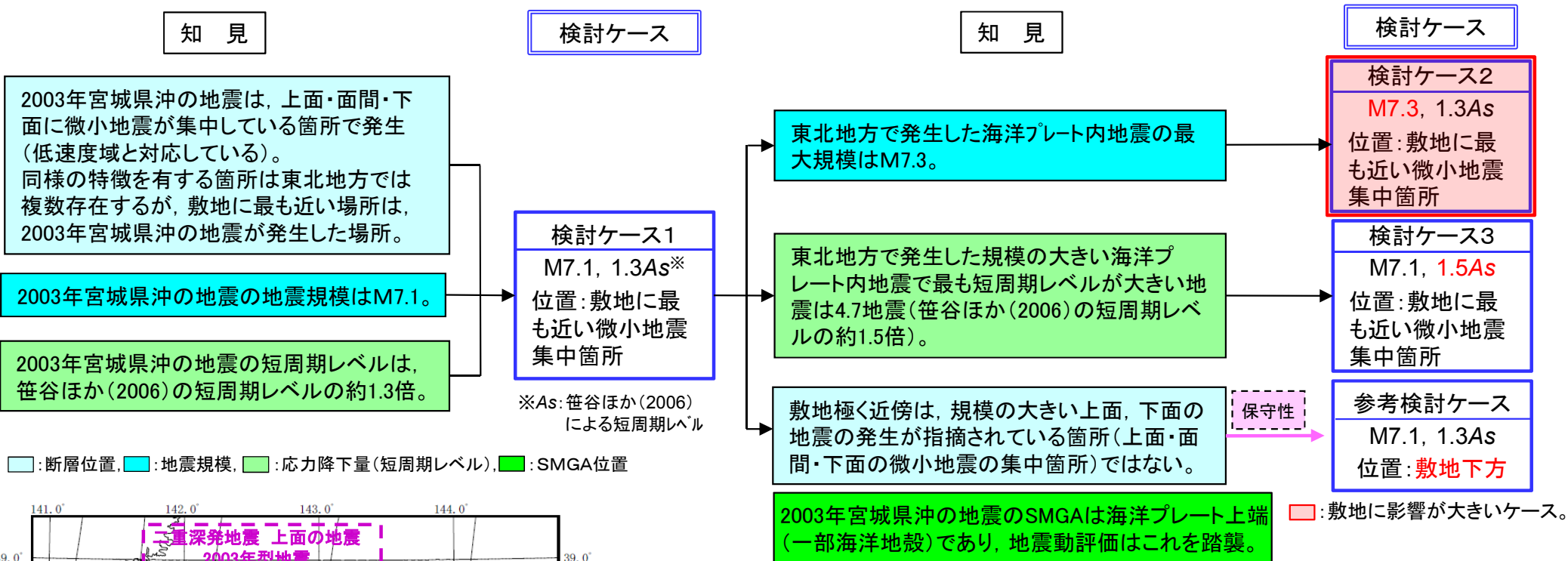
□: 敷地に影響が大きいケース。



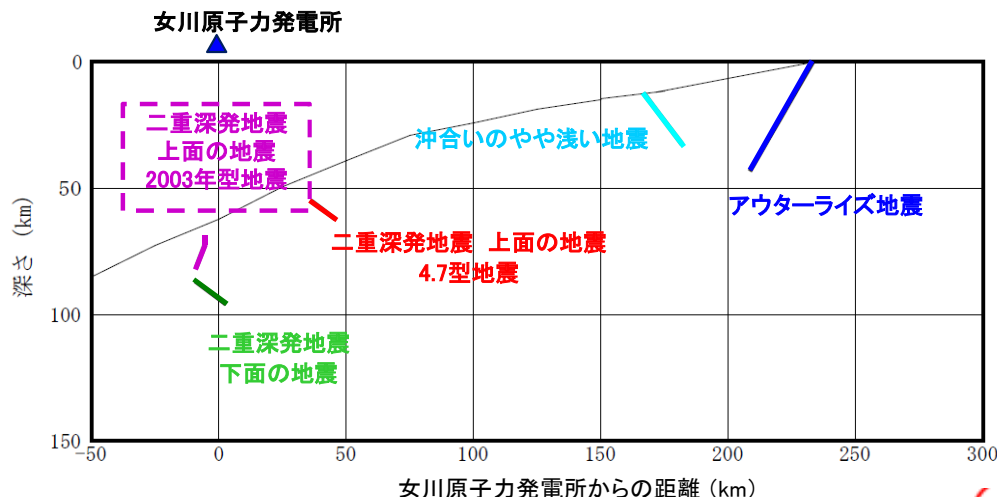
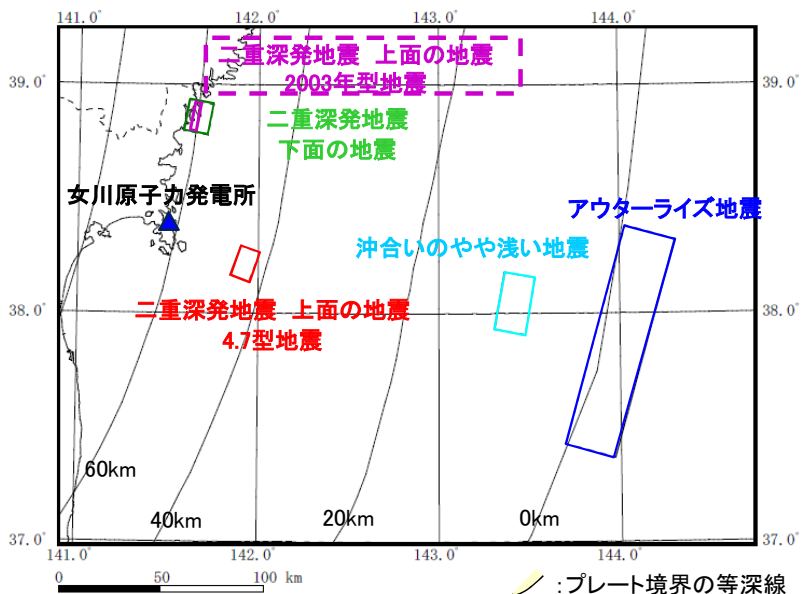
2. 検討対象地震の地震動評価

2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

■二重深発地震 上面の地震 2003年型地震



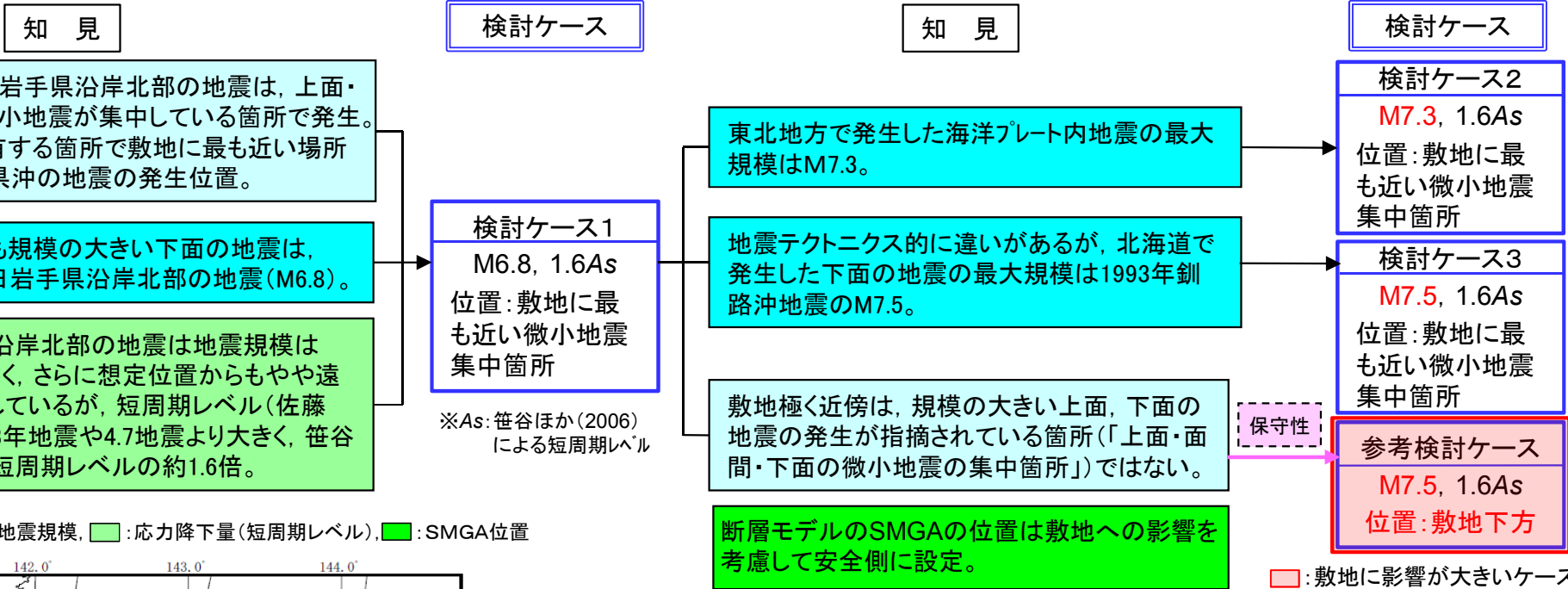
断層位置, 地震規模, 応力降下量(短周期レベル), SMGA位置



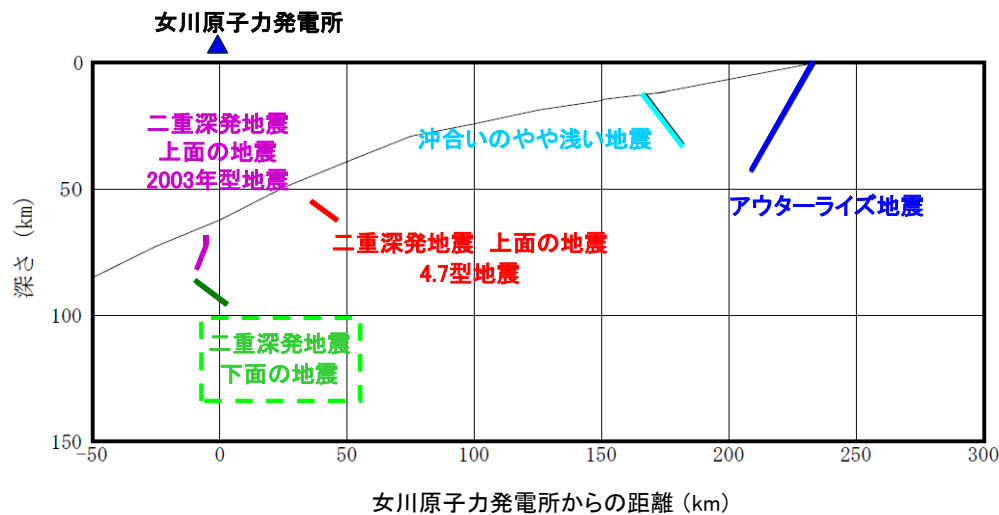
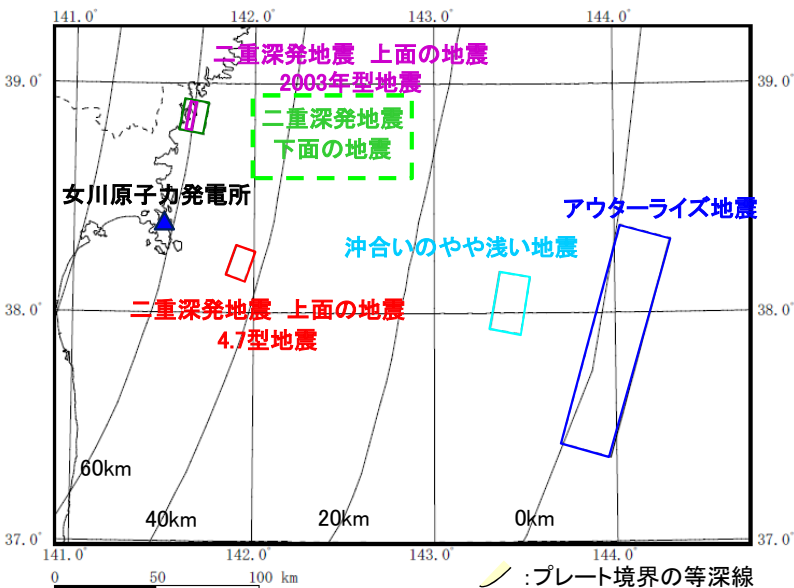
2. 検討対象地震の地震動評価

2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

■二重深発地震 下面の地震



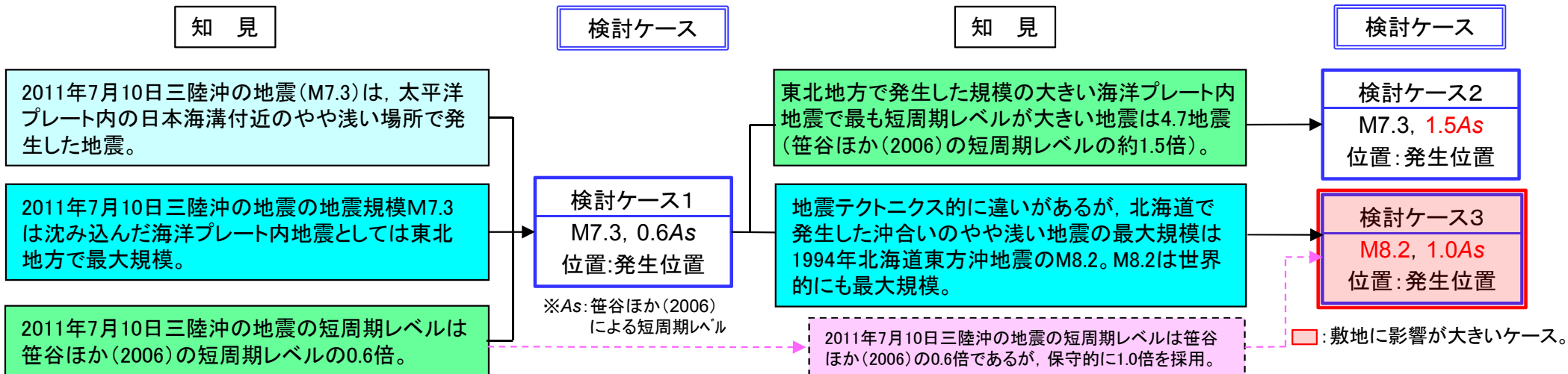
□: 断層位置, □: 地震規模, □: 応力降下量(短周期レベル), □: SMGA位置



2. 検討対象地震の地震動評価

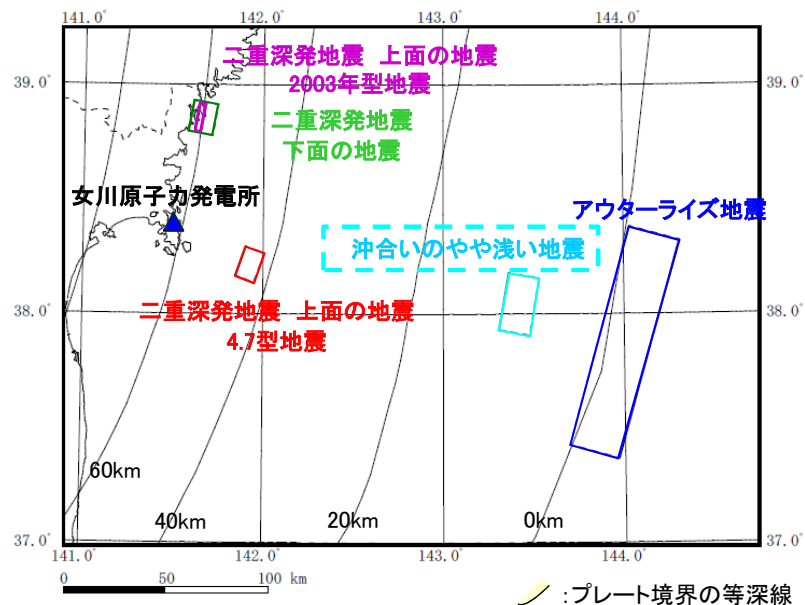
2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

■ 沖合いのやや浅い地震

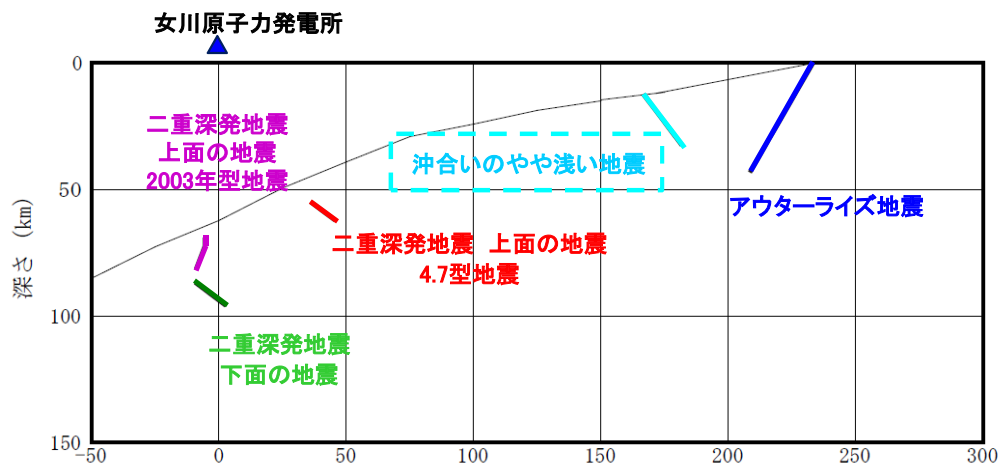


□: 断層位置, ■: 地震規模, ▭: 応力降下量(短周期レベル), ■: SMGA位置

断層モデルのSMGAの位置は敷地への影響を考慮して安全側に設定。



断層位置 模式図(平面図)



断層位置 模式図(断面図)

2. 検討対象地震の地震動評価

2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

■アウターライズ地震

知見

検討ケース

知見

検討ケース

1933年三陸沖の地震(M8.1)は海溝軸東側の地震。2011年3月11日(15時25分)の地震(M7.5)も海溝軸より東側で発生した正断層型の地震で、典型的なアウターライズ地震。

地震本部(2013)では海溝軸東側に断層モデルを設定。

歴史地震としては1933年三陸沖の地震(M8.1)が最大規模。地震本部(2013)ではM8.2の規模の地震を想定。

2011年3月11日(15時25分)の地震(M7.5)の短周期レベルは笹谷ほか(2006)の短周期レベルの0.7倍。

検討ケース1
M8.2, 0.7As
位置: 海溝軸東側
※As: 笹谷ほか(2006)による短周期レベル

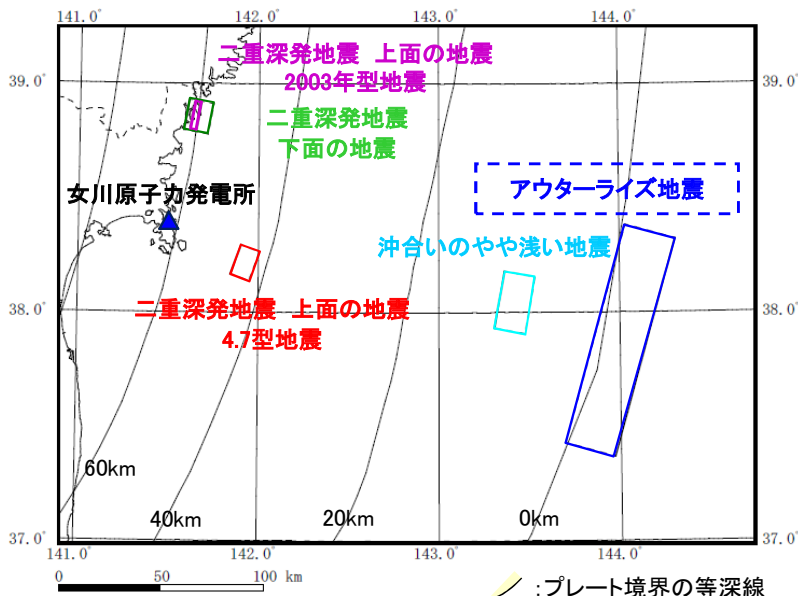
地震本部(2013)では海溝軸西側にも断層モデルを設定。

検討ケース2
M8.2, 0.7As
位置: 海溝軸西側

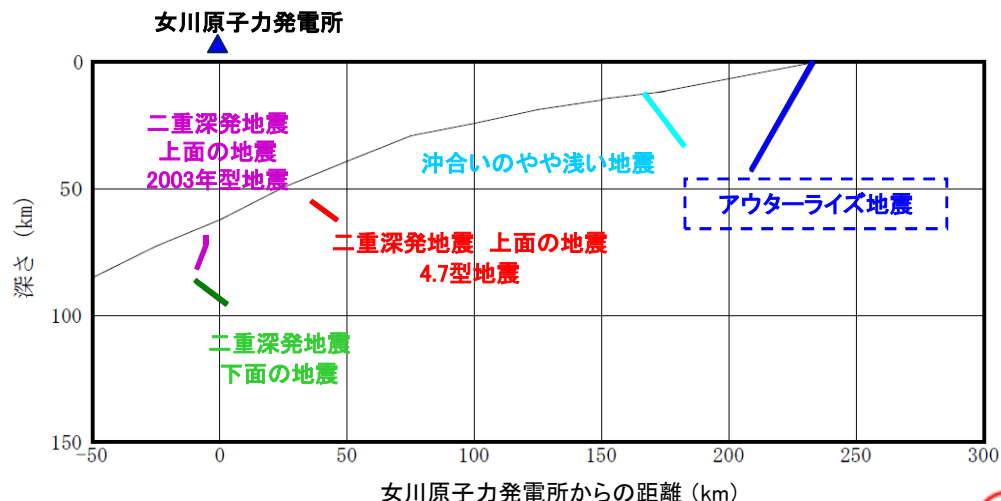
津波評価において、1611年慶長の地震はアウターライズ地震の可能性があるととして、M8.6規模の地震を評価。

検討ケース3
M8.6, 0.7As
位置: 海溝軸東側

□: 断層位置, ■: 地震規模, ▨: 応力降下量(短周期レベル), ■: SMGA位置, □: 敷地に影響が大きいケース。



断層位置 模式図(平面図)



断層位置 模式図(断面図)

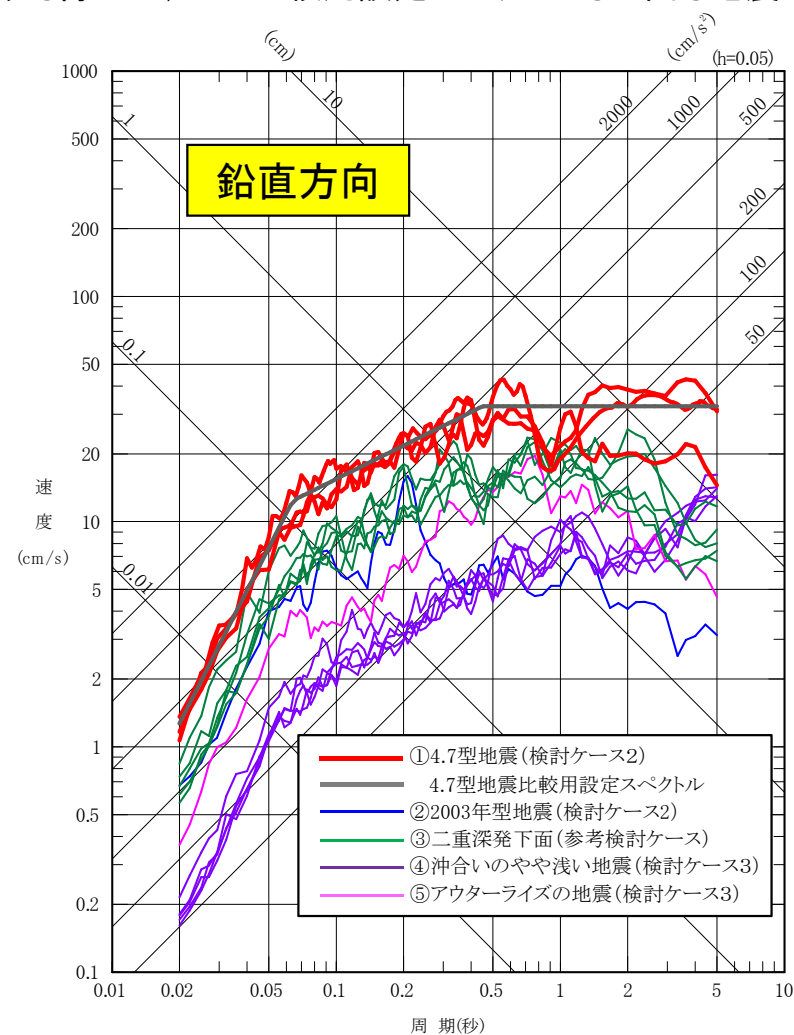
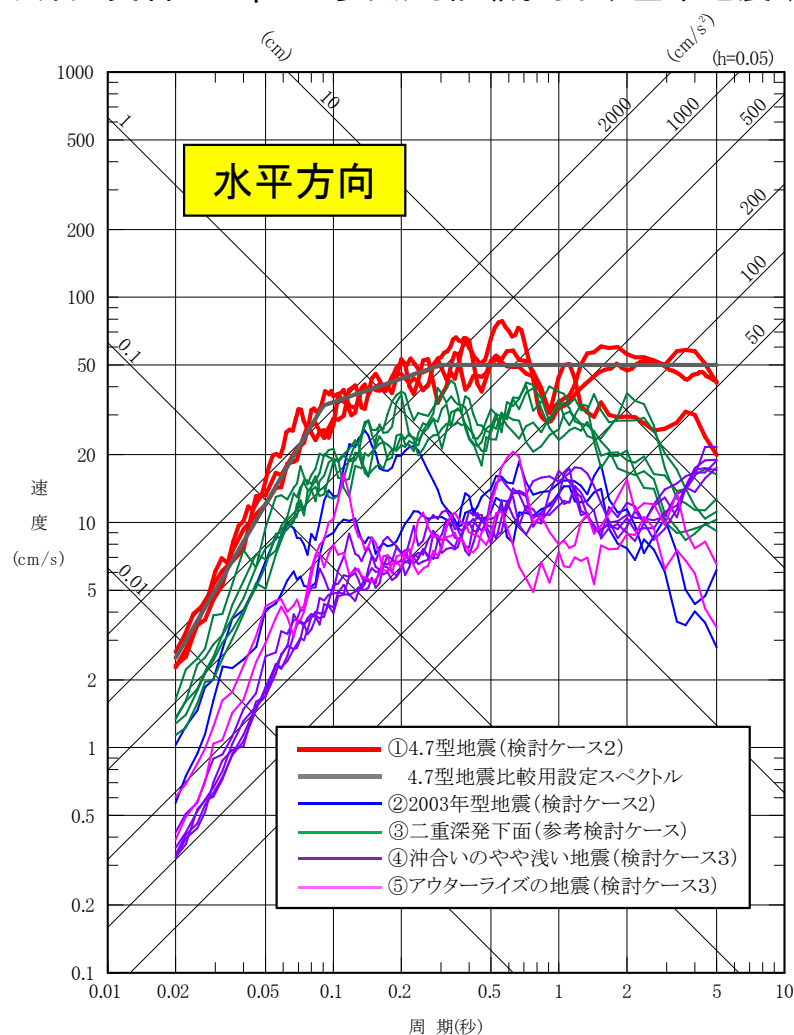
2. 検討対象地震の地震動評価

2.1 海洋プレート内地震の検討対象地震

第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.22 一部修正

■ 地震動評価の比較

- 地震発生様式毎に敷地に影響の大きいケースについて比較。4.7型地震については、他の地震の評価との比較用設定スペクトル(第367回審査会合 資料1-1 p.136参照)も記載。なお、基準地震動を策定する際には、この比較用設定スペクトルも上回る地震動を設定する。



○敷地への影響が最も大きい二重深発地震上面の地震の「4.7型地震(2011年4月7日宮城県沖型地震)」を検討用地震として選定する。

○次頁以降に、4.7型地震に関する検討対象地震としての検討について記載。

注:地震発生様式毎の各ケースの評価の詳細は、第367回審査会合 資料1-1 pp.122~171に記載。

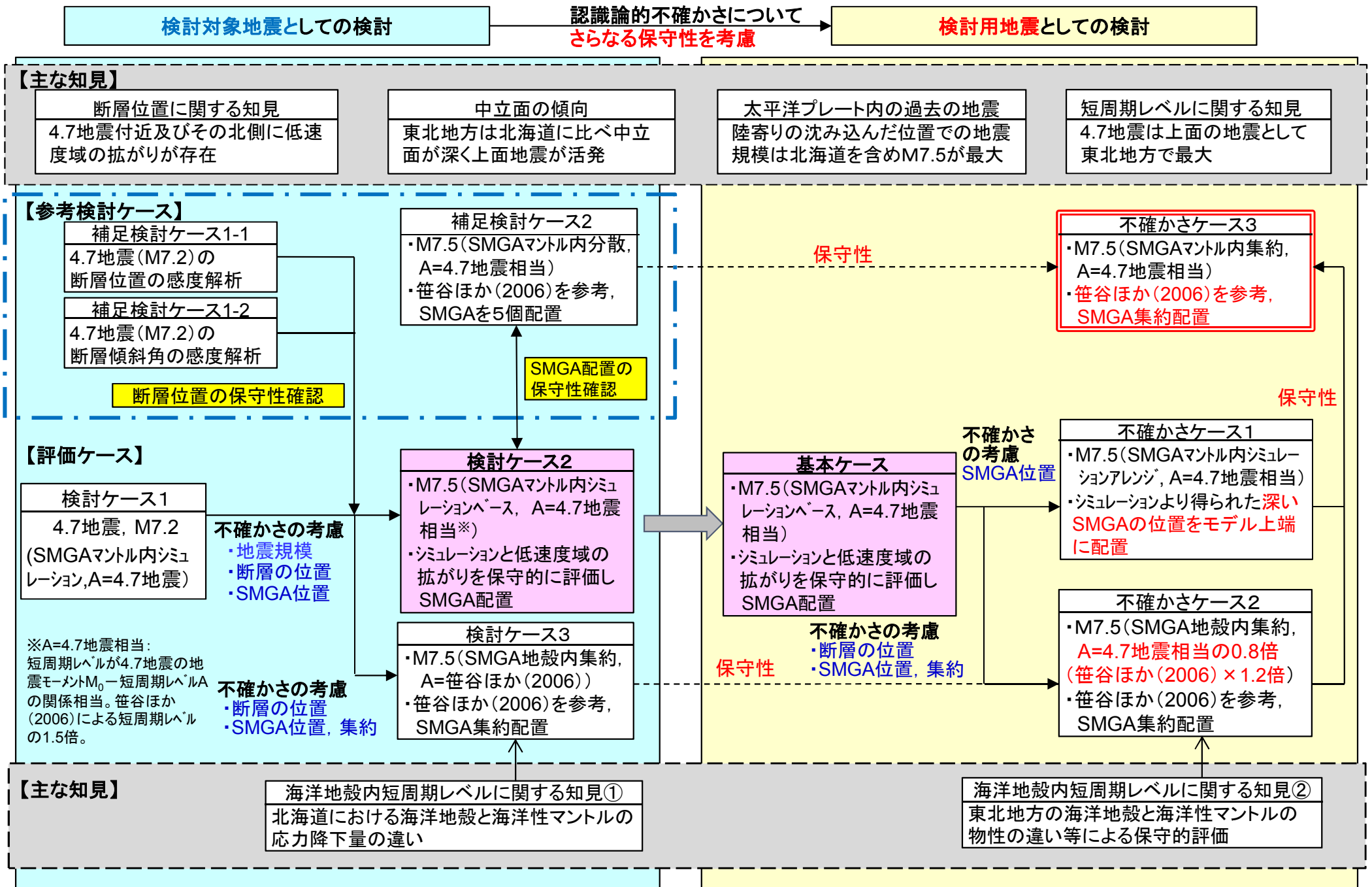
2. 検討対象地震の地震動評価

2. 2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

2. 検討対象地震の地震動評価

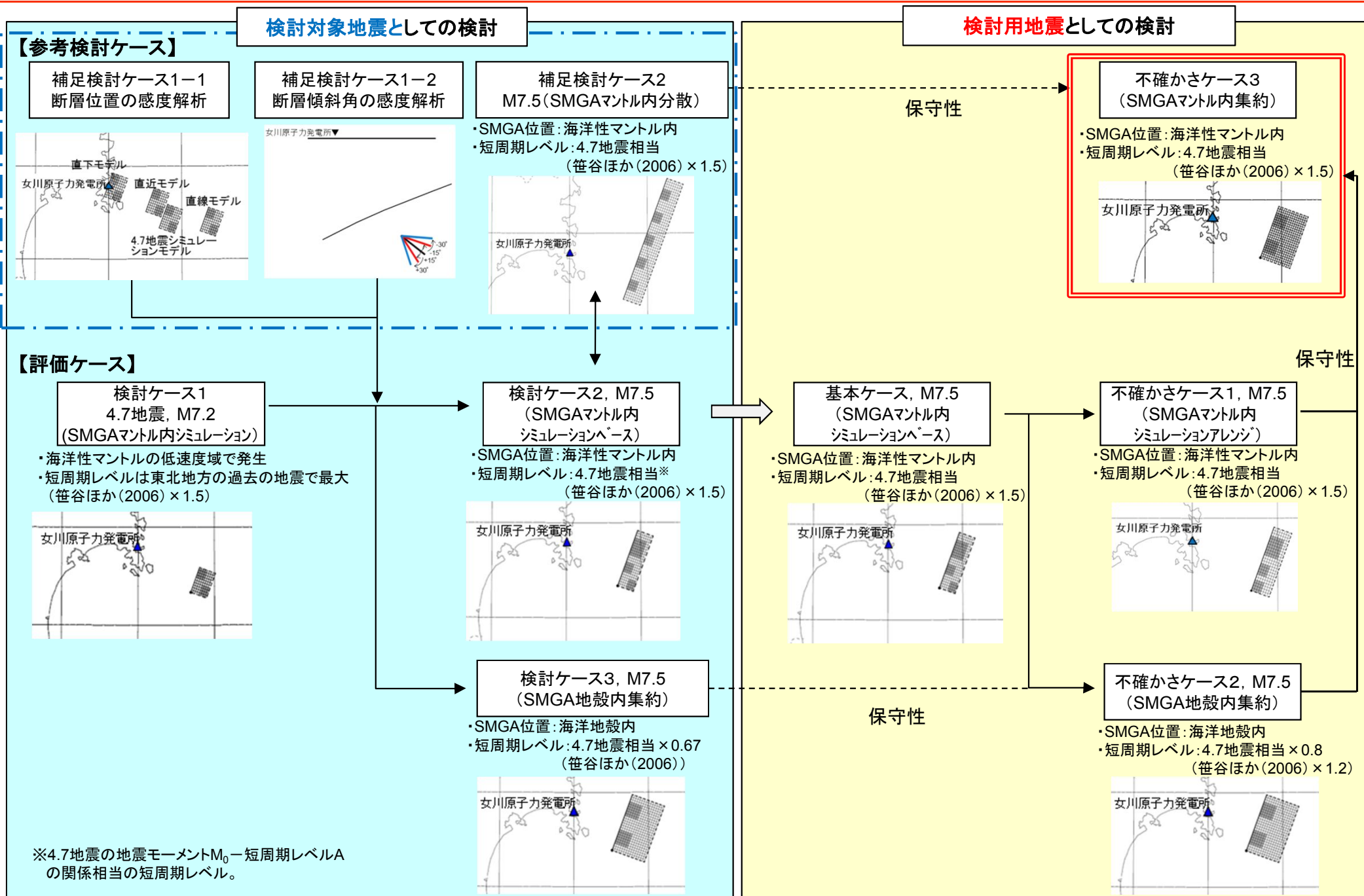
2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 検討のフロー

第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.25 一部修正



2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 検討のフロー



2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.27 一部修正

■4.7地震を踏まえた不確かさの考え方の整理

・主要な断層パラメータについて、海洋プレート内地震に関する知見等を踏まえ、認識論的不確かさと偶然的不確かさに分類して、敷地へ与える影響が大きいパラメータについて不確かさを考慮し、地震動評価を行う。

【認識論的不確かさ】: 事前の詳細な調査や経験式などに基づき設定できるもの。

【偶然的不確かさ】: 事前の詳細な調査や経験式などに基づく特定が困難なもの。

	認識論的不確かさ	偶然的不確かさ
地震規模	<ul style="list-style-type: none"> 過去に東北地方で発生した沈み込んだ海洋プレート内地震の最大規模はM7.3であるが、4.7地震の発生域(余震域)の北側には低速度域が広がっていることから、M7.3より大きいM7.5を不確かさとして考慮する。沈み込んだ海洋プレート内地震としては、北海道を含め最大規模(M7.5)に相当し、保守的な設定となる。⇒ 検討ケース2 (検討ケース3, 補足検討ケース2に対しても保守的に同じM7.5を適用。) 	—
断層位置	<ul style="list-style-type: none"> 地震の繰り返し性から4.7地震の断層モデルをベースとして考慮し、さらに北側に低速度域の広がりが認められることから、不確かさとして北側に拡張したモデルを考慮。⇒ 検討ケース2 	<ul style="list-style-type: none"> 4.7地震の発生位置が敷地への影響が大きい位置であることの確認のため感度解析を実施。⇒ 補足検討ケース1-1 M7.5の規模の地震を考慮することを前提とした場合、笹谷ほか(2006)を参考に設定した場合の影響評価を実施。⇒ 補足検討ケース2
断層傾斜角	<ul style="list-style-type: none"> 沈み込んだ海洋プレート内地震は沈み込む海洋プレート内地震(アウトワライズ地震)の再活動と考えられ、プレートとのなす角は約60°程度となり、4.7地震の傾斜角はこれに対応する。地震の繰り返し性を考慮し4.7地震のシミュレーションモデルの傾斜角を用いる。 ⇒ 検討ケース2, 3, 補足検討ケース2 	<ul style="list-style-type: none"> 傾斜角の違いによる敷地への影響を確認するための感度解析を実施。⇒ 補足検討ケース1-2
強震動生成域(SMGA)の位置	<ul style="list-style-type: none"> 4.7地震のSMGAの位置を踏まえ設定。北側低速度域への拡張部分については、保守的に断層上端に設定。⇒ 検討ケース2 4.7地震の破壊領域は海洋性マントル内にとどまり海洋地殻まで至らなかったが、SMGAを最も敷地に近づけた場合の不確かさを考慮するために、地震規模M7.5相当の断層面積を海洋地殻まで拡張した上でSMGAを断層上端に設定。⇒ 検討ケース3 	
SMGAの短周期レベル(応力降下量)	<ul style="list-style-type: none"> 4.7地震の短周期レベルは東北地方の二重深発地震上面の地震として最も大きい値であり、これを踏襲。⇒ 検討ケース2, 補足検討ケース2 海洋地殻内にSMGAが位置するモデルについては、地殻とマントルの応力降下量の違いを考慮し、笹谷ほか(2006)を参考に設定。 ⇒ 検討ケース3 	—
破壊開始点	—	<ul style="list-style-type: none"> 敷地に対し最も影響の大きい位置(破壊が敷地に向かうように設定した位置)で考慮する。⇒ 全ての検討ケース

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.29 一部修正

■各検討ケースの主な断層パラメータ

検討ケース	地震規模M (Mw)	M_0 (Nm)	断層面積 (km ²)	傾斜角 (°)	短周期レベル (Nm/s ²)	SMGA面積 (km ²)	SMGA応力降下量 $\Delta\sigma$ (MPa)
検討ケース1 4.7地震	M7.2 (7.1 ^{※2})	4.74E+19 ^{※1}	180	37	1.16E+20 ^{※3}	72	120.3
検討ケース2 地震規模の検討	M7.5 (7.4 ^{※4})	1.58E+20 ^{※5}	402	37	1.72E+20 ^{※6}	161	119.6
検討ケース3 断層(SMGA)位置の検討	M7.5 (7.4 ^{※4})	1.58E+20 ^{※5}	858	37	1.15E+20 ^{※7}	170	77.6

※1: 4.7地震のF-netの値, ※2: $M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$, ※3: 原田・釜江(2011)での短周期レベル

※4: 4.7地震のMとMwの関係を基に設定, ※5: $M_0 = 10^{(1.5M_w + 9.1)}$

※6: 笹谷ほか(2006)での短周期レベル $A = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ の1.5倍,
4.7地震の地震モーメント M_0 —短周期レベルAの関係相当の短周期レベル。

※7: 笹谷ほか(2006)での短周期レベル $A = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$

■断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ・4.7地震の敷地での観測記録のシミュレーション解析を統計的グリーン関数法により行い(第367回審査会合 資料1-1 pp.33~39, 検討ケース1), 観測記録との整合性を確認していることから, 統計的グリーン関数法(SGF)により地震動評価を行う。波形合成は入倉ほか(1997)を用いる。

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

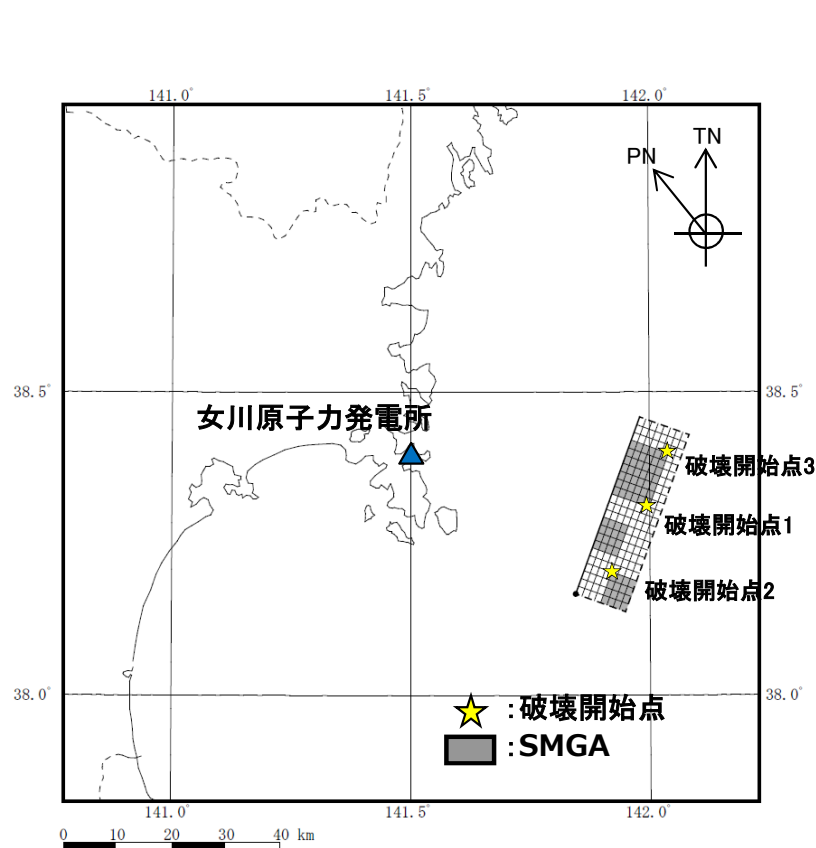
■検討ケース2 M7.5(SMGAマントル内シミュレーションベース)の検討

○断層モデル

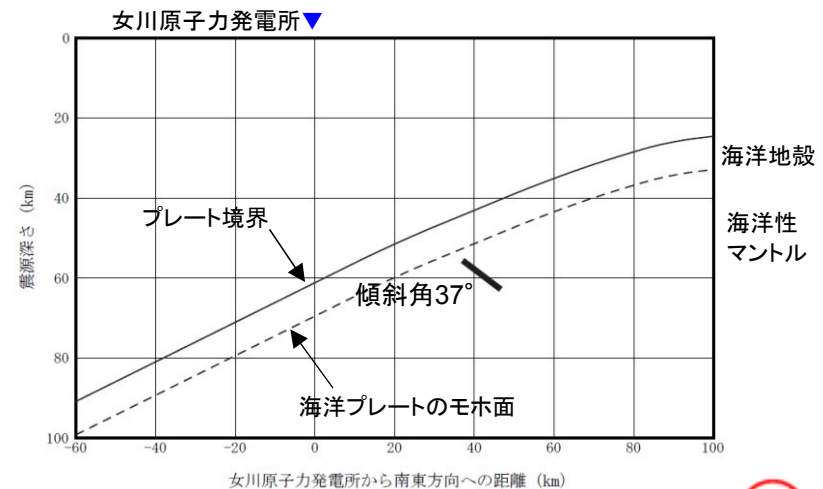
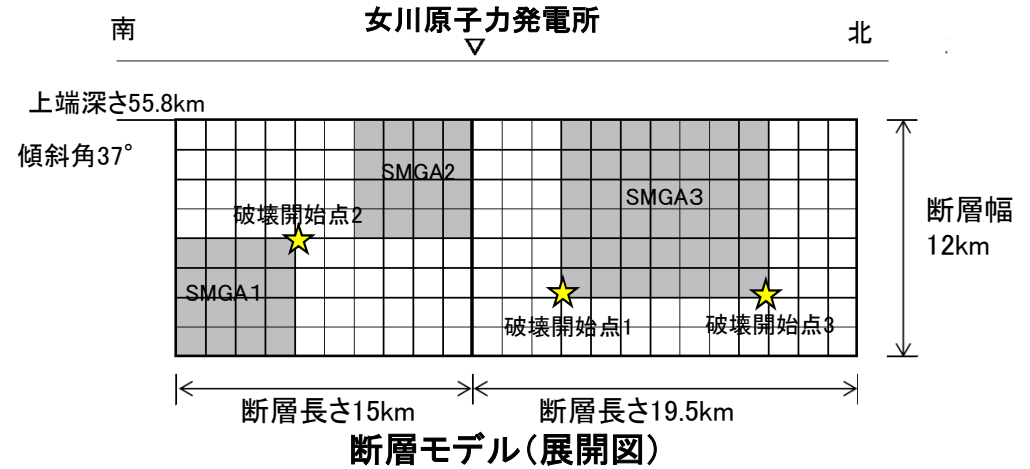
- ・検討ケース2 地震規模(M7.5)の断層モデルは、4.7地震シミュレーションモデル(M7.2)を北側に拡張したものとして設定。
- ・断層パラメータは、4.7地震シミュレーションモデルに基づき設定。強震動生成域(SMGA)は4.7地震モデルに加え、拡張部分に残りのSMGAを集中して配置。破壊開始点は破壊が敷地に向かう位置に複数点設定。

○断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ・4.7地震シミュレーションと同様の統計的グリーン関数法により評価。波形合成は入倉ほか(1997)を用いる。



断層モデル(平面図)



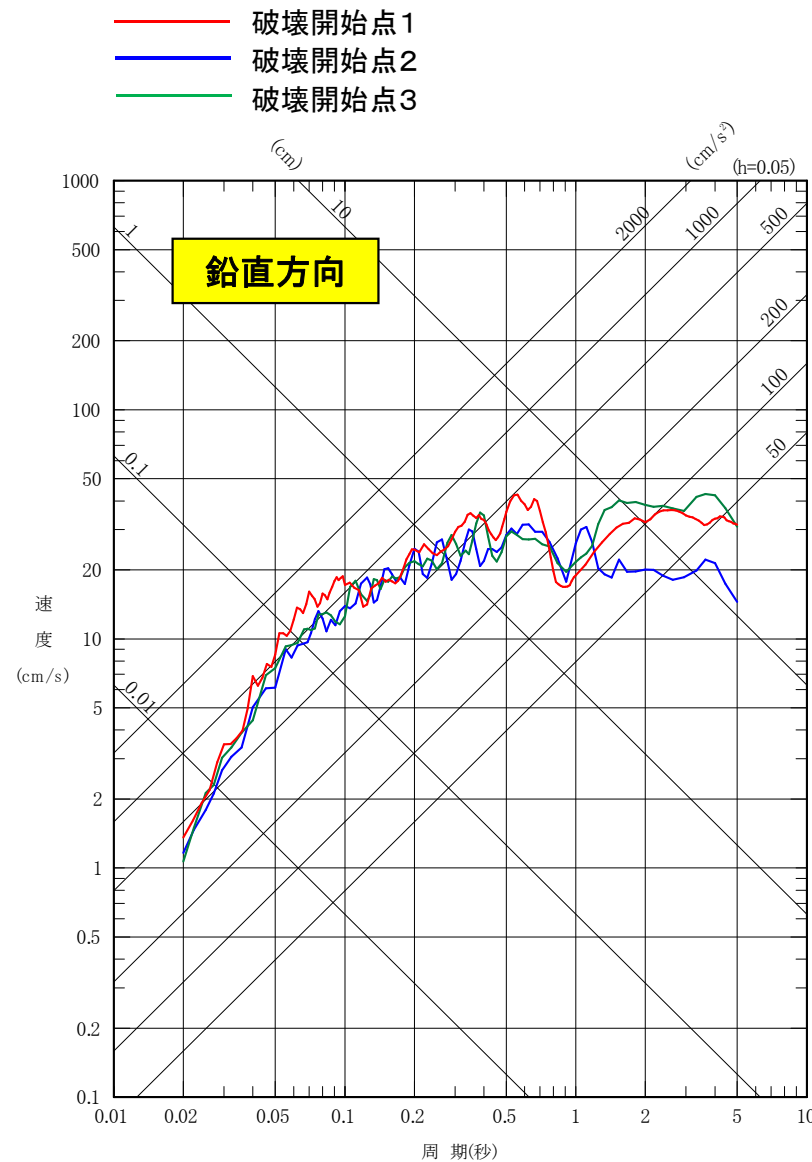
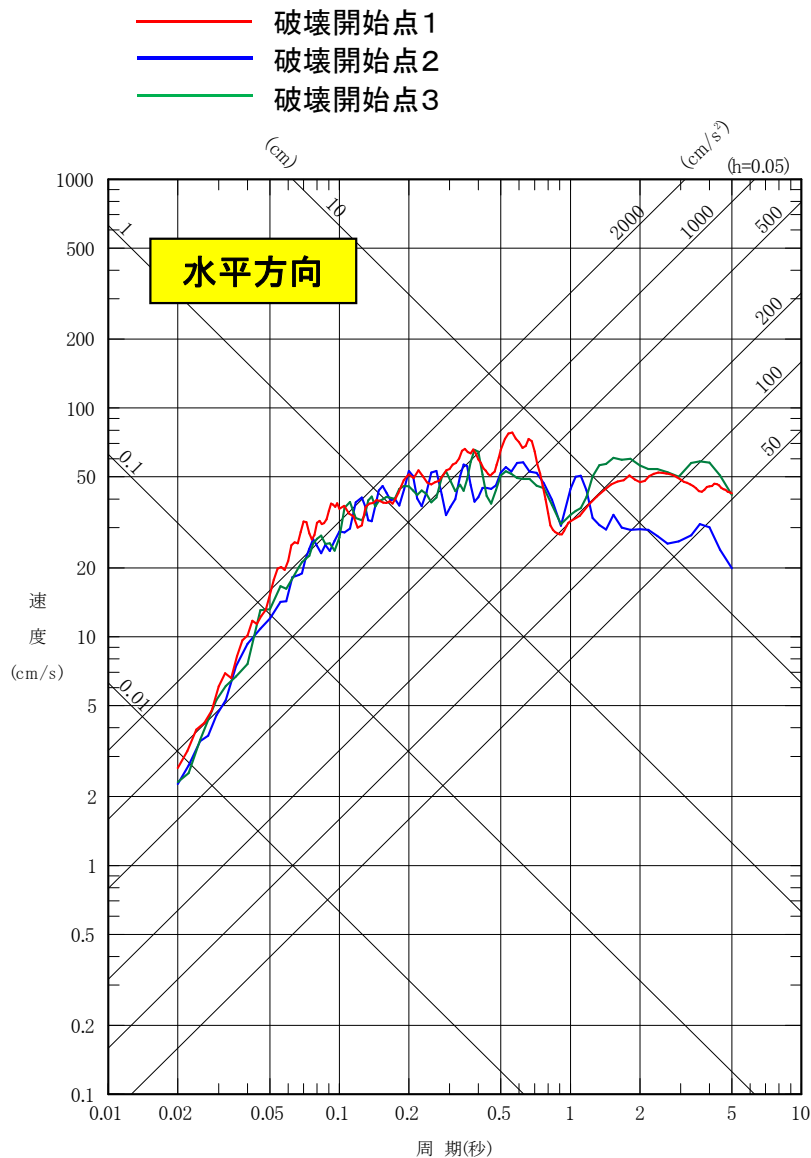
断面図

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.45 再掲

■ 検討ケース2 M7.5 (SMGAマントル内シミュレーションベース) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF <応答スペクトル>



2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.46 再掲

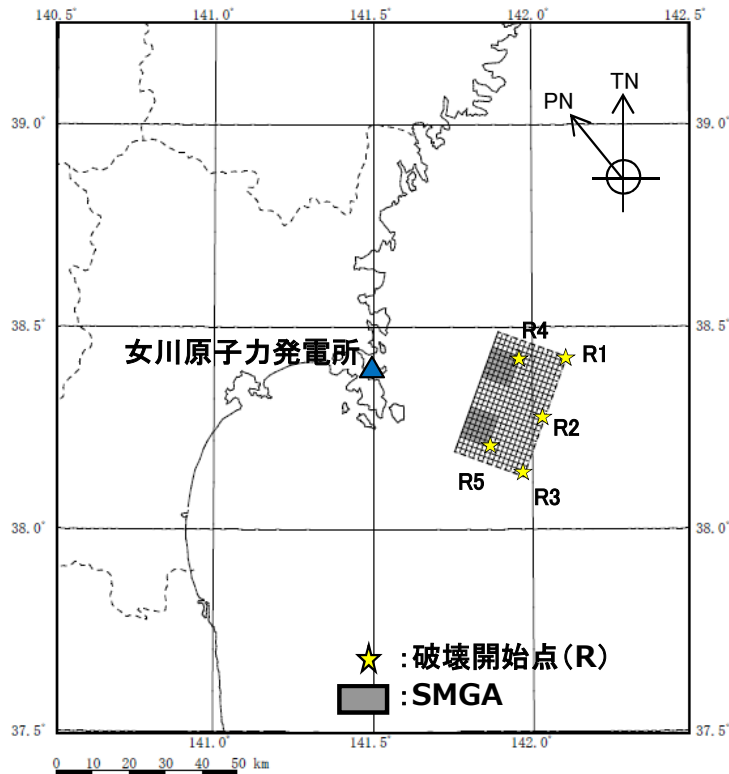
■検討ケース3 M7.5(SMGA地殻内集約)の検討

○断層モデル

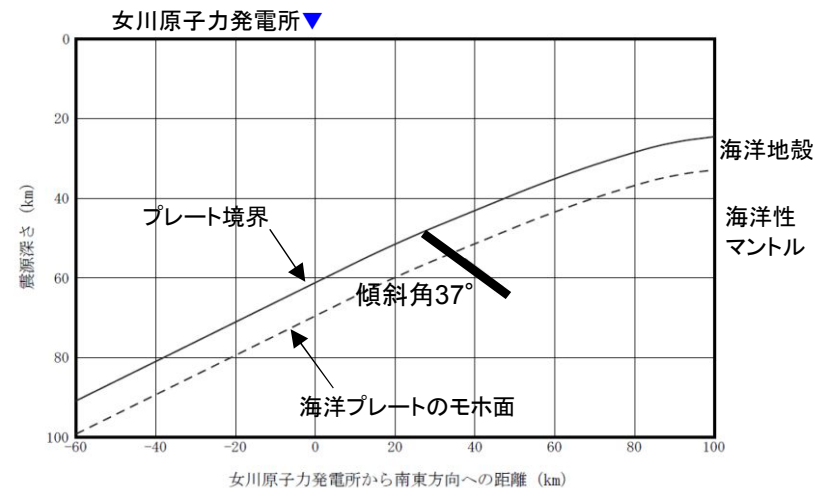
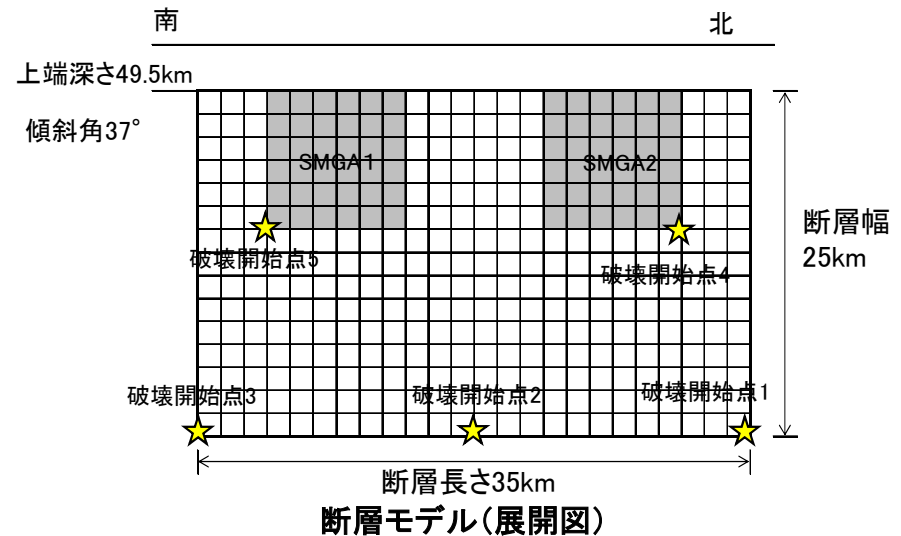
- ・4.7地震の破壊領域は海洋性マントル内にとどまり、海洋地殻まで至らなかったが、断層位置の不確かさとして海洋地殻内に強震動生成域(SMGA)を持つモデルを設定。断層の位置は、南端は4.7地震モデルの位置に固定し、断層面を北側に拡張。
- ・断層パラメータは、4.7地震とはSMGA位置が異なることから笹谷ほか(2006)により設定。応力降下量は4.7地震の約1/1.5となるが、海洋地殻と海洋性マントルの物性の違い(pp.90~92)も踏まえこれを採用。

○断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ・統計的グリーン関数法により評価。
- ・波形合成は入倉ほか(1997)を用いる。



断層モデル(平面図)



断面図

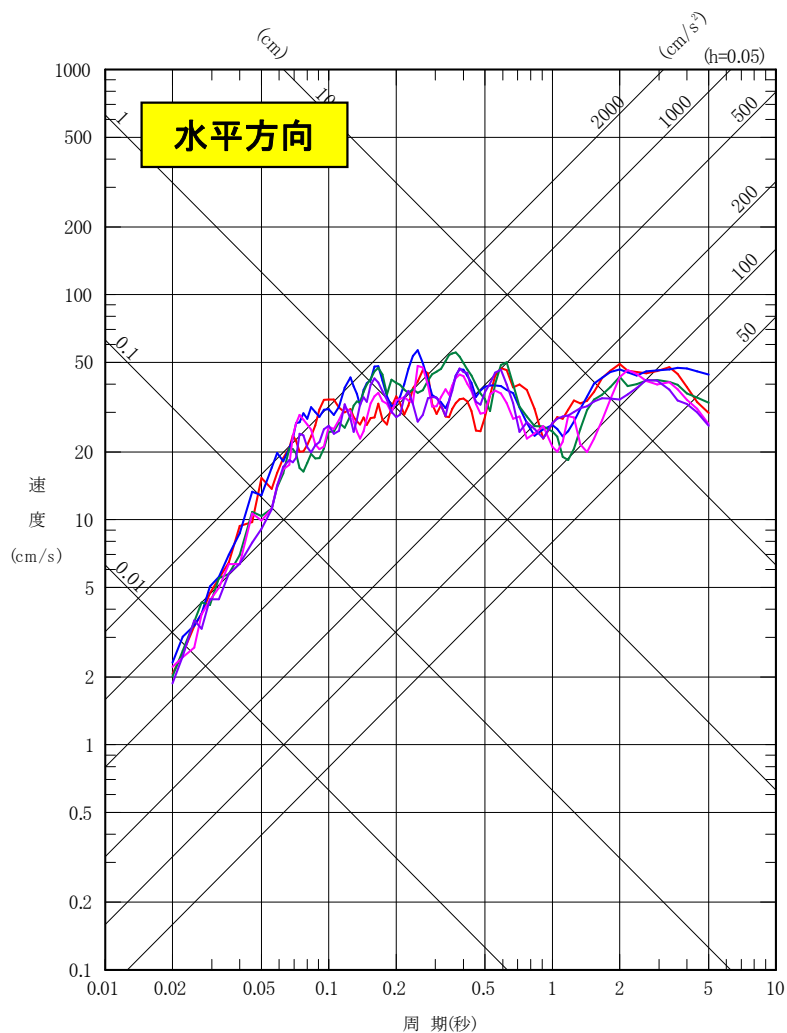
2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

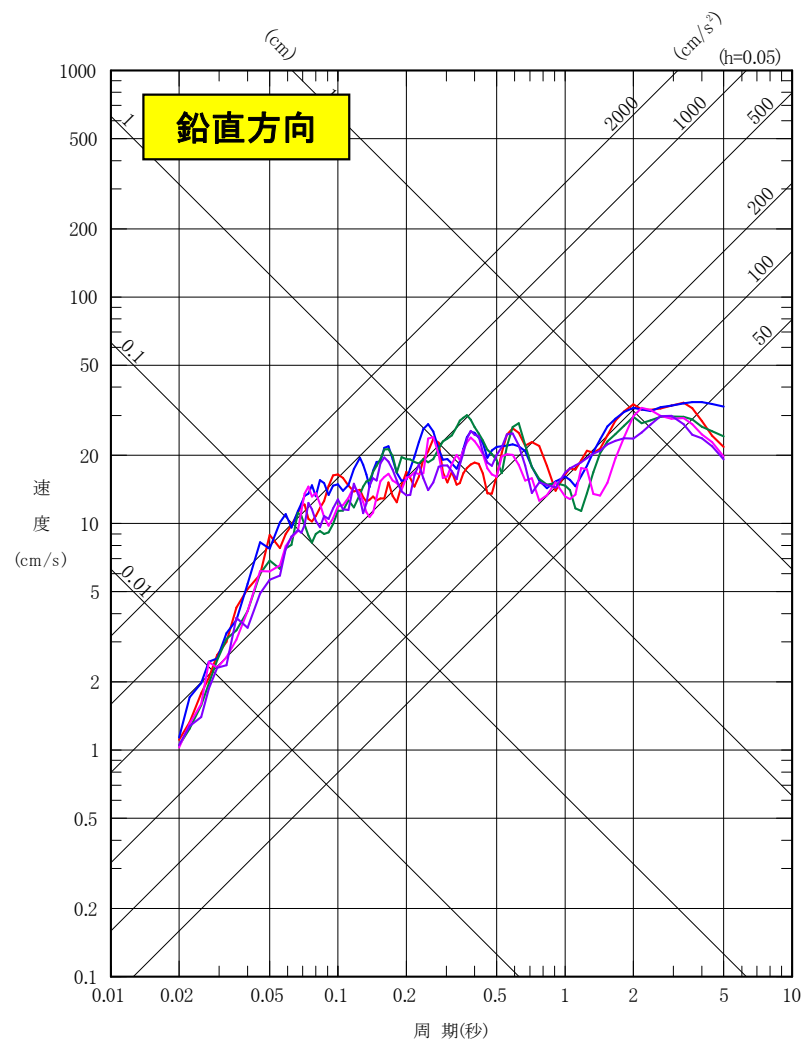
第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.53 一部修正

■検討ケース3 M7.5(SMGA地殻内集約)断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF ＜応答スペクトル＞

- 破壊開始点1
- 破壊開始点2
- 破壊開始点3
- 破壊開始点4
- 破壊開始点5



- 破壊開始点1
- 破壊開始点2
- 破壊開始点3
- 破壊開始点4
- 破壊開始点5

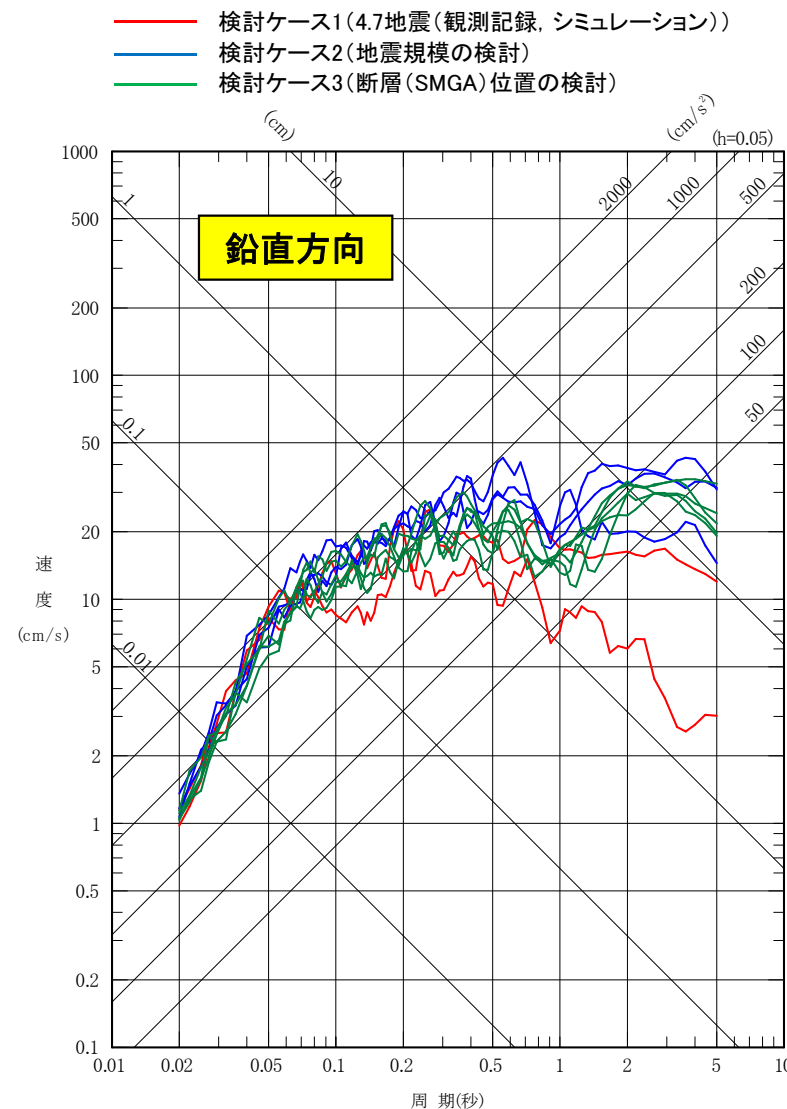
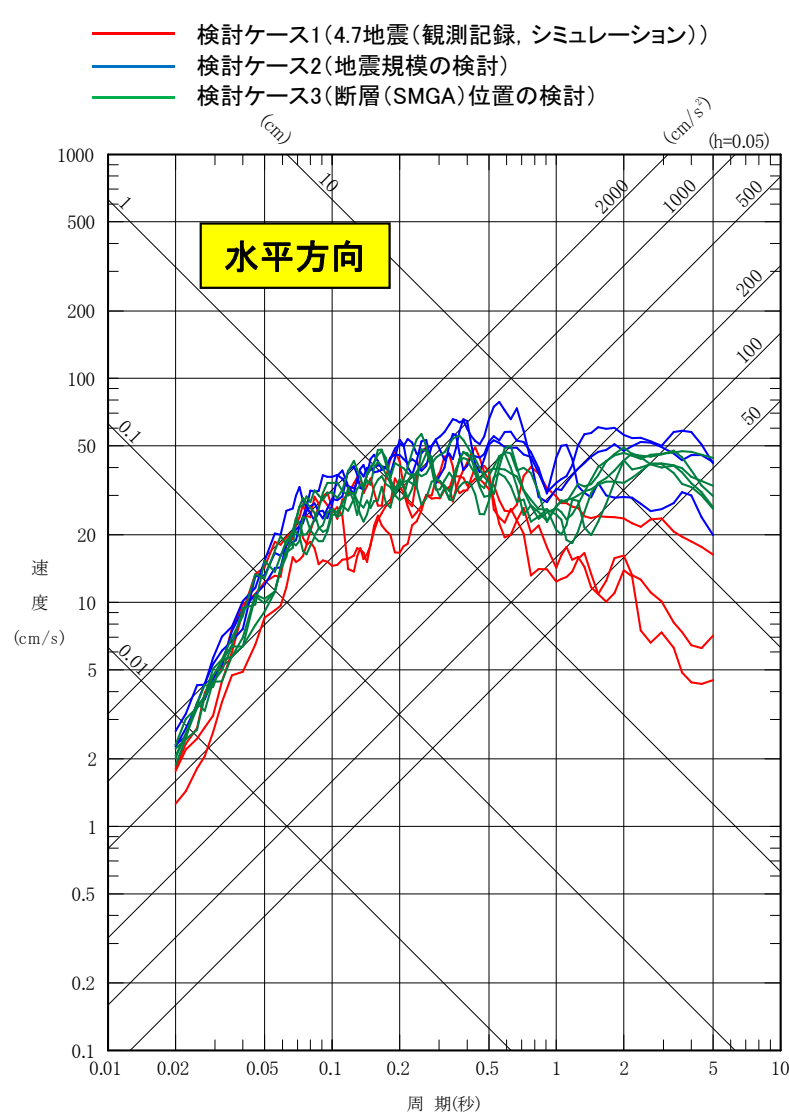


2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.54 一部修正

■ 検討対象地震 4.7型地震の地震動評価結果(検討ケース1~3の結果)

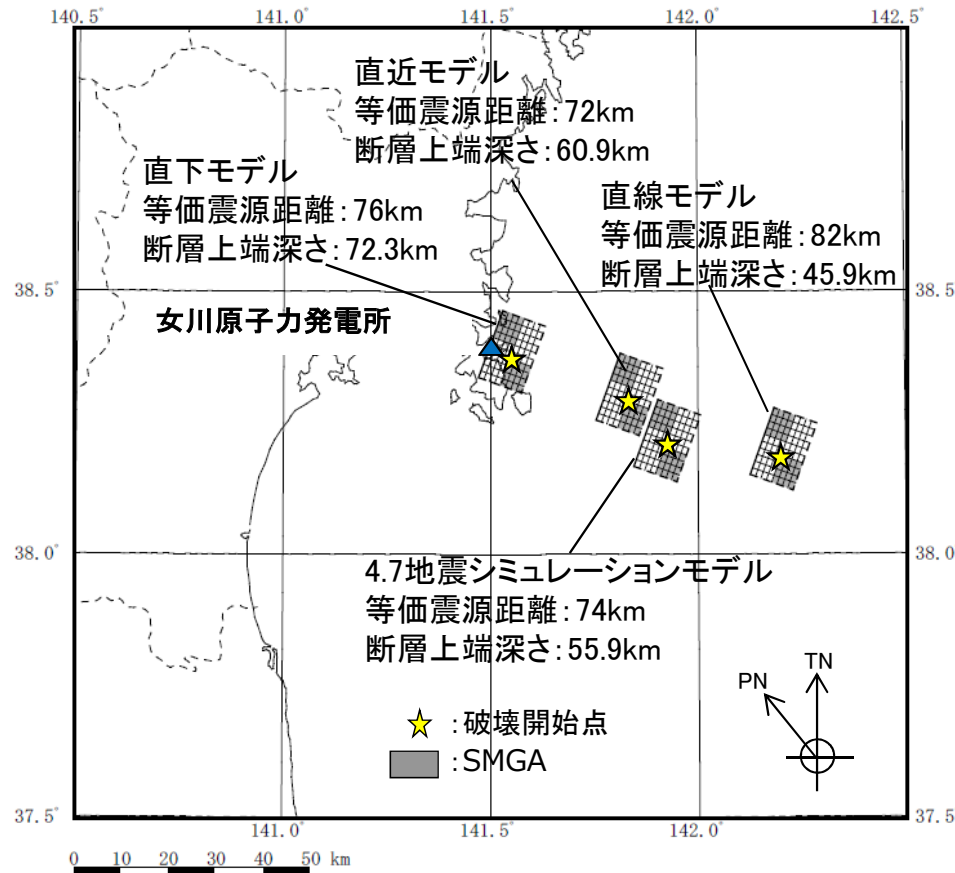


2. 検討対象地震の地震動評価

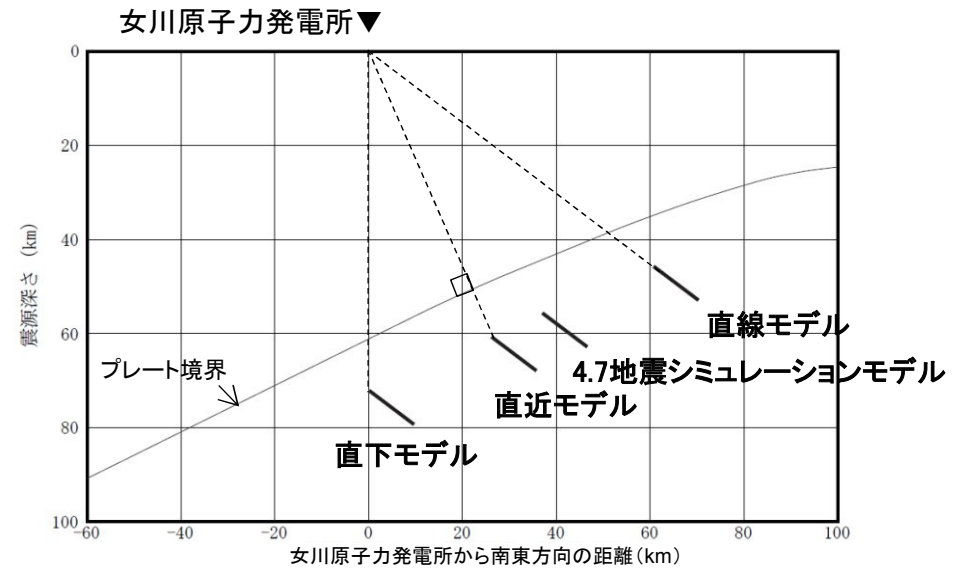
2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 補足検討ケース1-1

■補足検討ケース1-1 断層の想定位置の検討

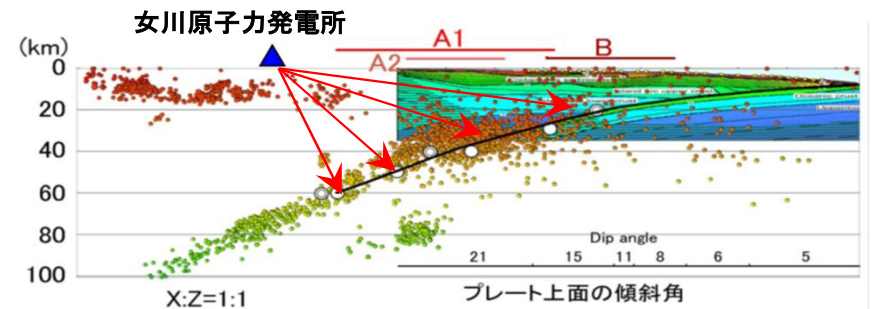
- 断層の位置の違いが敷地に与える影響について確認するために、断層の位置を敷地直下に配置した場合(直下モデル)、敷地から最短となるようにプレート上面に垂線を引いた位置の場合(直近モデル)及び、断層モデルの傾斜角(37°)が敷地の方向に一致する位置に配置した場合(直線モデル)について、統計的グリーン関数法(波形合成は入倉ほか(1997))により評価を行い、4.7地震シミュレーションモデル(検討ケース1)との比較を行う。
- なお、プレートの沈み込み形状から、4.7地震の位置より敷地に近づけても断層位置が深くなるため、敷地との距離は大きくは変わらない。



断層モデルの平面図



敷地と断層モデルの位置関係(南側からの断面)

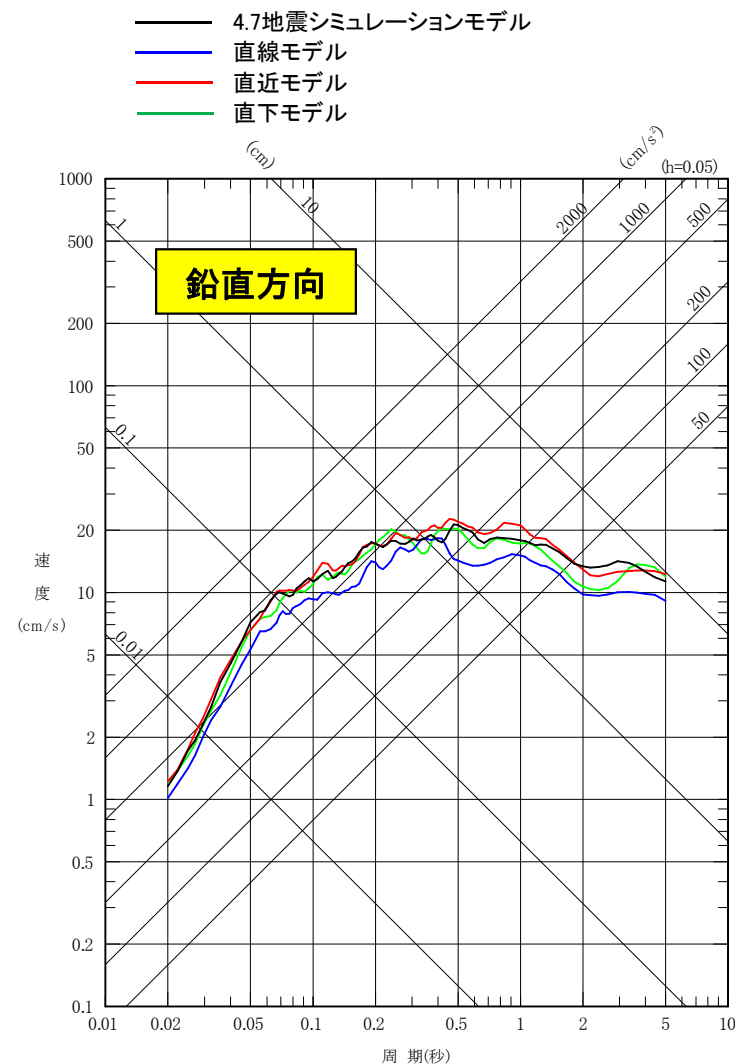
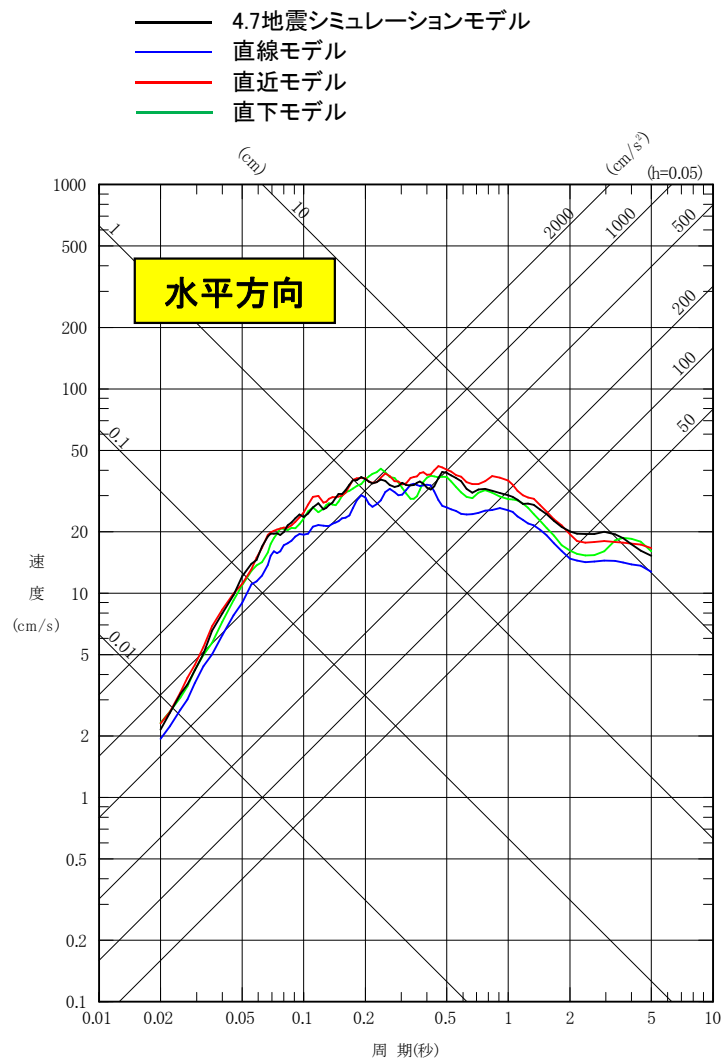


敷地とプレート境界の位置関係(地震本部(2005)に一部加筆)

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 補足検討ケース1-1

■補足検討ケース1-1 断層の想定位置の検討 評価結果<平均応答スペクトル>



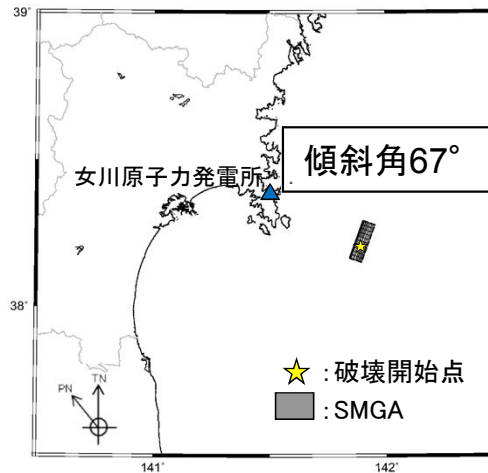
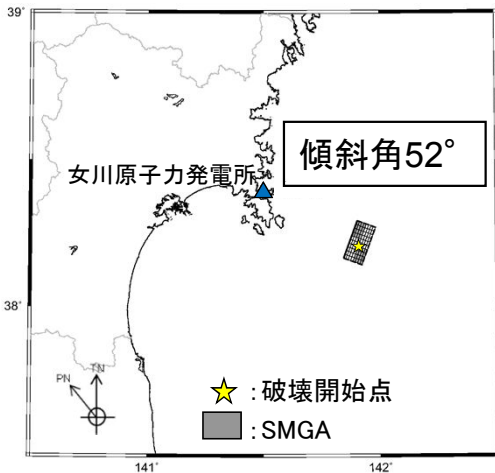
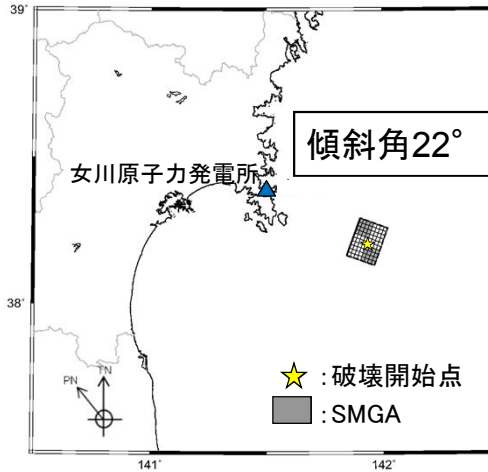
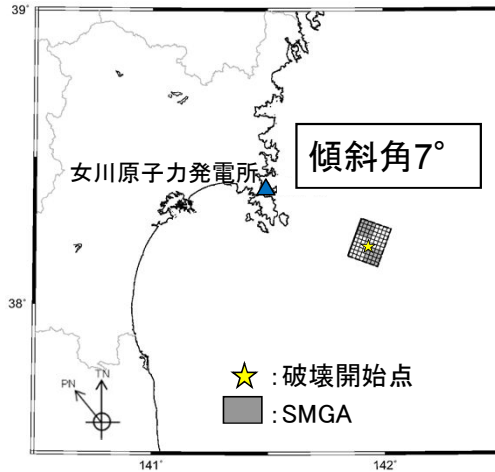
断層の位置の違いが敷地の地震動に与える影響は大きいものではないが、傾向的には短周期側は4.7地震発生位置及び直近モデルの評価結果がやや大きい。

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 補足検討ケース1-2

■補足検討ケース1-2 断層の傾斜角の検討

- ・沈み込んだ海洋プレート内の地震は、沈み込む海洋プレート内地震(アウターライズの地震)の断層面の再活動と考えられており、プレート境界面に対して一定の角度を有している傾向にあること、また、4.7地震は実際に発生した地震であることから、4.7地震位置で考慮する地震の傾斜角は実地震の傾斜角を踏襲することが基本と考えられるが、ここでは傾斜角の違いが地震動評価にどの程度の影響を与えるかについて、感度解析を実施する。
- ・沈み込んだ海洋プレート内の地震の傾斜角の影響を確認するため4.7地震シミュレーションモデルの傾斜角 37° に、 $\pm 15^\circ$ (22° , 52°), $\pm 30^\circ$ (7° , 67°)の傾斜を考慮して地震動評価を行う。
- ・地震動評価は、4.7地震シミュレーションと同様に統計的グリーン関数法(波形合成は入倉ほか(1997))により評価する。



女川原子力発電所▼

プレート境界

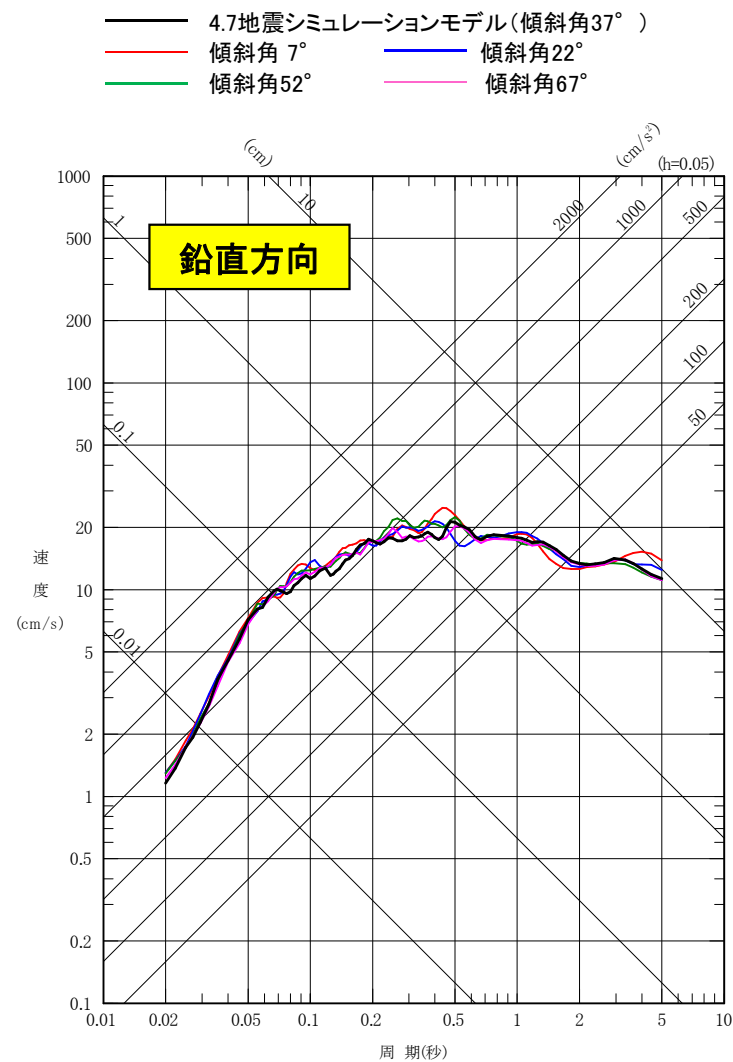
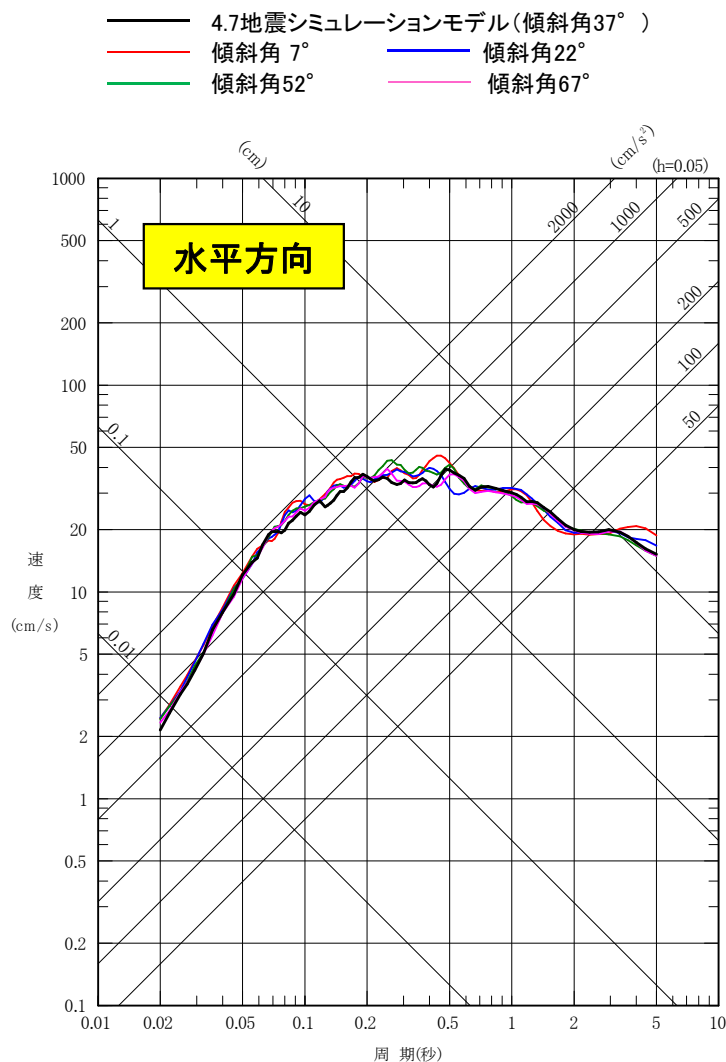
- : 4.7地震シミュレーション(37°)
- : 傾斜角 $\pm 15^\circ$ (22° , 52°)
- : 傾斜角 $\pm 30^\circ$ (7° , 67°)

模式図(東西断面)

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 補足検討ケース1-2

■補足検討ケース1-2 傾斜角の検討の評価結果 <平均応答スペクトル>



各傾斜角の結果は、概ね同程度であり、傾斜角の影響は小さい。

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 補足検討ケース2

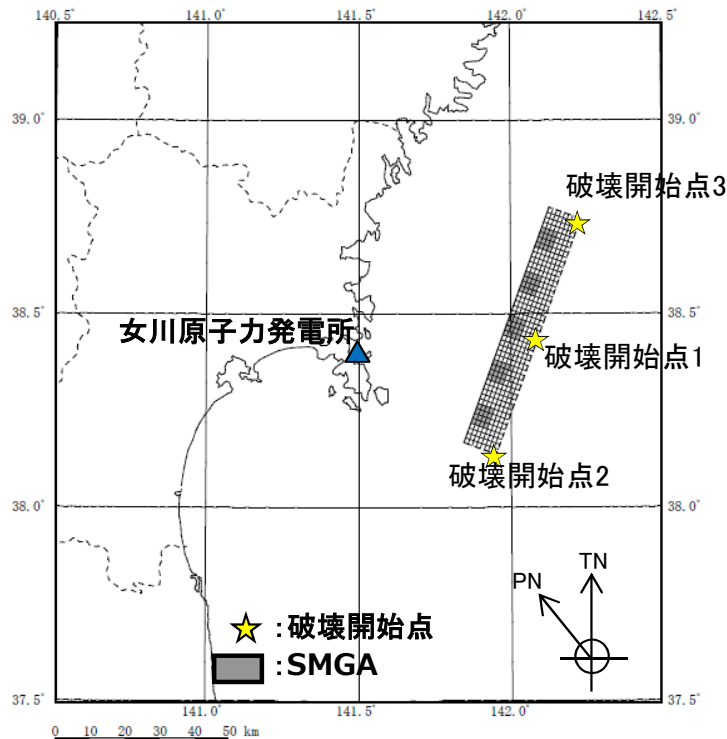
■補足検討ケース2 笹谷ほか(2006)による検討

○断層モデル(M7.5)の設定

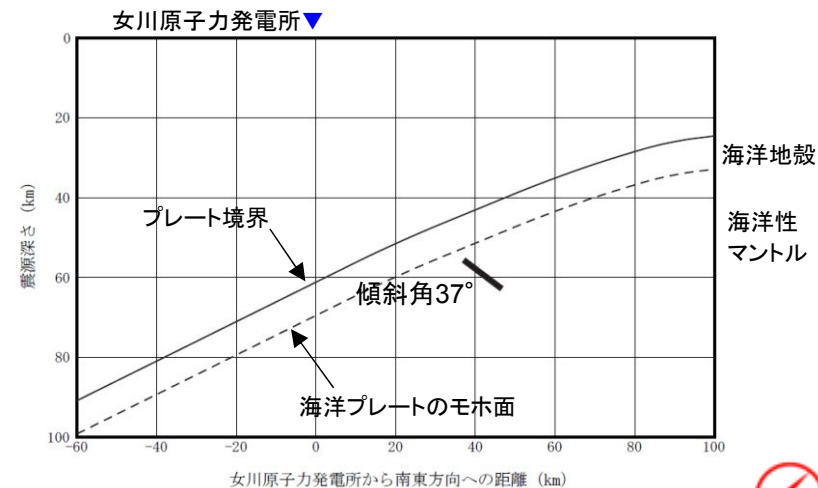
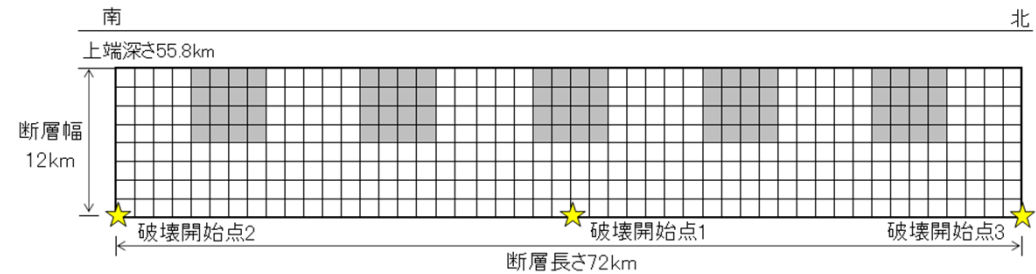
- ・検討ケース2では、4.7地震や低速度域の傾向を踏まえSMGAを配置しているが、仮に当該地域についてこのような情報が無い場合は、標準的なレシピに基づき断層モデルを設定することになる。ここでは、笹谷ほか(2006)に基づきM7.5のモデルを組んだ場合の敷地に与える影響について確認する。
- ・断層モデルの巨視的面は断層域を検討ケース2と同様の幅(海洋性マントル内)とし、Nakajima et al.(2011)の4.7地震の震源域の地震波トモグラフィによるS波速度構造を参考にした上で南端を固定し、北側に拡張した。
- ・強震動生成域(SMGA)は、断層面に対しバランスを考慮し、均等に5個配置した。
- ・断層パラメータは笹谷ほか(2006)に基づき設定する。短周期レベルは4.7地震の地震モーメント M_0 —短周期レベルAの関係相当(笹谷ほか(2006)の1.5倍)を考慮する。

○断層モデルを用いた地震動評価結果による簡易評価

- ・統計的グリーン関数法により評価(波形合成は入倉ほか(1997))を行ったうえで(第309回審査会合 資料1 p.173), この結果について検討ケース2と同じ短周期レベル相当とするため全周期帯を1.5倍する。



断層モデル(平面図)



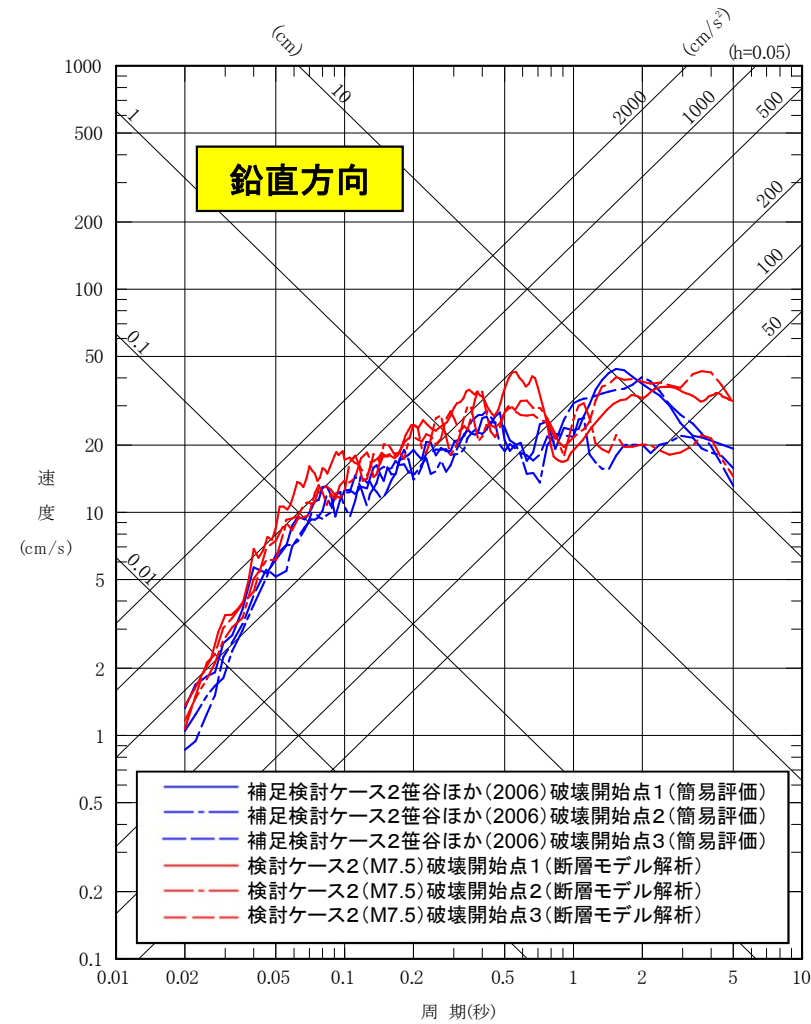
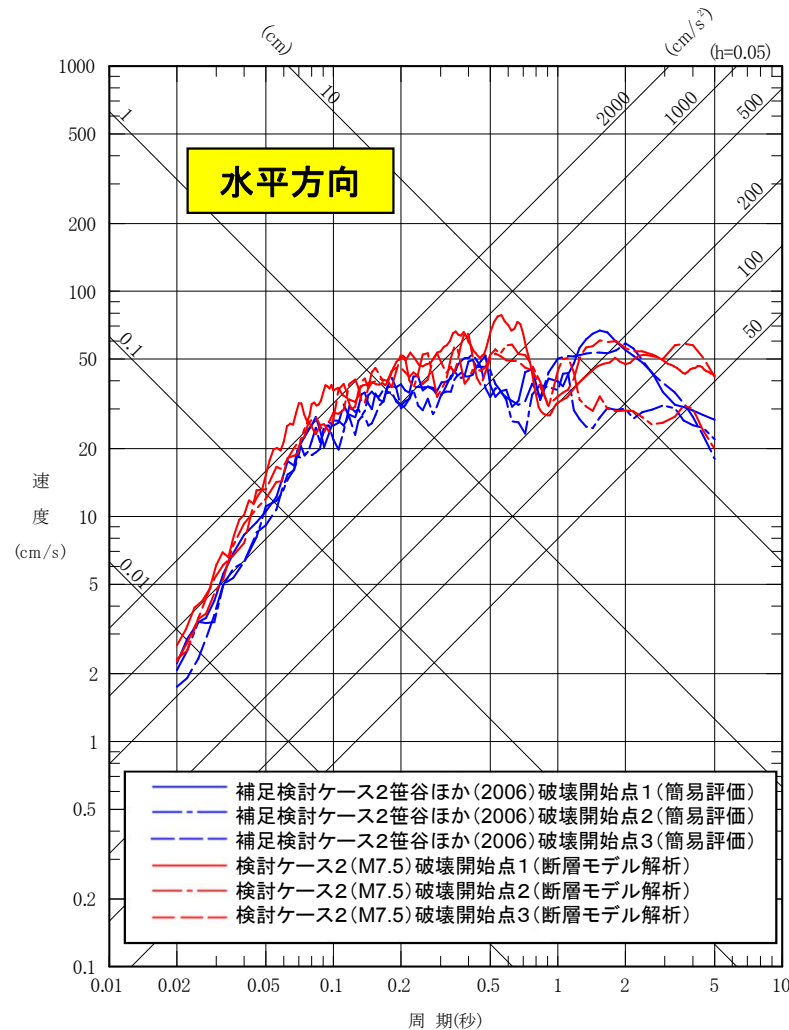
断面図

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震 補足検討ケース2

■補足検討ケース2 笹谷ほか(2006)による検討 簡易評価

・笹谷ほか(2006)で設定したM7.5の断層モデル(海洋性マントル内)による評価結果(第309回審査会合, 資料1p.173)を全周期帯で1.5倍。



検討ケース2(4.7地震をベースに低速度域の拡がりを考慮してSMGAを設定したモデル)の方が, 補足検討ケース2(笹谷ほか(2006)に基づき設定したモデル)に比べ, 特に短周期などは大きな評価結果を与えている。
また, このことは, 地震規模の増大に伴い断層長さが長くなったとしても(第309回審査会合 資料1 pp.174~177), 敷地に対する影響は必ずしも大きくなること示している。

2. 検討対象地震の地震動評価

2.2 二重深発地震 上面の地震 4.7型地震

検討対象地震 検討結果のまとめ

検討対象地震の中で、4.7型地震が敷地に与える影響が最も大きいことから、4.7型地震を検討用地震として選定した。また、4.7型地震の検討対象地震としての検討結果を踏まえ、検討用地震の不確かさケースの設定に反映する事項は以下の通り。

- ①4.7地震のシミュレーションモデルによる断層位置の検討から、4.7地震の発生位置が敷地に対して影響が大きい位置であること、また、シミュレーションでの評価方法(統計的グリーン関数法、放射特性一定)では、傾斜角による影響は小さいことを確認した。従って、検討用地震の基本ケース、不確かさケースとも4.7地震の発生場所や傾斜角を踏襲する。
- ②4.7地震のシミュレーションモデルの断層面を低速度域の拡がり等を考慮して北側に拡張し地震規模をM7.5としたケース(検討ケース2)では、拡張部分のSMGAを一箇所に集約している。一方、同じ地震規模の地震を笹谷ほか(2006)に準じて設定したケース(補足検討ケース2)は、太平洋プレートの中立面による断層幅の制約やSMGAのバランス配置も考慮すると、SMGAが周辺に分散配置されることになり、短周期などは敷地に対し小さい結果となった。このことは、地震規模の増大に伴い断層長さが長くなったとしても、敷地に対する影響は必ずしも大きくなることを示す。SMGAを敷地近くに集約するケースの影響が大きいため、**M7.5の海洋性マントル内の地震について、SMGAの配置に留意した不確かさケースについて、さらなる検討を行う。**
- ③4.7型地震の地震動評価として海洋地殻にSMGAを配置したケース(検討ケース3)は、海洋性マントルにSMGAを配置したケース(検討ケース2)の評価結果に対しほとんどの周期帯で下回る結果となっている。しかし当該検討については、
 - ・北海道における海洋性マントルと海洋地殻の応力降下量の違いに関する知見から検討ケース3の短周期レベルを設定しているが、東北地方における直接的・間接的な知見も踏まえた検討が必要なこと
 - ・また、地震動評価方法もSMGAが海洋性マントル内に位置する検討ケース2と同じ方法を適用したが、モデルの特徴を踏まえた地震動評価方法の採用についての検討が必要なことから、**海洋地殻にSMGAを配置したモデルについても、検討用地震として、モデルの設定や地震動の評価方法について、さらなる検討を行う。**

3. 検討用地震の基本ケース，不確かさケースの設定

No.	コメント時期	コメント内容
S139	平成28年6月3日 第367回審査会合	不確かさケース1のSMGA位置が保守的な設定となっていることの確認のため実施した参考ケースについて，不確かさケースとして扱った方がよいのではないか。

余白

3. 検討用地震の基本ケース，不確かさケースの設定

基本ケース，不確かさケースの整理

■ 不確かさの考え方の整理

- ・主要なパラメータについて，海洋プレート内地震に関する知見等を踏まえ，認識論的不確かさと偶然的不確かさに分類し，敷地に与える影響が大きいパラメータについて不確かさを考慮し，地震動評価を行う。

【認識論的不確かさ】：事前の詳細な調査や経験式などにに基づき設定できるもの。

【偶然的不確かさ】：事前の詳細な調査や経験式などに基づく特定が困難なもの。

不確かさの種類	パラメータ	基本ケースでの設定	不確かさの考慮
認識論的不確かさ	地震規模	M7.5 (Mw7.4)	予め不確かさを考慮 ・基本ケースの段階で，過去の東北地方で発生した海洋プレート内地震の最大規模(M7.3)を上回る規模であり，また，沈み込んだ海洋プレート内地震としては，北海道を含め最大規模(M7.5)に相当し，保守的な設定となっている。
	断層の位置	海洋性マントル内	不確かさケースとして考慮 ・基本ケースでは，4.7地震の断層位置及び傾斜角が敷地に対し厳しい位置であることを確認したうえで，4.7地震と同じ海洋性マントル内に設定しているが，断層位置の不確かさとして破壊領域が4.7地震の延長方向に海洋地殻まで拡がることを考慮する。
	短周期レベル (応力降下量)	4.7地震の短周期レベル相当※	予め不確かさを考慮 ・SMGAを海洋性マントル内に設定する基本，不確かさケースでは，4.7地震が東北地方の二重深発地震上面の地震として最も大きい値であることから，保守的に4.7地震相当の短周期レベル(笹谷ほか(2006)による短周期レベルの1.5倍)を予め考慮する。 ・不確かさケースとしてSMGAを海洋地殻に設定する際は，海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い(0.47～0.70倍)を保守的に考慮し，4.7地震相当の短周期レベルの0.8倍(笹谷ほか(2006)による短周期レベルの1.2倍)を考慮する。
	SMGA位置	4.7地震シミュレーション位置 + 拡張側は断層上端	不確かさケースとして考慮 ・基本ケースでは，4.7地震部分は4.7地震のSMGAの位置を踏襲し，北側に拡張した部分のSMGAは予め断層上端(海洋性マントル内)に設定。また，不確かさケースとして保守的に4.7地震部分のSMGAを断層上端に設定した場合を考慮する。 ・また，不確かさケースとして敷地に近い海洋地殻にSMGAを集約したケースを考慮する。さらに，この集約したSMGAを海洋性マントル位置で評価するケースも考慮する。
偶然的不確かさ	破壊開始点	破壊の伝播方向が敷地に向かうように配置	予め不確かさを考慮 ・基本ケース，不確かさケースとも，敷地に対し最も影響の大きい破壊開始点位置(破壊が敷地に向かうように設定した位置)で考慮する。

※：4.7地震の地震モーメント M_0 －短周期レベルAの関係相当の短周期レベルを考慮する。笹谷ほか(2006)の短周期レベルの1.5倍。

3. 検討用地震の基本ケース，不確かさケースの設定

基本ケース，不確かさケースの設定

■検討用地震の基本ケースと不確かさケース

・前頁での整理を踏まえ，下表のとおり基本ケースと不確かさケースを設定する。

検討ケース	断層モデルの設定条件				
	地震規模M	断層の位置	短周期レベル (応力降下量)	SMGAの位置	破壊開始点
基本ケース (SMGAマントル内 シミュレーションベース)	M7.5※1	海洋性マントル内	4.7地震の 短周期レベル相当※2	4.7地震シミュレーション位置 + 拡張側は断層上端	破壊の伝播方向 が敷地に向かう ように配置
不確かさケース1 (SMGAマントル内 シミュレーションアレンジ)	M7.5※1	海洋性マントル内	4.7地震の 短周期レベル相当※2	4.7地震シミュレーション位置 のSMGAを断層上端 + 拡張側は断層上端	破壊の伝播方向 が敷地に向かう ように配置
不確かさケース2 (SMGA地殻内集約)	M7.5※1	海洋地殻+ 海洋性マントル	4.7地震の 短周期レベル相当 の0.8倍※3	断層上端	破壊の伝播方向 が敷地に向かう ように配置
不確かさケース3 (SMGAマントル内集約)	M7.5※1	海洋性マントル内	4.7地震の 短周期レベル相当※2	断層上端	破壊の伝播方向 が敷地に向かう ように配置

: 予めモデルに織り込む不確かさ

: 考慮する不確かさ

※1: 宮城県沖のプレート内の低速度域の傾向に加え，過去の東北地方で発生した海洋プレート内地震の最大規模(M7.3)や北海道で発生した沈み込んだ海洋プレート内地震の最大規模(M7.5)も踏まえ，保守的にM7.5を考慮する。

※2: 4.7地震の地震モーメント M_0 —短周期レベルAの関係相当の短周期レベルを考慮する。笹谷ほか(2006)の短周期レベルの1.5倍。

※3: 海洋性マントルと海洋地殻の応力降下量の違いの傾向を踏まえたうえで，保守的に4.7地震の地震モーメント M_0 —短周期レベルAの関係相当の短周期レベルの0.8倍を考慮する。笹谷ほか(2006)の短周期レベルの1.2倍(=1.5×0.8)。

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定

基本ケース, 不確かさケースの設定

■ 検討用地震の基本ケースと不確かさケースの主な断層パラメータ

検討ケース	地震規模M (Mw)	M_0 (Nm)	断層面積 (km ²)	短周期レベル (Nm/s ²)	SMGAの面積 (km ²)	SMGAの応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa)
基本ケース (SMGAマントル内シミュレーションベース)	M7.5 (7.4※ ¹)	1.58E+20※ ²	402	1.72E+20※ ³	161	119.6
不確かさケース1 (SMGAマントル内シミュレーションアレンジ)	M7.5 (7.4※ ¹)	1.58E+20※ ²	402	1.72E+20※ ³	161	119.6
不確かさケース2 (SMGA地殻内集約)	M7.5 (7.4※ ¹)	1.58E+20※ ²	858	1.38E+20※ ⁴	170	93.1
不確かさケース3 (SMGAマントル内集約)	M7.5 (7.4※ ¹)	1.58E+20※ ²	858	1.72E+20※ ³	170	116.4

※1: 4.7地震のMとMwの関係を基に算定。

※2: $M_0 = 10^{(1.5M_w + 9.1)}$

※3: 笹谷ほか(2006)での短周期レベル $A = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ の1.5倍。4.7地震の地震モーメント M_0 —短周期レベルAの関係相当の短周期レベル。

※4: 笹谷ほか(2006)での短周期レベル $A = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ の1.2倍。4.7地震の地震モーメント M_0 —短周期レベルAの関係相当の短周期レベルの0.8倍。海洋性マントルと海洋地殻の応力降下量の違いの傾向を踏まえたうえで、保守的に設定。

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定 基本ケースの断層モデル

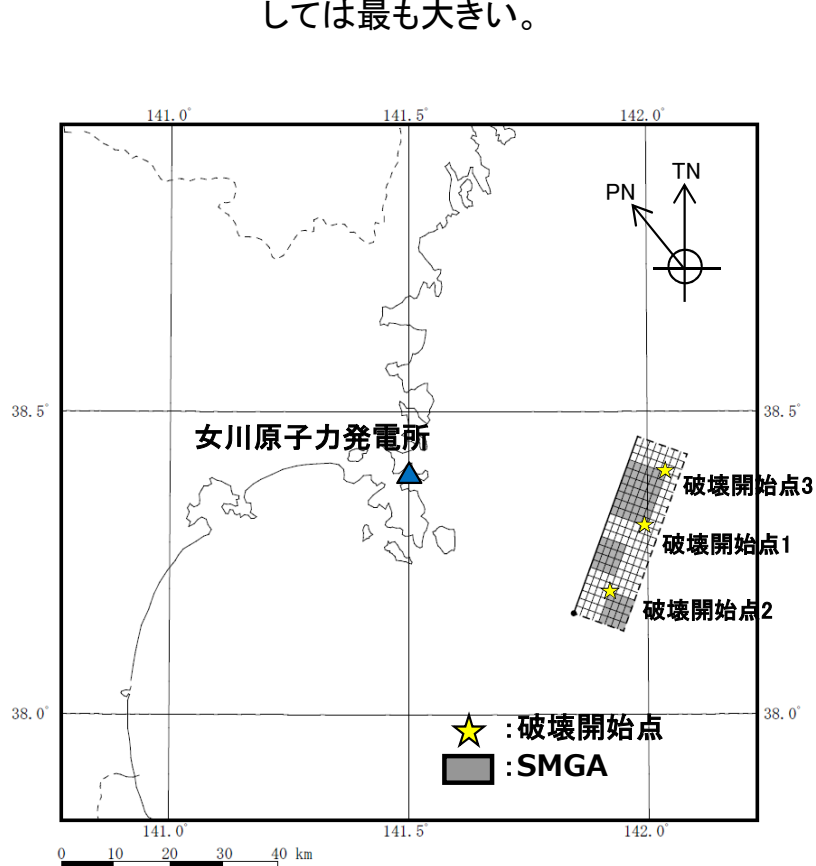
■基本ケース(SMGAマントル内シミュレーションベース)の設定の考え方

【地震規模】宮城県沖のプレート内の低速度域の傾向に加え, 過去の東北地方で発生した海洋プレート内地震の最大規模(M7.3)や北海道で発生した沈み込んだ海洋プレート内地震の最大規模(M7.5)も踏まえ, 保守的にM7.5を基本ケースとして考慮する。

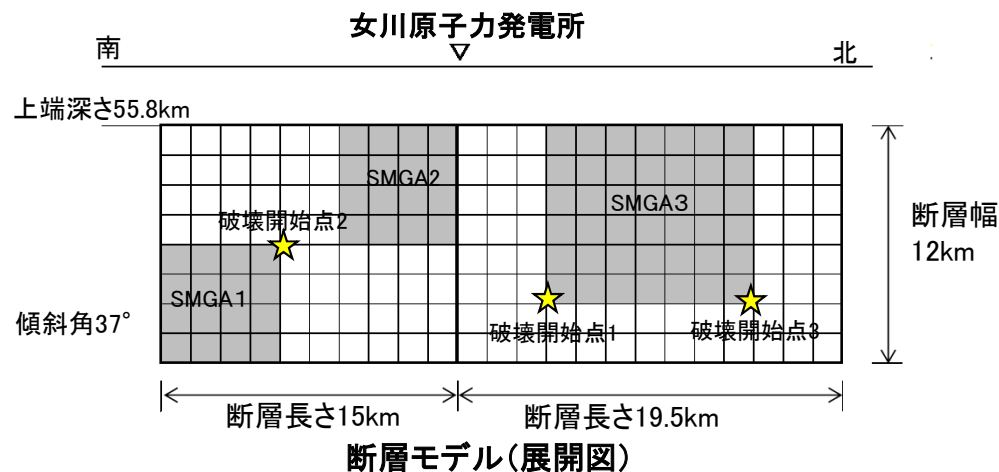
【断層の位置】4.7地震の断層面位置と地域性(低速度域の傾向)を踏まえ設定。なお, 4.7地震の発生位置が敷地に与える影響が大きい箇所であることを検討対象地震の段階で確認済み。

【SMGAの位置】4.7地震側はシミュレーションモデルのSMGA位置とし, 拡幅した領域については保守的に断層上端に設定。

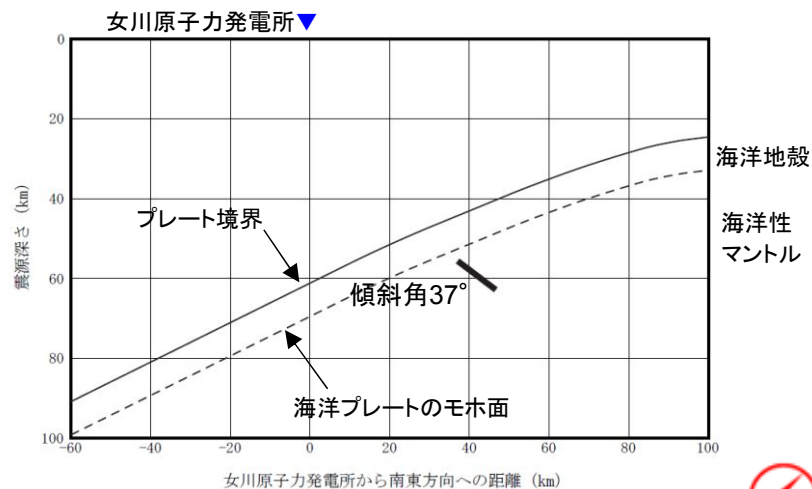
【短周期レベル】4.7地震の地震モーメント M_0 -短周期レベルAの関係を保持。なお, 4.7地震の短周期レベルは上面で発生した地震としては最も大きい。



断層モデル(平面図)



断層モデル(展開図)

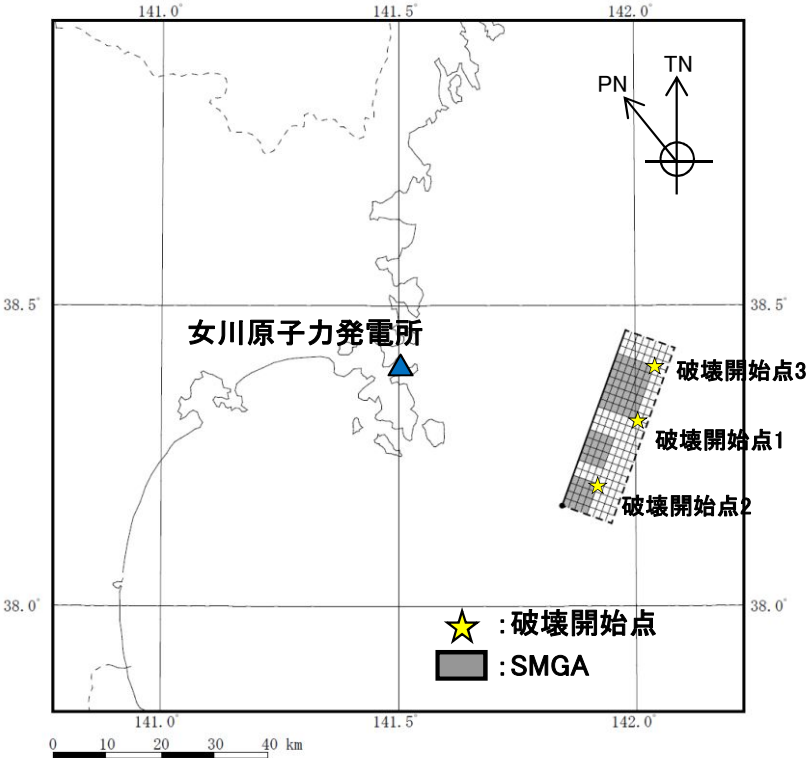


断面図

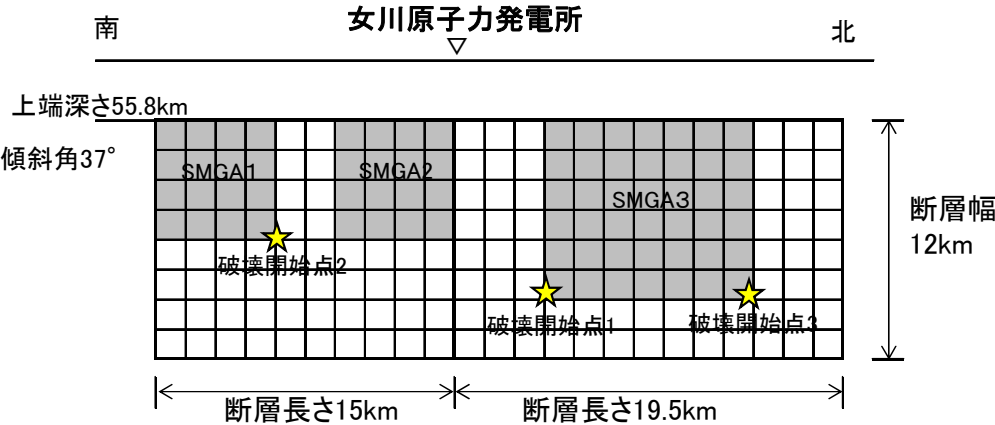
3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定 不確かさケース1の断層モデル

■不確かさケース1 (SMGAマントル内シミュレーションレンジ)の設定の考え方

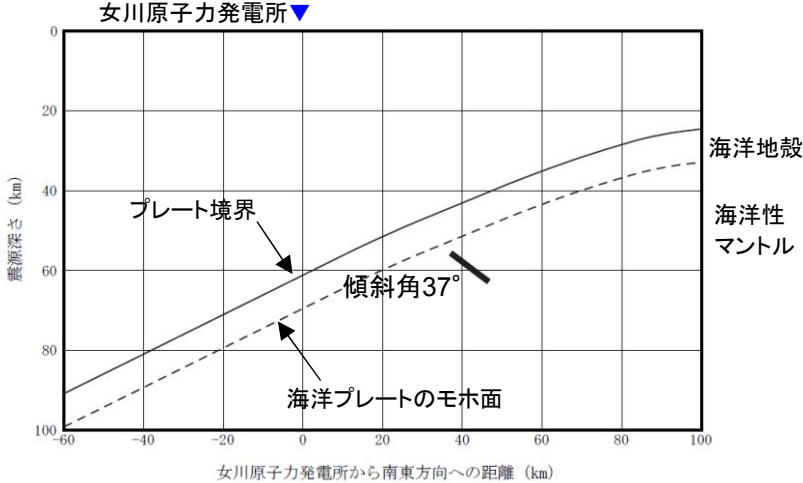
- ・基本ケースの4.7地震シミュレーションモデル部分のSMGA1について, 保守的に断層上端に設定する。
- ・その他の断層パラメータは, 基本ケースと同様。また, 破壊開始点は破壊が敷地に向かう位置に複数点設定。



断層モデル(平面図)



断層モデル(展開図)



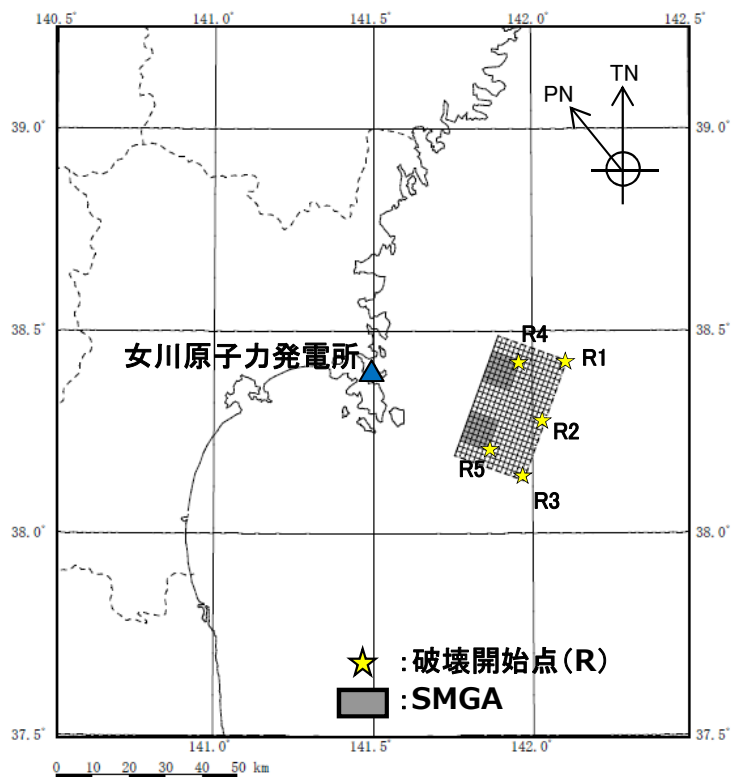
断面図

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定 不確かさケース2の断層モデル

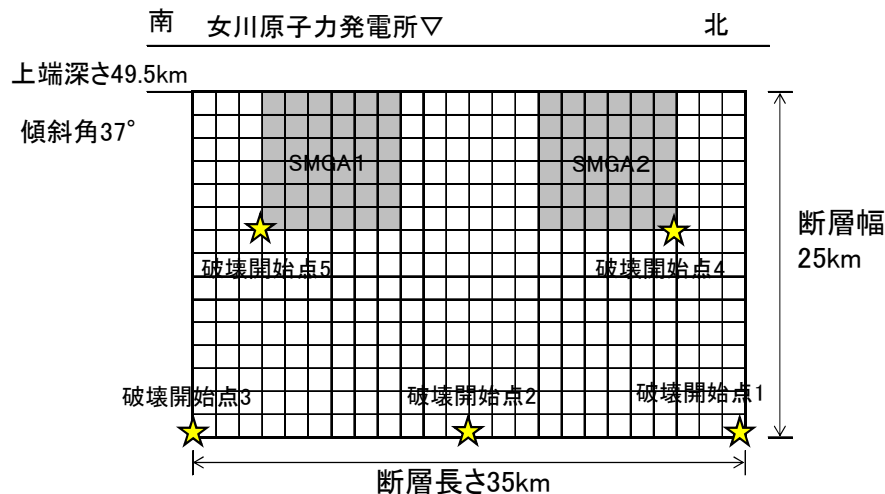
■ 不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) の設定の考え方

- ・4.7地震はその破壊領域が海洋性マントル内に留まった地震であるが、破壊領域が4.7地震の延長方向の海洋地殻まで拡がることを想定し、かつ、SMGAを保守的に海洋地殻内に設定する。地震規模としては、基本ケースと同様に予め規模の不確かさを考慮しM7.5とする。
- ・短周期レベル(応力降下量)は、東北地方の海洋性マントルと海洋地殻の物性の違い(pp.89~100参照)を考慮したうえで、保守的に4.7地震の短周期レベル相当*の0.8倍(笹谷ほか(2006)による短周期レベルの1.2倍)を考慮する。

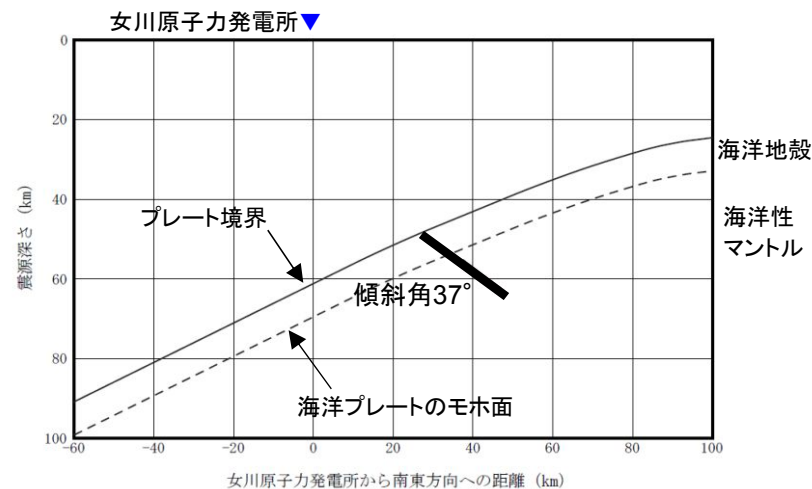
※4.7地震相当: 短周期レベルが4.7地震の地震モーメント M_0 - 短周期レベルAの関係相当。笹谷ほか(2006)による短周期レベルの1.5倍。



断層モデル(平面図)



断層モデル(展開図)

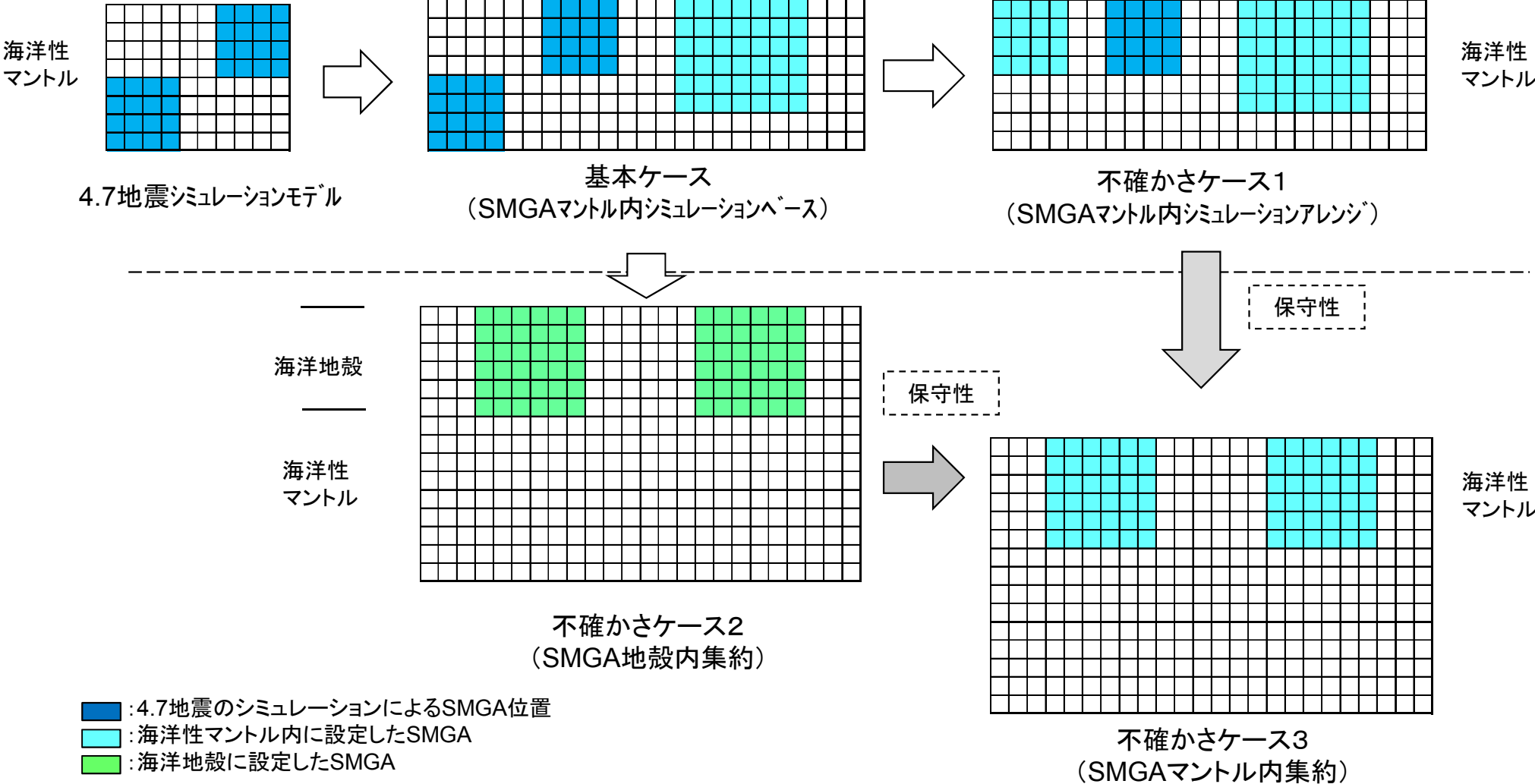


断面図

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定 不確かさケース3の断層モデル

■ 不確かさケース3 (SMGAマントル内集約) の設定の考え方

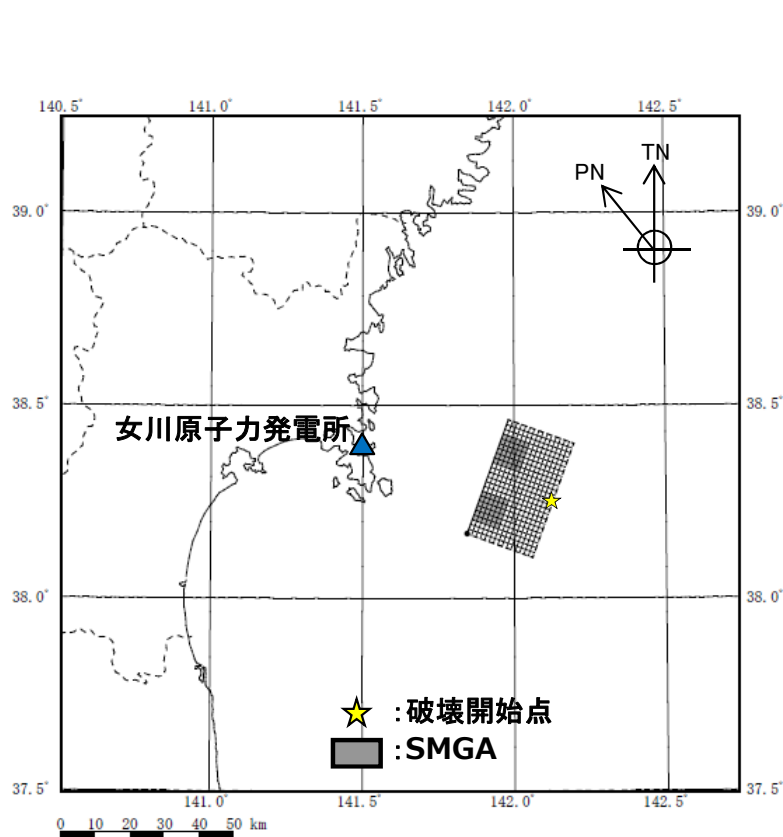
・不確かさケース3の断層モデルは, SMGAが海洋性マントルの上端に配置されるように, 不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) の断層モデルを, そのまま深さ方向にスライドさせる。海洋プレート内地震の場合は, 敷地にもたらず地震動は, 長周期も含めSMGAからの寄与が大きいことから背景領域も含めて不確かさケース2の断層モデルをそのままスライドさせた。



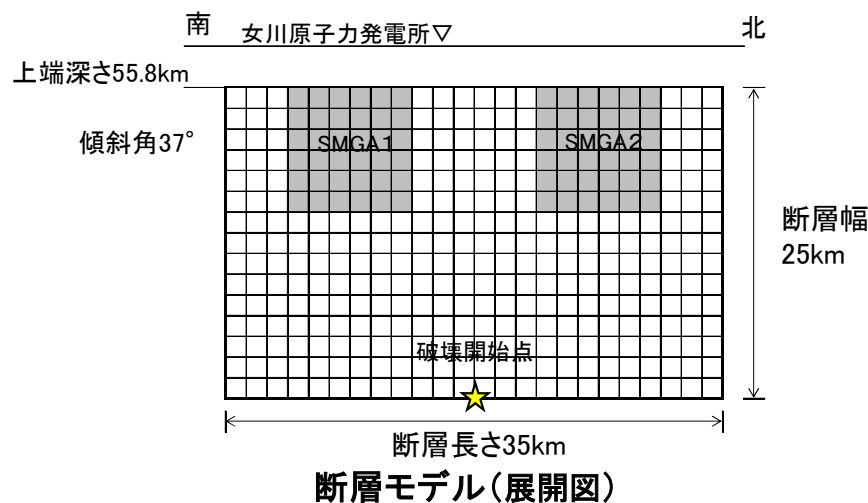
3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定 不確かさケース3の断層モデル

■ 不確かさケース3 (SMGAマントル内集約) の設定の考え方

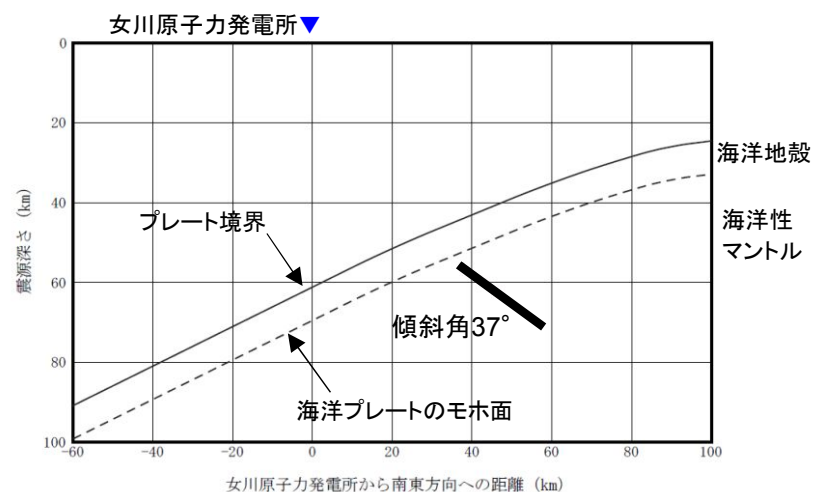
- ・不確かさケース3の断層モデルは, 不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) の断層モデルのSMGAが基本ケースと同様に海洋性マントル内に配置されるよう, そのまま(傾斜角を一定として) 深さ方向にスライドさせる。
- ・短周期レベル(応力降下量)は, SMGAをマントル内に設定することから, 基本ケースと同様とする。
- ・これらの設定により, 基本ケース, 不確かさケース1の南側の2つのSMGA(4.7地震シミュレーションモデルをベースに設定)を1つに集約した場合と同程度の影響があるものと考えられる。



断層モデル(平面図)



断層モデル(展開図)



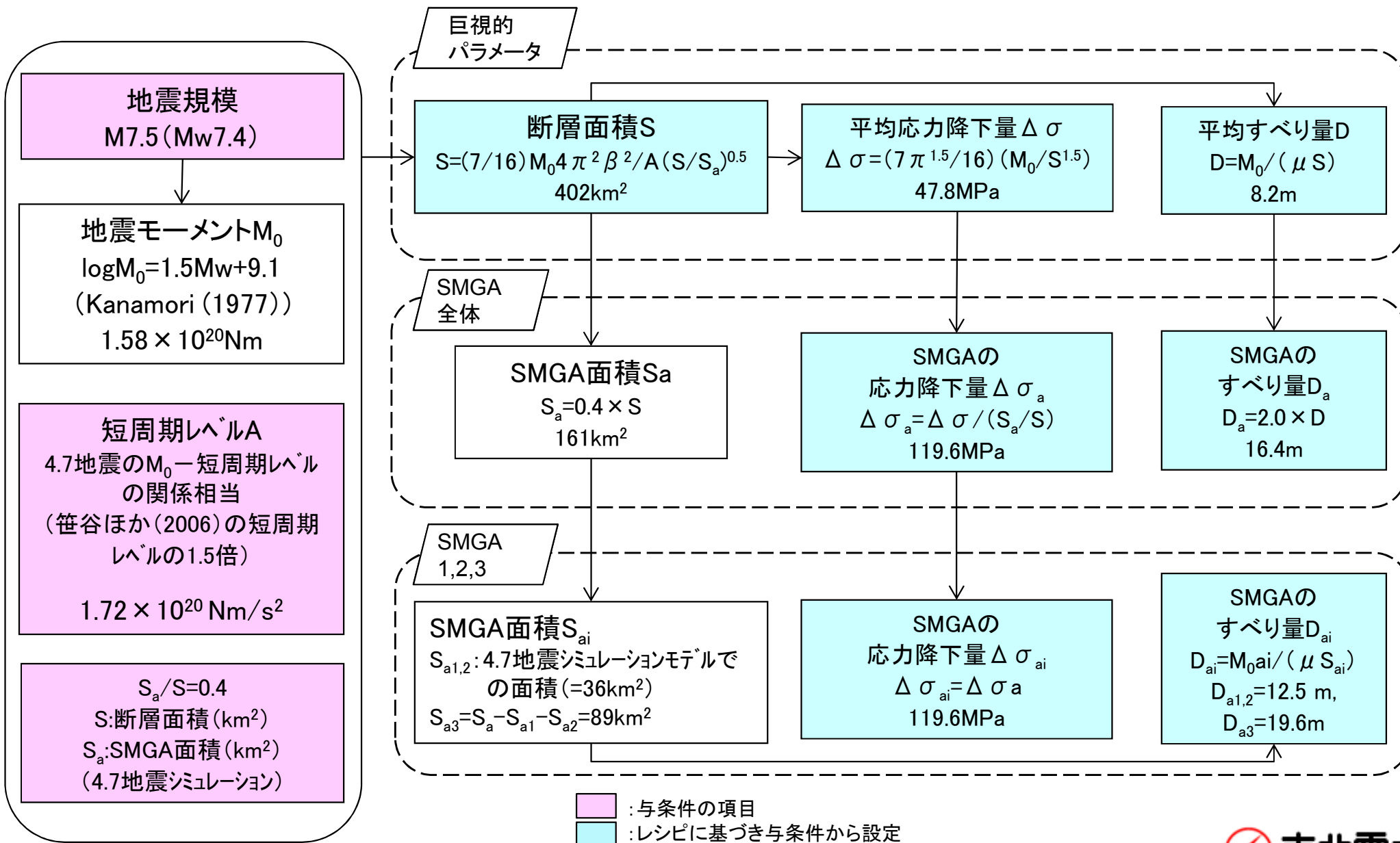
断面図

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定

基本ケース (SMGAマントル内シミュレーションベース) の断層モデル

第309回審査会合 (H27.12.16)
資料1 p.55 一部修正

■基本ケース (SMGAマントル内シミュレーションベース) の断層パラメータ設定フロー



3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定

基本ケース, 不確かさケース1の断層モデル

第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.76 一部修正

■基本ケース, 不確かさケース1 断層パラメータ

断層パラメータ		設定方法	設定値
断層 面 全 体	気象庁 マグニチュード	M_J	設定条件 7.5
	モーメント マグニチュード	M_w	4.7地震の M_J と M_w の関係を基 に設定 7.4
	走向	$\theta (^{\circ})$	Nakajima et al.(2011)等を参 考に設定 20
	傾斜角	$\delta (^{\circ})$	原田・釜江(2011) 37
	断層長さ	$L(\text{km})$	$L=S/W$ 33.5
	断層幅	$W(\text{km})$	東北大学(2011)等を参考に 設定 12
	断層面積	$S(\text{km}^2)$	$S=(7/16)M_0^2 \pi^2 \beta^2 / A$ (S/S_a) ^{0.5} , $S_a/S=0.4$ 402
	断層上端深さ	$h(\text{km})$	東北大学(2011)等を参考に 設定 55.8
	地震モーメント	$M_0(\text{Nm})$	$M_w=(\log M_0 - 9.1)/1.5$ 1.58 × 10 ²⁰
	剛性率	$\mu (\text{N/m}^2)$	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 3.0\text{g/cm}^3$, $\beta = 4.0\text{km/s}$ 4.80 × 10 ¹⁰
	平均すべり量	$D(\text{cm})$	$D=M_0/(\mu S)$ 821
	平均応力降下量	$\Delta \sigma (\text{MPa})$	$\Delta \sigma = (7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$ 47.8
	短周期レベル	$A(\text{Nm/s}^2)$	$A=a \times 9.84 \times 10^{10} \times$ ($M_0 \times 10^7$) ^{1/3} , $a=1.5$ 1.72 × 10 ²⁰
	破壊伝播形式	-	- 放射状
	破壊伝播速度	$V_r(\text{km/s})$	$V_r=0.72 \beta$ 2.88
高域遮断周波数	$f_{\text{max}}(\text{Hz})$	2003年宮城県沖の地震のシ ミュレーション結果 18	

断層パラメータ		設定方法	設定値
強震動生成域全体	地震モーメント	$M_{0a}(\text{Nm})$	$M_{0a} = \mu S_a D_a$ 1.27 × 10 ²⁰
	断層面積	$S_a(\text{km}^2)$	$S_a = (S_a/S) \times S$, (S_a/S) = 0.4 161
	平均すべり量	$D_a(\text{cm})$	$D_a = \gamma_D D$, $\gamma_D = 2.0$ 1641
	応力降下量	$\Delta \sigma_a (\text{MPa})$	$\Delta \sigma_a = \Delta \sigma / (S_a/S)$, (S_a/S) = 0.4 119.6
強震動生成域1, 2	地震モーメント	$M_{0a1,2}(\text{Nm})$	$M_{0a1,2}$ (面積の1.5乗の重みで配分) 2.15 × 10 ¹⁹
	断層面積	$S_{a1,2}(\text{km}^2)$	$S_{a1,2}$ (4.7地震シミュレーションモデル) 36
	平均すべり量	$D_{a1,2}(\text{cm})$	$D_{a1,2} = M_{0a1,2} / (\mu S_{a1,2})$ 1247
	応力降下量	$\Delta \sigma_{a1,2}(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_{a1,2} = \Delta \sigma_a$ 119.6
強震動生成域3	地震モーメント	$M_{0a3}(\text{Nm})$	M_{0a3} (面積の1.5乗の重みで配分) 8.37 × 10 ¹⁹
	断層面積	$S_{a3}(\text{km}^2)$	$S_{a3} = S_a - S_{a1} - S_{a2}$ 89
	平均すべり量	$D_{a3}(\text{cm})$	$D_{a3} = M_{0a3} / (\mu S_{a3})$ 1960
	応力降下量	$\Delta \sigma_{a3}(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_{a3} = \Delta \sigma_a$ 119.6
背景領域	地震モーメント	$M_{0b}(\text{Nm})$	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$ 3.17 × 10 ¹⁹
	断層面積	$S_b(\text{km}^2)$	$S_b = S - S_a$ 241
	平均すべり量	$D_b(\text{cm})$	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$ 274
	応力降下量	$\Delta \sigma_b(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_b = (D_b/W_b)(\pi^{0.5}/D_a)r \cdot \Sigma$ (r_i/r) ³ $\Delta \sigma_a$, $r = (S_a/\pi)^{0.5}$ 13.1

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定

基本ケース(SMGAマントル内シミュレーションベース)の断層モデル

第309回審査会合(H27.12.16)
資料1 p.50 一部修正

■断層パラメータの設定根拠

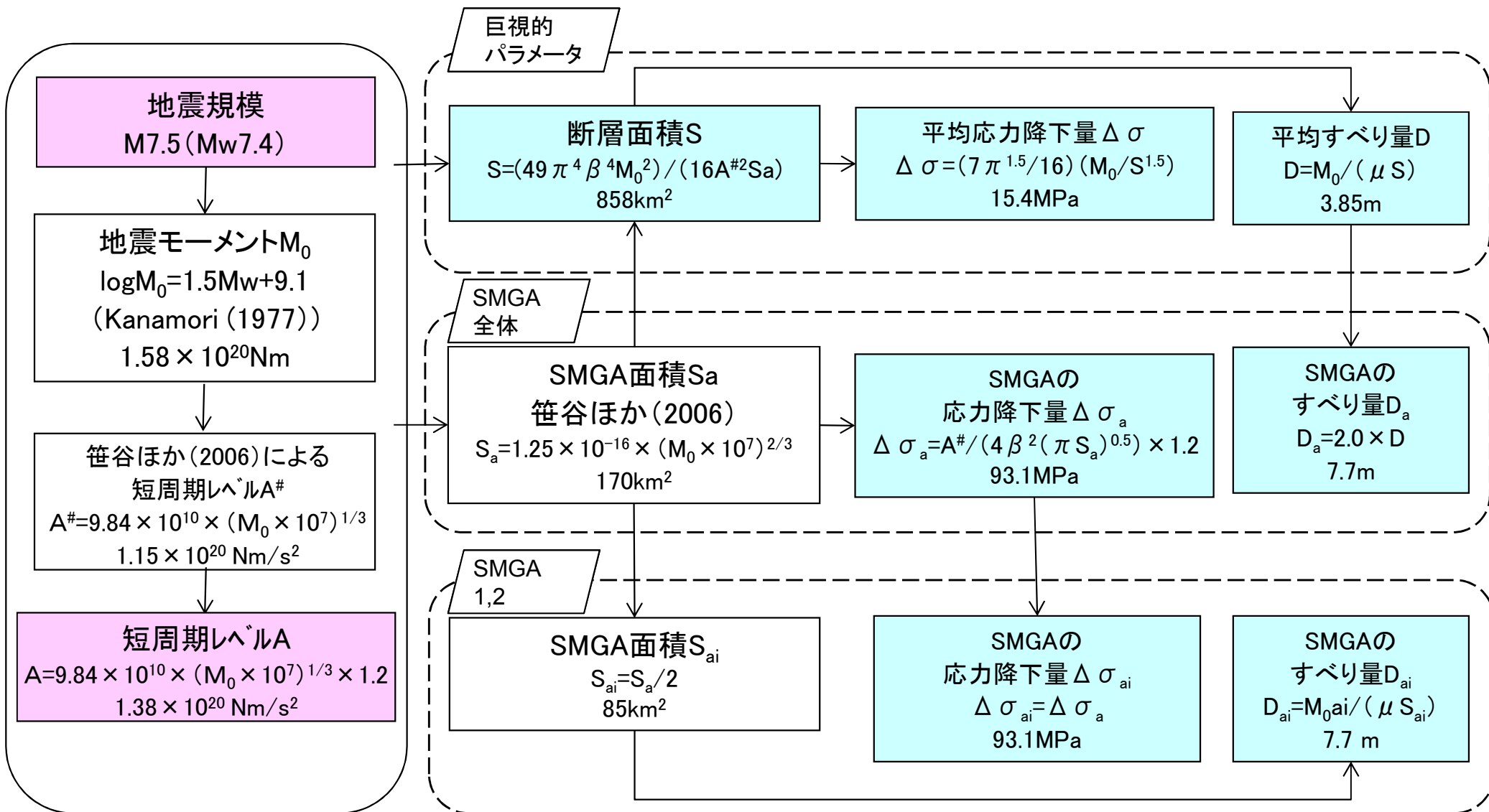
断層パラメータ	パラメータの設定根拠
断層面積	事前検討からSMGAの面積比(S_a/S)=0.4を採用し, 理論式より設定。
断層長さ	断層面積/断層幅=断層長さ
断層幅	4.7地震震源位置(原田・釜江(2011)の破壊開始点)から上端と下端に均等に配置し, 上端を海洋プレートモホ面付近, 下端はプレートの応力中立面付近に設定。
断層傾斜角	原田・釜江(2011)による。東北大学(2011)の断層モデルの傾斜角と同程度。 沈み込んだ海洋プレート内地震は沈み込む海洋プレート内地震(アウターライズ地震)の再活動と考えられ, プレートとのなす角は約 60° 程度となり, 上記の傾斜角はこれと対応する。
断層の走向	Nakajima et al.(2011), 東北大学(2011), 防災科学技術研究所F-netの値を参考に設定。
剛性率	$\mu = \rho \beta^2$, 密度とS波速度は佐藤・巽(2002)による。 佐藤・巽(2002)では, この値を用いて東日本の海洋性地震(プレート境界地震, 海洋プレート内地震)のスペクトルインバージョンが行われている。
高域遮断周波数	浅野ほか(2004)による2003年宮城県沖の地震のシミュレーション解析結果と敷地の観測記録の適合性を確認した値を設定。

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定

不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) の断層モデル

第309回審査会合 (H27.12.16)
資料1 p.61 一部修正

■不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) の断層パラメータ設定フロー



: 与条件の項目
 : 笹谷ほか (2006) を参考に与条件から設定

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定

不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) の断層モデル

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.77 一部修正

■不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) 断層パラメータ

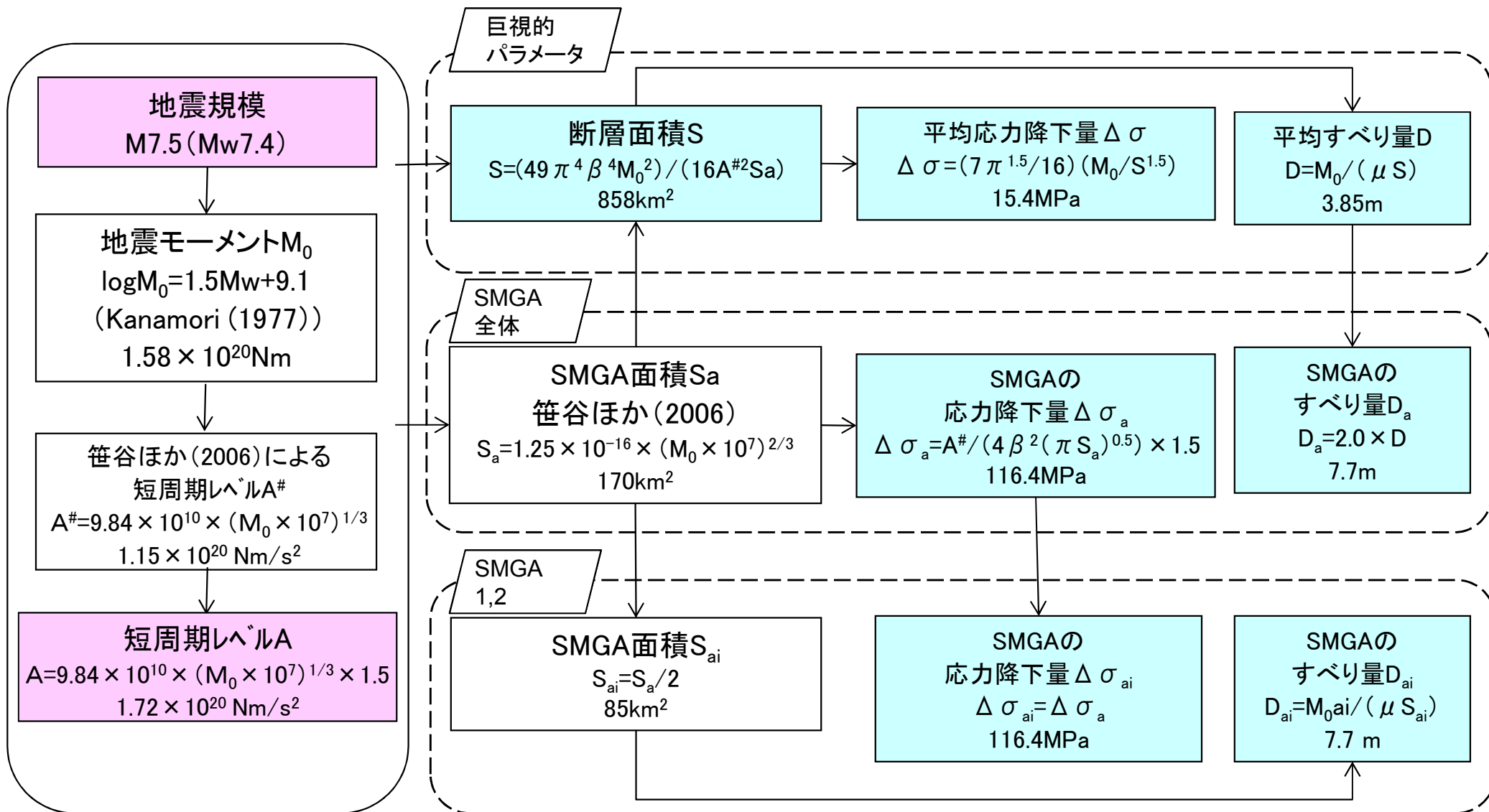
断層パラメータ		設定方法	設定値	
断層 面 全 体	気象庁 マグニチュード	M_J	設定条件	7.5
	モーメント マグニチュード	M_w	4.7地震の M_J と M_w の関係を基に 設定	7.4
	走向	$\theta (^{\circ})$	Nakajima et al.(2011)等を参考に 設定	20
	傾斜角	$\delta (^{\circ})$	原田・釜江(2011)	37
	断層長さ	$L(\text{km})$	$L=S/W$	35
	断層幅	$W(\text{km})$	プレート境界から応力中立面を地 震発生層として考慮し設定	25
	断層面積	$S(\text{km}^2)$	$S=(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16A^2S_a)$	858
	断層上端深さ	$h(\text{km})$	J-SHIS(2014)のプレート形状を 考慮し設定	49.5
	地震モーメント	$M_0(\text{Nm})$	$M_w=(\log M_0-9.1)/1.5$	1.58×10^{20}
	剛性率	$\mu (\text{N/m}^2)$	$\mu = \rho \beta^2, \rho = 3.0\text{g/cm}^3, \beta = 4.0\text{km/s}$	4.80×10^{10}
	平均すべり量	$D(\text{cm})$	$D=M_0/(\mu S)$	385
	平均応力降下量	$\Delta \sigma (\text{MPa})$	$\Delta \sigma = (7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.4
	短周期レベル	$A(\text{Nm/s}^2)$	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \times 1.2$	1.38×10^{20}
	破壊伝播形式	-	-	放射状
破壊伝播速度	$V_r(\text{km/s})$	$V_r=0.72\beta$	2.88	

断層パラメータ		設定方法	設定値	
強震動生成域全体	地震モーメント	$M_{0a}(\text{Nm})$	$M_{0a}=\mu S_a D_a$	6.28×10^{19}
	断層面積	$S_a(\text{km}^2)$	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	170
	平均すべり量	$D_a(\text{cm})$	$D_a=\gamma_D D, \gamma_D=2.0$	770
	応力降下量	$\Delta \sigma_a(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_a=A/(4\beta^2(\pi S_a)^{0.5}) \times 1.2$	93.1
強震動生成域1, 2	地震モーメント	$M_{0ai}(\text{Nm})$	$M_{0ai}=M_{0a}/2$	3.14×10^{19}
	断層面積	$S_{ai}(\text{km}^2)$	$S_{ai}=S_a/2$	85
	平均すべり量	$D_{ai}(\text{cm})$	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	770
	応力降下量	$\Delta \sigma_{ai}(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_{ai}=\Delta \sigma_a$	93.1
背景領域	地震モーメント	$M_{0b}(\text{Nm})$	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	9.57×10^{19}
	断層面積	$S_b(\text{km}^2)$	$S_b=S-S_a$	688
	平均すべり量	$D_b(\text{cm})$	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	290
	応力降下量	$\Delta \sigma_b(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_b=(D_b/W_b)(D_a/W_a) \cdot \Delta \sigma_a \times 1.2$	14.0

3. 検討用地震の基本ケース、不確かさケースの設定

不確かさケース3 (SMGAマントル内集約) の断層モデル

■不確かさケース3 (SMGAマントル内集約) の断層パラメータ設定フロー



: 与条件の項目
 : 笹谷ほか(2006)を参考に与条件から設定

3. 検討用地震の基本ケース, 不確かさケースの設定

不確かさケース3 (SMGAマントル内集約) の断層モデル

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.202 一部修正

■ 不確かさケース3 (SMGAマントル内集約) 断層パラメータ

断層パラメータ		設定方法	設定値	
断層面全体	気象庁 マグニチュード	M_J	設定条件	7.5
	モーメント マグニチュード	M_w	4.7地震の M_J と M_w の関係を基に設定	7.4
	走向	$\theta (^{\circ})$	Nakajima et al. (2011)等を参考に設定	20
	傾斜角	$\delta (^{\circ})$	原田・釜江(2011)	37
	断層長さ	L (km)	$L=S/W$	35
	断層幅	W (km)	不確かさケース2に合わせ設定	25
	断層面積	S (km ²)	$S=(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16A^2S_a)$	858
	断層上端深さ	h (km)	基本ケースと合わせ設定	55.8
	地震モーメント	M_0 (Nm)	$M_w=(\log M_0-9.1)/1.5$	1.58×10^{20}
	剛性率	μ (N/m ²)	$\mu=\rho\beta^2, \rho=3.0\text{g/cm}^3, \beta=4.0\text{km/s}$	4.80×10^{10}
	平均すべり量	D (cm)	$D=M_0/(\mu S)$	385
	平均応力降下量	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.4
	短周期レベル	A (Nm/s ²)	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \times 1.5$	1.72×10^{20}
	破壊伝播形式	-	-	放射状
	破壊伝播速度	V_r (km/s)	$V_r=0.72\beta$	2.88
高域遮断周波数	f_{\max} (Hz)	2003年宮城県沖の地震のシミュレーション結果	18	

断層パラメータ		設定方法	設定値	
強震動生成域全体	地震モーメント	M_{0a} (Nm)	$M_{0a}=\mu S_a D_a$	6.28×10^{19}
	断層面積	S_a (km ²)	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	170
	平均すべり量	D_a (cm)	$D_a=\gamma_D D, \gamma_D=2.0$	770
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$ (MPa)	$\Delta\sigma_a=A/(4\beta^2(\pi S_a)^{0.5})$	116.4
強震動生成域1, 2	地震モーメント	M_{0ai} (Nm)	$M_{0ai}=M_{0a}/2$	3.14×10^{19}
	断層面積	S_{ai} (km ²)	$S_{ai}=S_a/2$	85
	平均すべり量	D_{ai} (cm)	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	770
	応力降下量	$\Delta\sigma_{ai}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{ai}=\Delta\sigma_a$	116.4
背景領域	地震モーメント	M_{0b} (Nm)	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	9.57×10^{19}
	断層面積	S_b (km ²)	$S_b=S-S_a$	688
	平均すべり量	D_b (cm)	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	290
	応力降下量	$\Delta\sigma_b$ (MPa)	$\Delta\sigma_b=(D_b/W_b)(D_a/W_a) \cdot \Delta\sigma_a$	17.5

4. 検討用地震の地震動評価

4. 検討用地震の地震動評価

検討用地震の地震動評価

■ 検討用地震の地震動評価について

1. 断層モデルを用いた手法による地震動評価

(1) 基本ケース, 不確かさケース1, 不確かさケース3: (**SMGAを海洋性マントル内に想定したケース**)

- ・4.7地震の敷地での観測記録のシミュレーション解析を統計的グリーン関数法により行い, 観測記録との整合性を確認していることから, 統計的グリーン関数法(SGF)により地震動評価を行う。
- ・波形合成は入倉ほか(1997)を用いる。放射特性は, 一定値(放射特性係数 $F=0.62$)とする。

(2) 不確かさケース2: (**SMGAを海洋地殻内に想定したケース**)

- ・SMGAの大部分が海洋地殻内に位置する地震の地震動評価手法については, 海洋地殻とマントルの応力降下量の違いと敷地からSMGAまでの距離の違いが地震動評価結果に与える影響(p.66参照)も踏まえ, 経験的グリーン関数法(EGF)を採用する。波形合成は入倉ほか(1997)を用いる。
- ・要素地震は, SMGA付近で発生した同じ震源メカニズムの地震を用いることにより, 海洋地殻内の地震の地震動の特性を反映させる。

2. 応答スペクトルに基づく地震動評価

- ・Noda et al.(2002)の方法を用いた地震動評価を行う。なお, 敷地での海洋プレート内地震の観測記録によるサイト補正係数を考慮する。

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

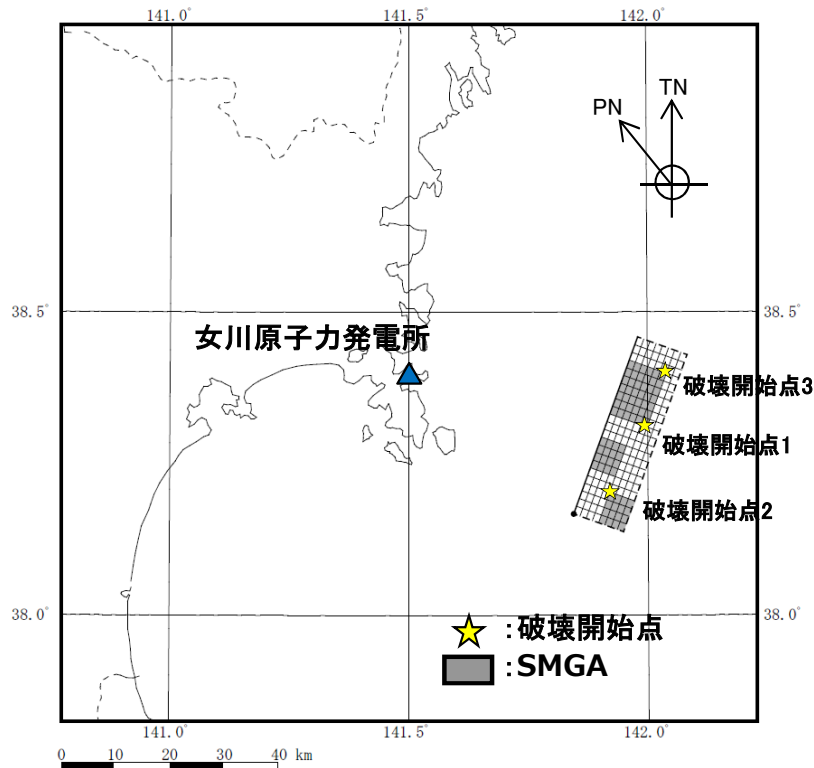
■ 基本ケース (SMGAマントル内シミュレーションベース)

○ 断層モデル

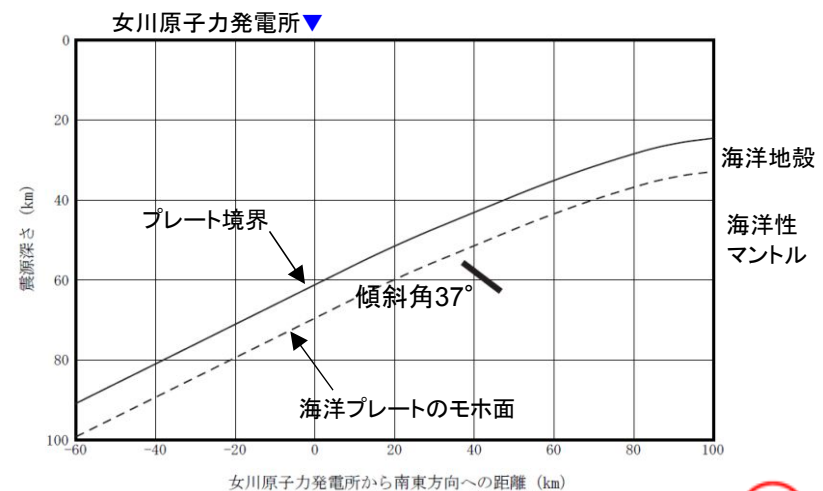
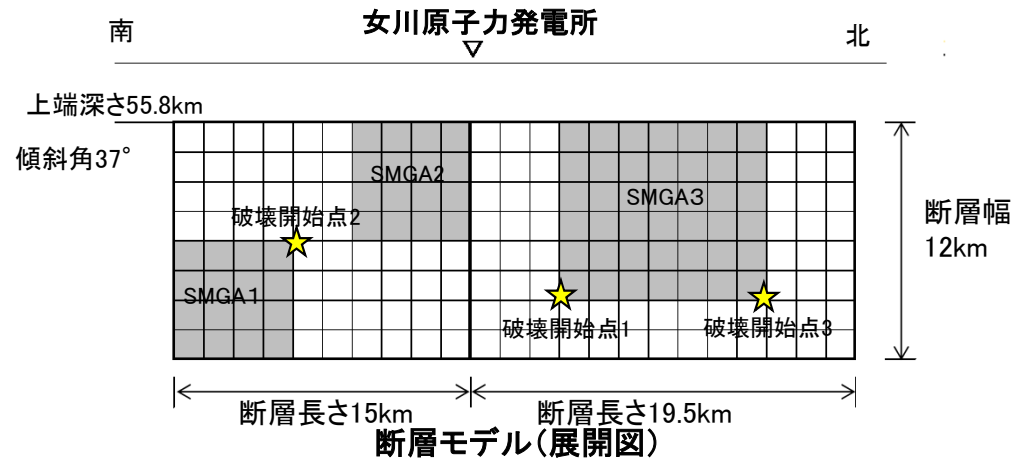
- ・4.7地震シミュレーションモデル (M7.2) を低速度域の拡がり等を考慮し北側に拡張したものと設定。
- ・断層パラメータは、4.7地震シミュレーションモデルに基づき設定。強震動生成域 (SMGA) は4.7地震モデルに加え、拡張部分に残りのSMGAを集中して配置。破壊開始点は破壊が敷地に向かう位置に複数点設定。

○ 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ・統計的グリーン関数法により評価。波形合成は入倉ほか (1997) を用いる。



断層モデル (平面図)



断面図

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

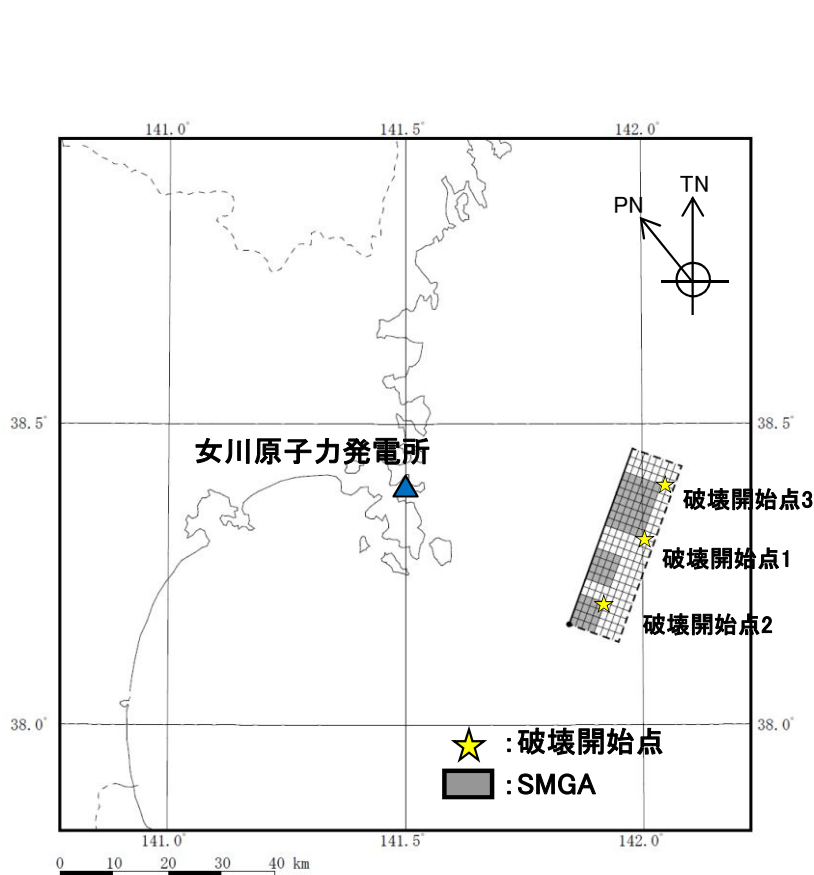
■不確かさケース1 (SMGAマントル内シミュレーションアレンジ) SMGAの位置の不確かさ

○断層モデル

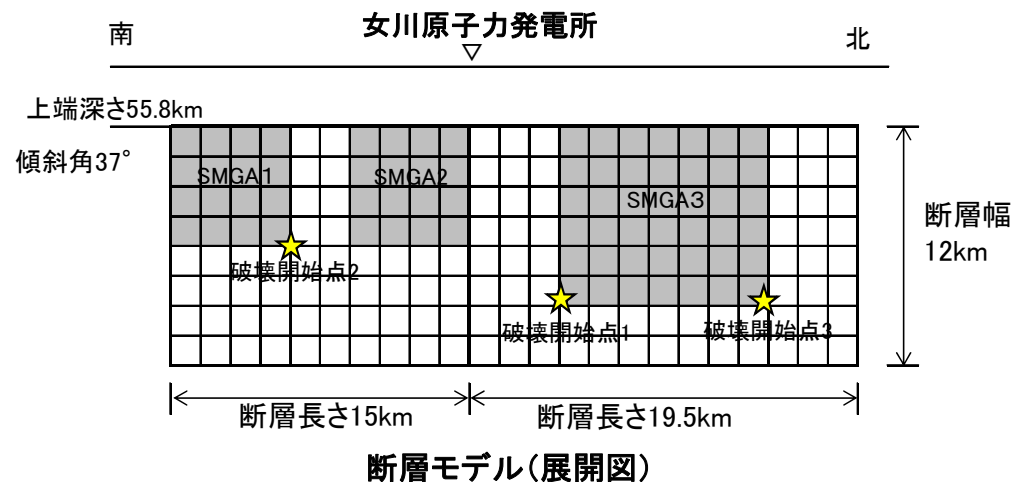
- ・基本ケースの4.7地震シミュレーションモデル部分のSMGA1について保守的に断層上端に設定する。
- ・断層パラメータは、基本ケースと同様。また、破壊開始点は破壊が敷地に向かう位置に複数点設定。

○断層モデルを用いた手法による地震動評価

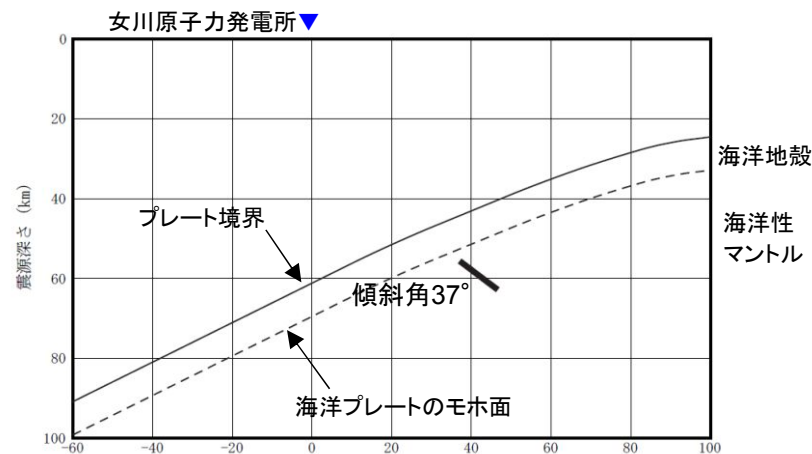
- ・統計的グリーン関数法により評価。波形合成は入倉ほか(1997)を用いる。



断層モデル(平面図)



断層モデル(展開図)



断面図

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

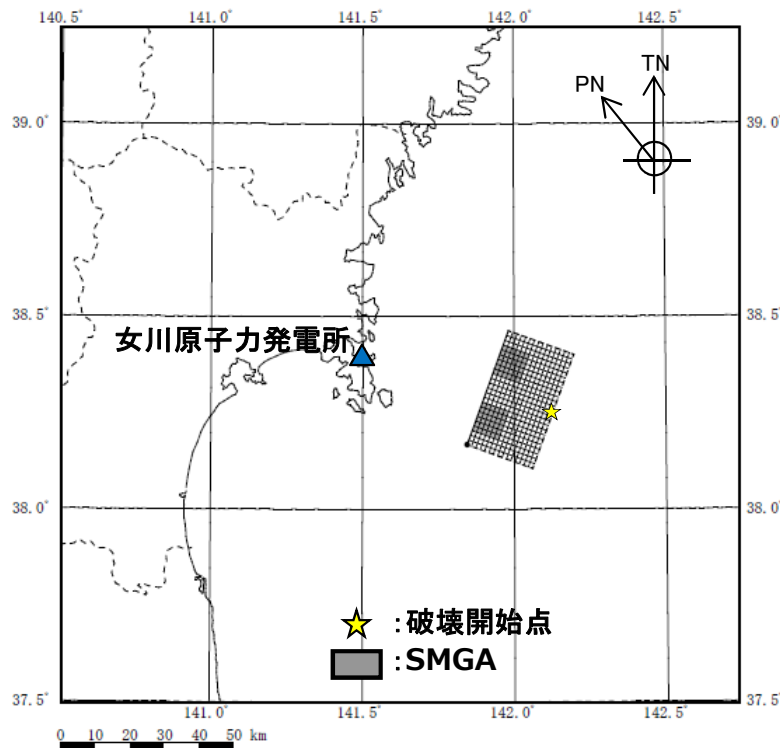
■不確かさケース3(SMGAマントル内集約)

○断層モデル

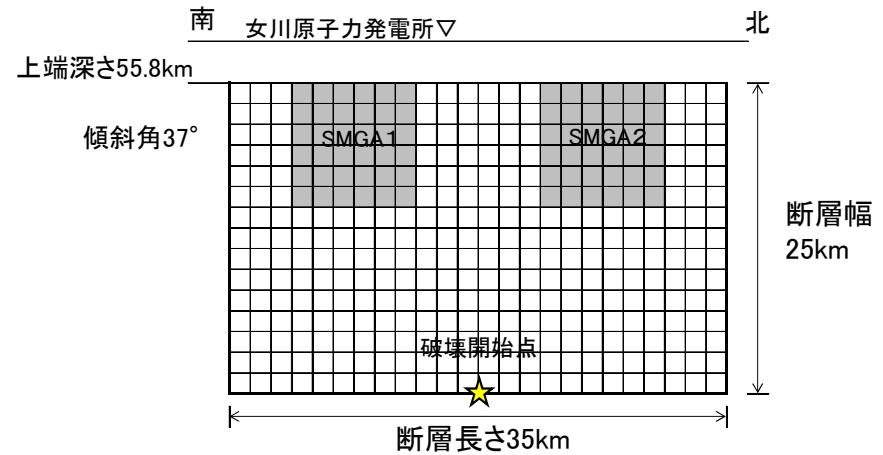
- ・不確かさケース2(SMGA地殻内)の断層モデルのSMGAが基本ケースと同様に海洋性マントル内に配置されるよう, そのまま(傾斜角を一定として)深さ方向にスライドさせて設定する。
- ・短周期レベル(応力降下量)は, SMGAがマントル内に設定することから, 基本ケースと同様とする。
- ・破壊開始点については, 破壊が敷地に向かう位置で, 2つのSMGAからの波が重なり敷地への影響が大きいと考えられる断層下端中央に設定する。

○断層モデルを用いた手法による地震動評価

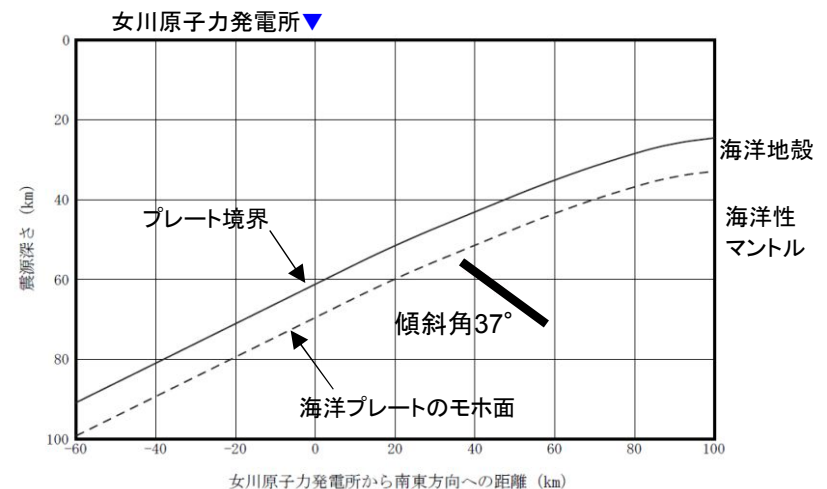
- ・海洋性マントル内にSMGAを設定することから, 基本ケースと同様の手法(統計的グリーン関数法)を用いる。波形合成は入倉ほか(1997)による。



断層モデル(平面図)



断層モデル(展開図)



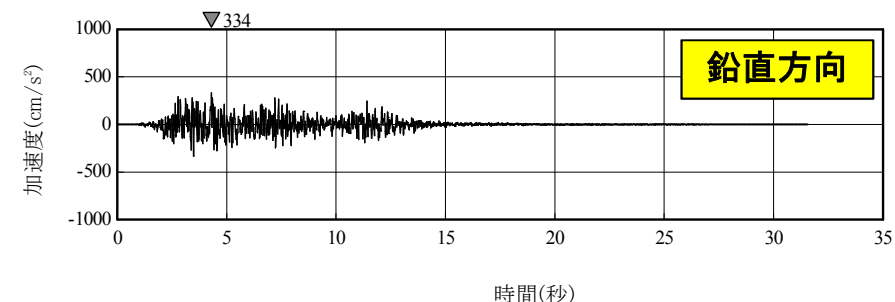
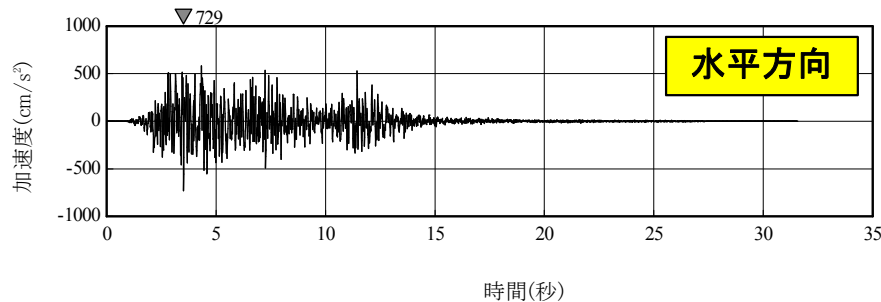
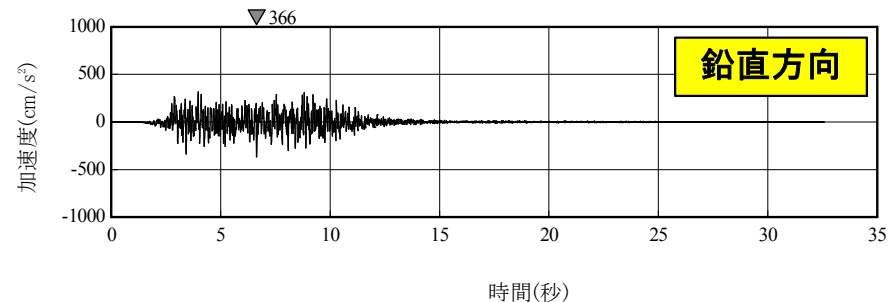
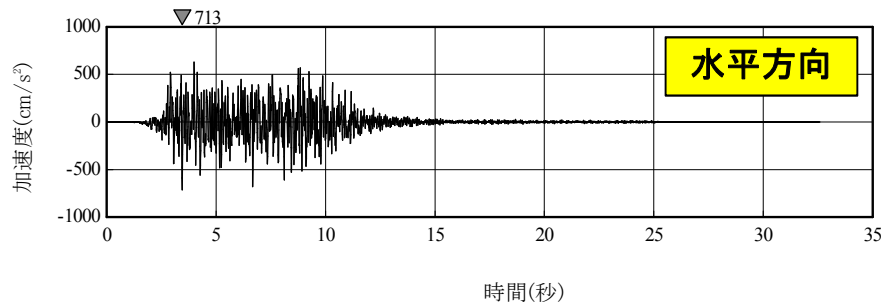
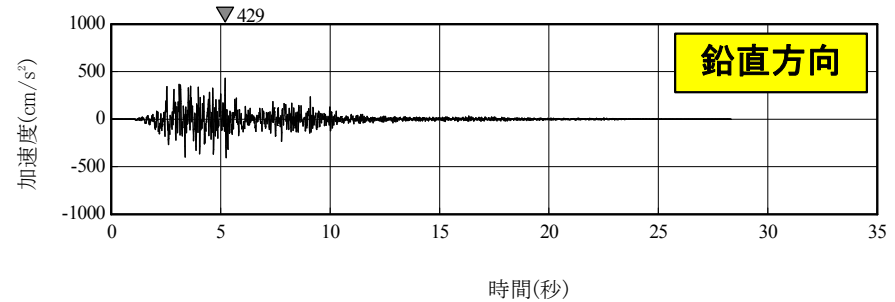
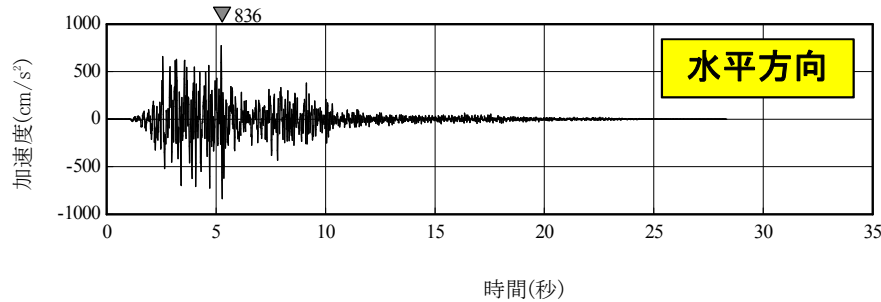
断面図

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■基本ケース(SMGAマントル内シミュレーションベース) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF

<加速度時刻歴波形>

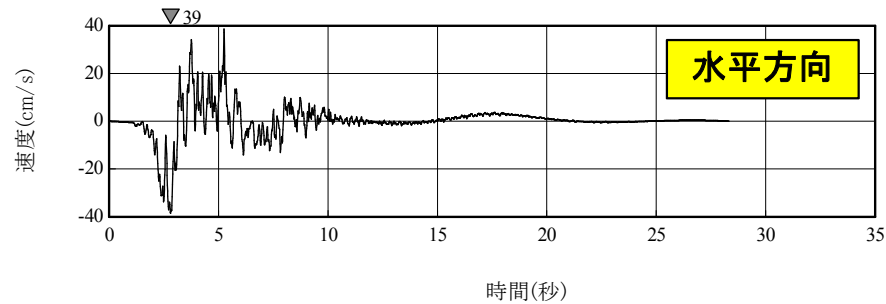


4. 検討用地震の地震動評価

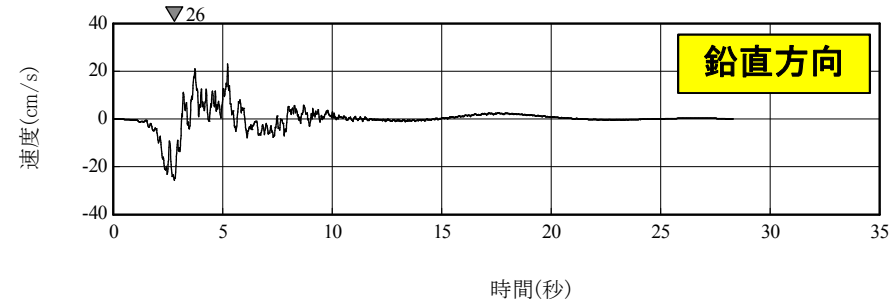
断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■基本ケース(SMGAマントル内シミュレーションベース) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF

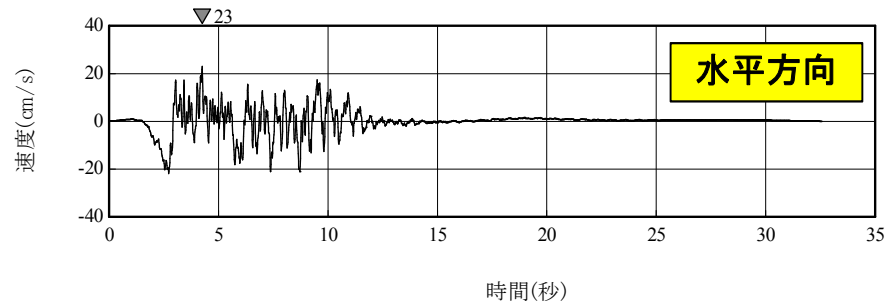
<速度時刻歴波形>



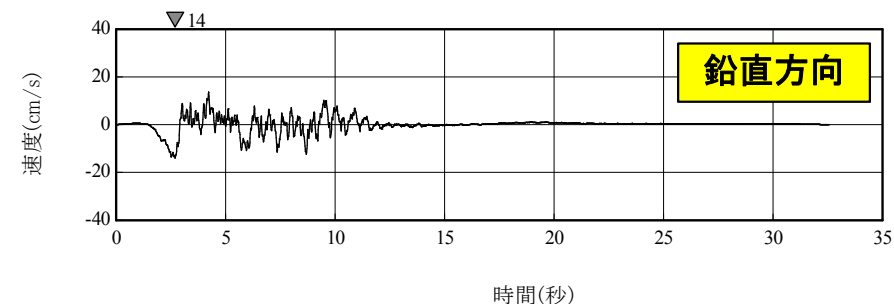
破壊開始点1



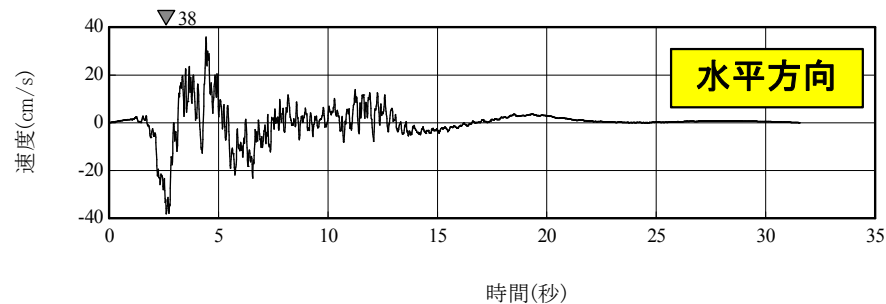
破壊開始点1



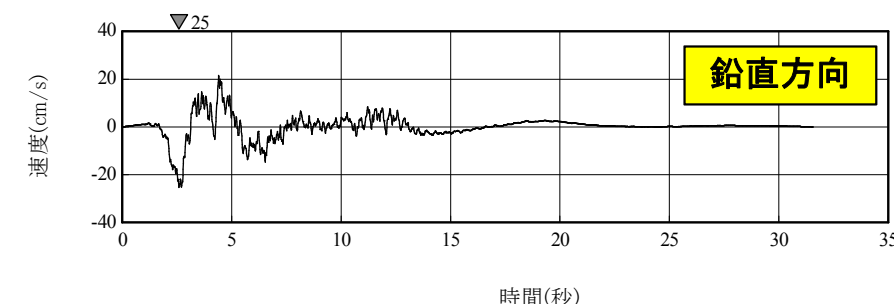
破壊開始点2



破壊開始点2



破壊開始点3



破壊開始点3

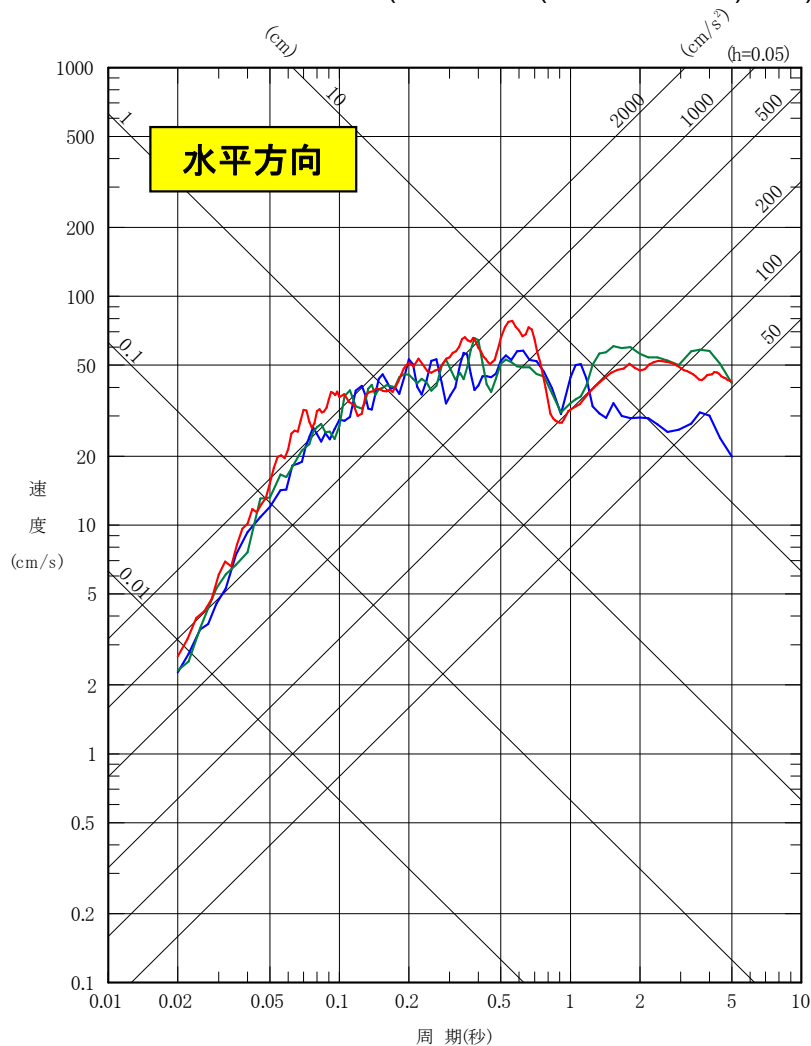
4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

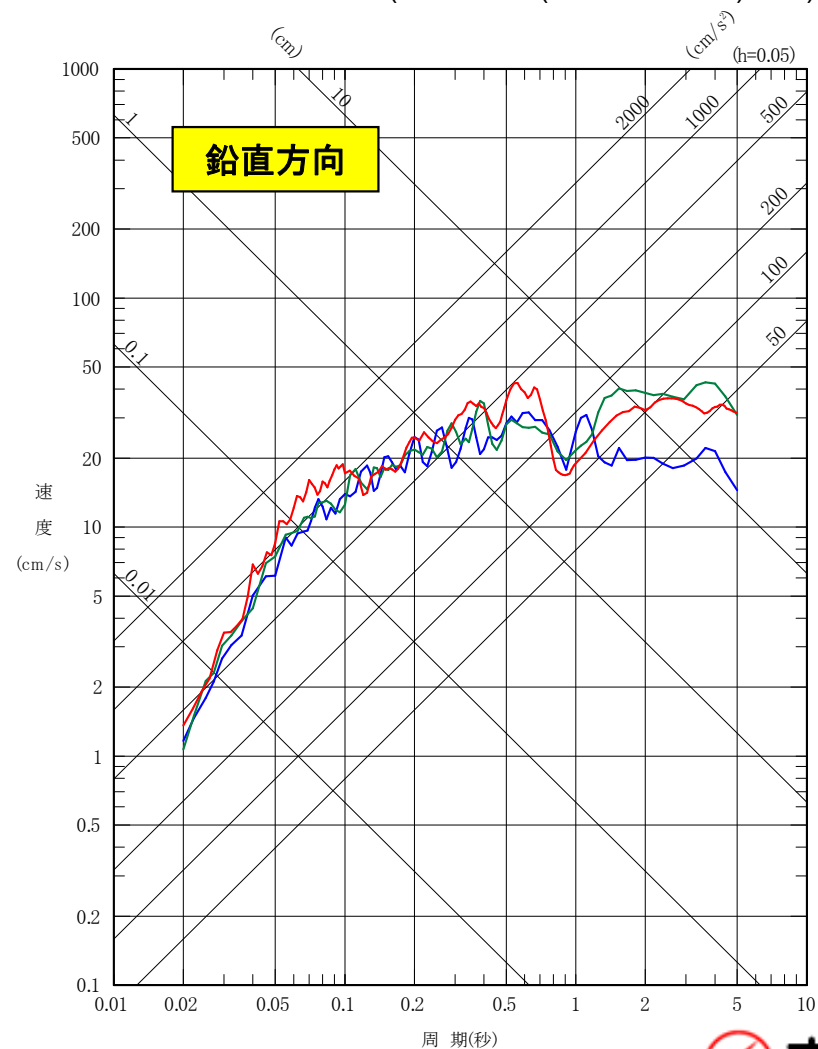
■ 基本ケース (SMGAマントル内シミュレーションベース) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF

< 応答スペクトル >

- 破壊開始点1 (基本ケース (SMGAマントル) SGF)
- 破壊開始点2 (基本ケース (SMGAマントル) SGF)
- 破壊開始点3 (基本ケース (SMGAマントル) SGF)



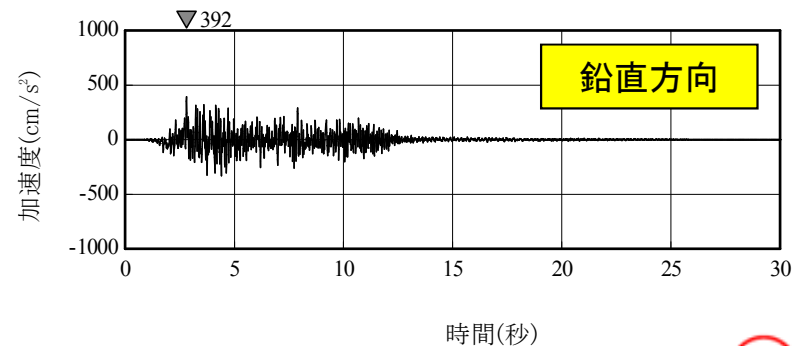
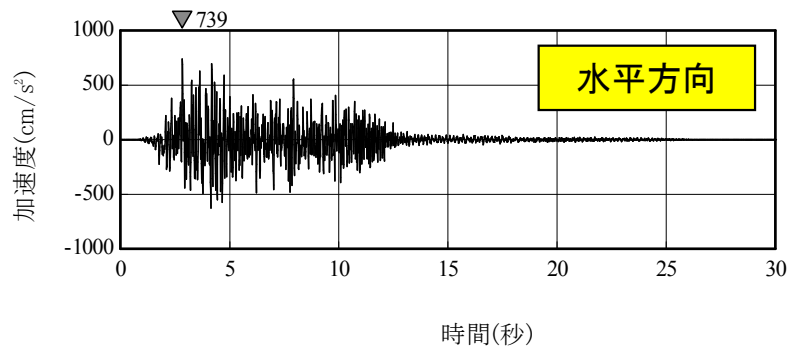
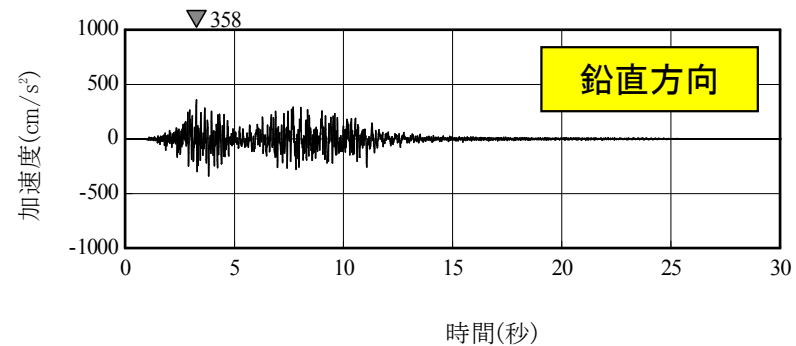
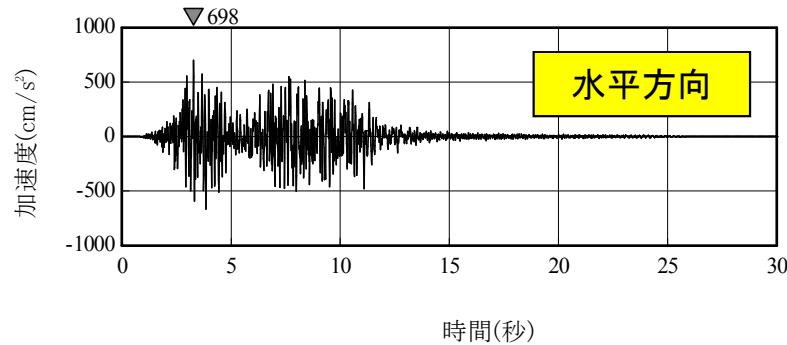
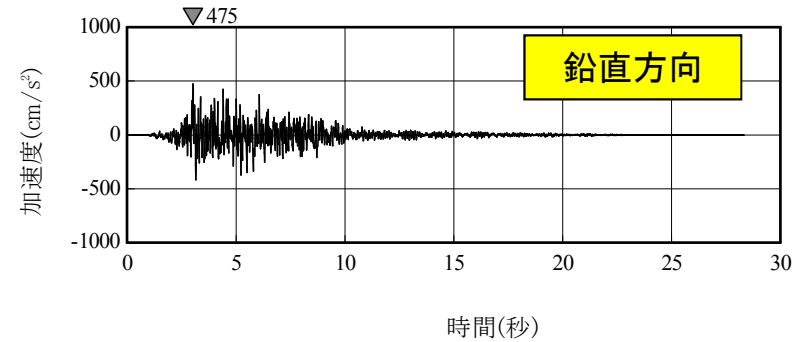
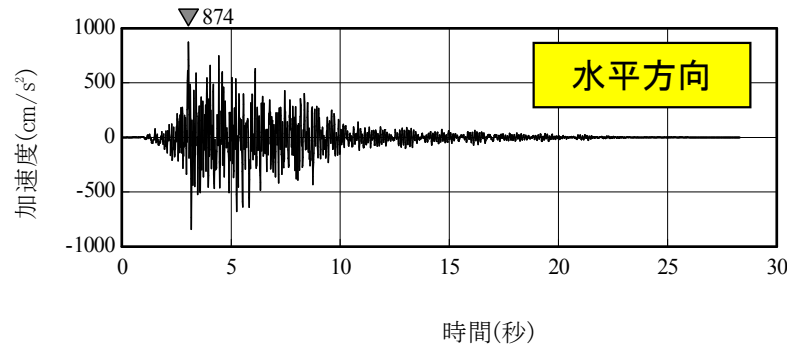
- 破壊開始点1 (基本ケース (SMGAマントル) SGF)
- 破壊開始点2 (基本ケース (SMGAマントル) SGF)
- 破壊開始点3 (基本ケース (SMGAマントル) SGF)



4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■不確かさケース1 (SMGAマントル内シミュレーションアレンジ) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF
 <加速度時刻歴波形>

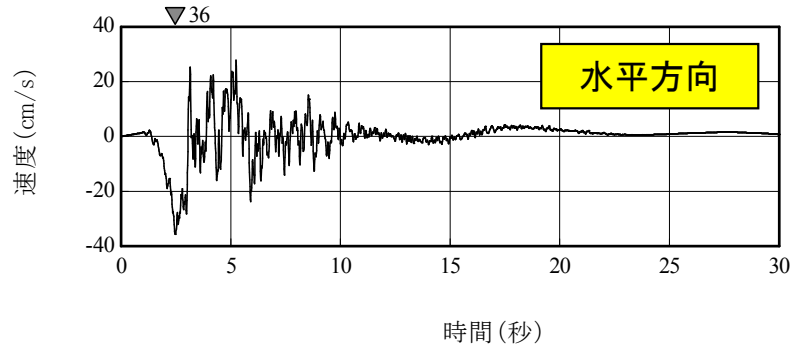


4. 検討用地震の地震動評価

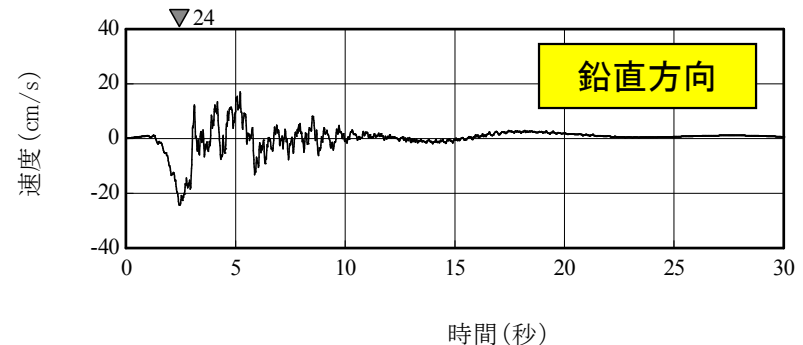
断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■不確かさケース1 (SMGAマントル内シミュレーションアレンジ) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF

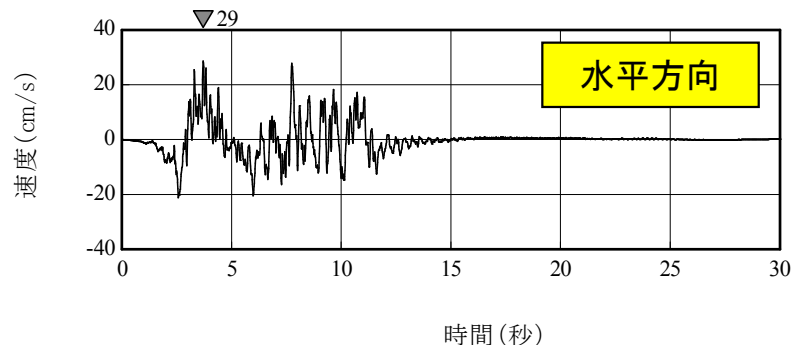
<速度時刻歴波形>



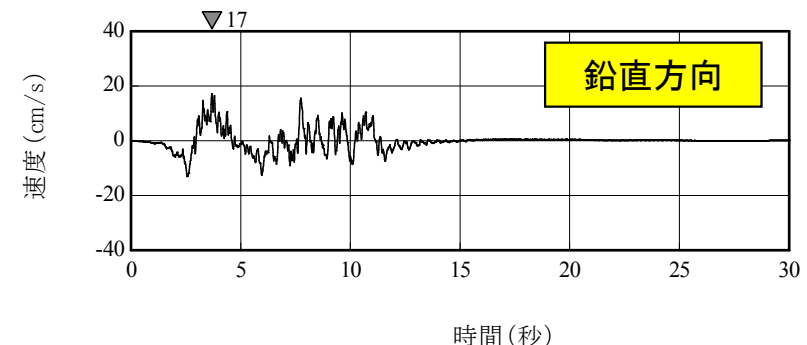
破壊開始点1



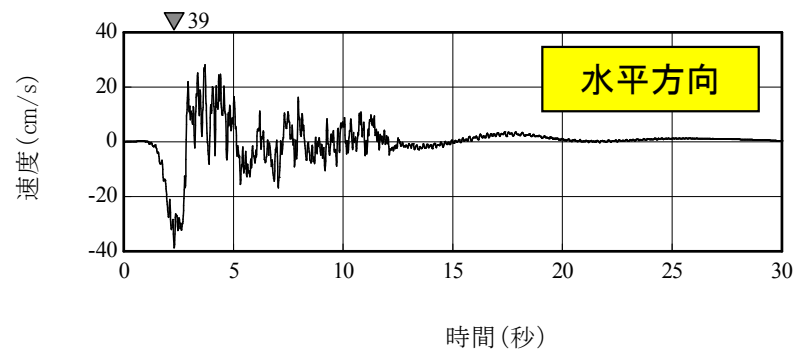
破壊開始点1



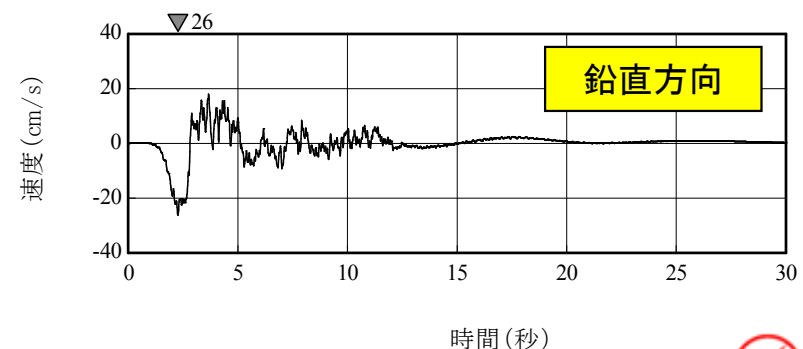
破壊開始点2



破壊開始点2



破壊開始点3



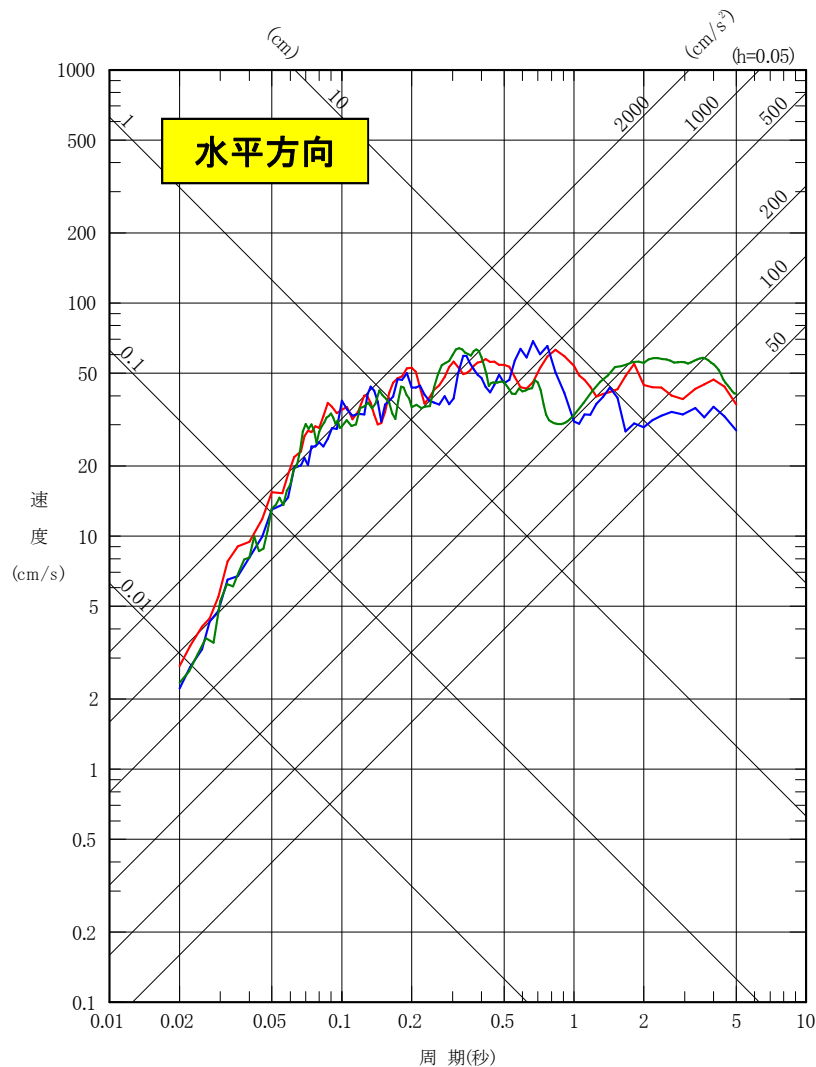
破壊開始点3

4. 検討用地震の地震動評価

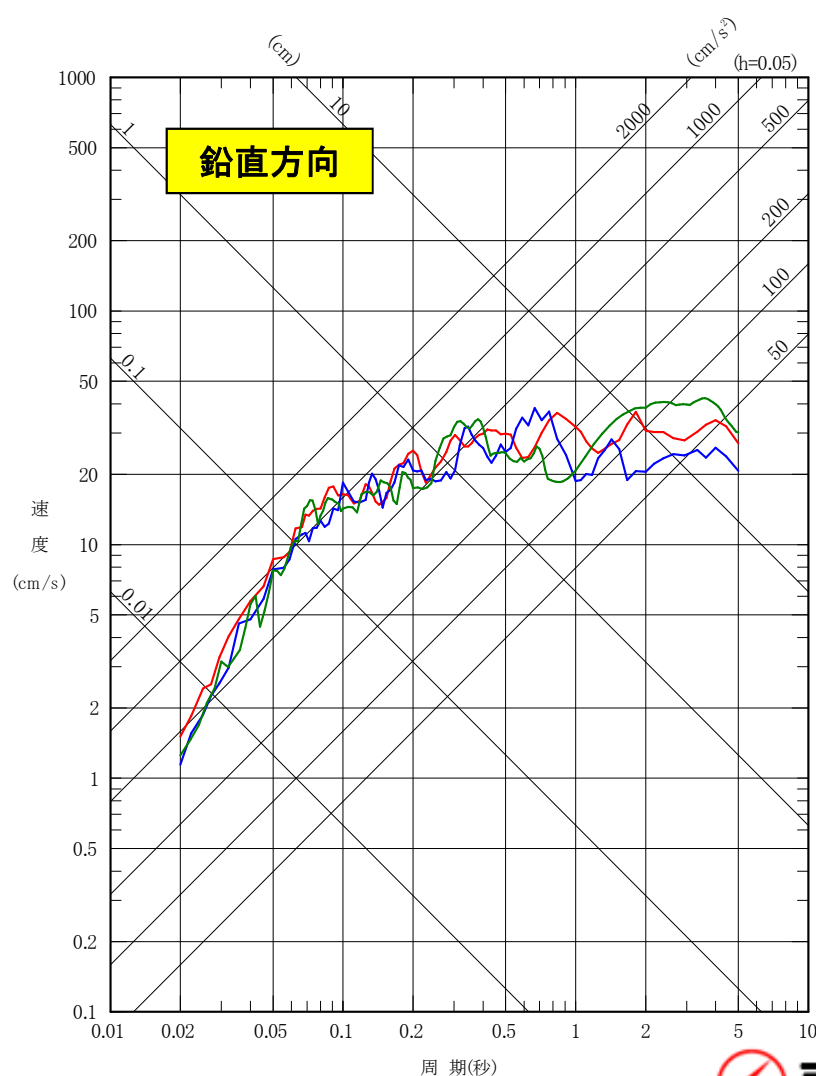
断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■不確かさケース1 (SMGAマントル内シミュレーションレンジ) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF <応答スペクトル>

- 破壊開始点1(不確かさケース1(SMGAマントル)SGF)
- 破壊開始点2(不確かさケース1(SMGAマントル)SGF)
- 破壊開始点3(不確かさケース1(SMGAマントル)SGF)



- 破壊開始点1(不確かさケース1(SMGAマントル)SGF)
- 破壊開始点2(不確かさケース1(SMGAマントル)SGF)
- 破壊開始点3(不確かさケース1(SMGAマントル)SGF)

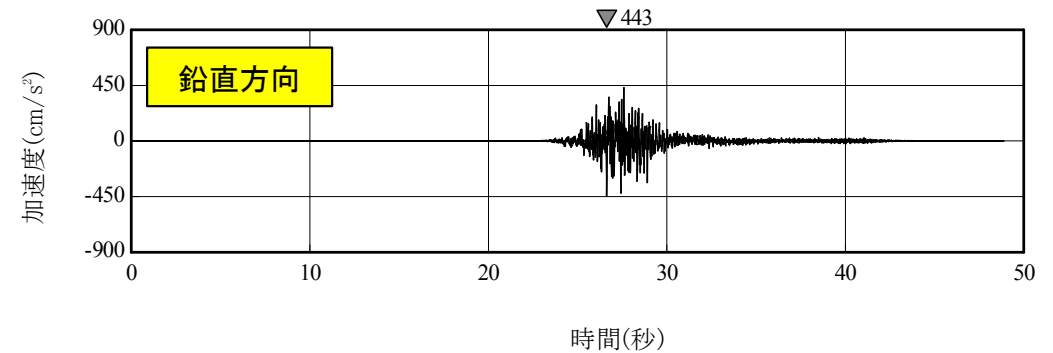
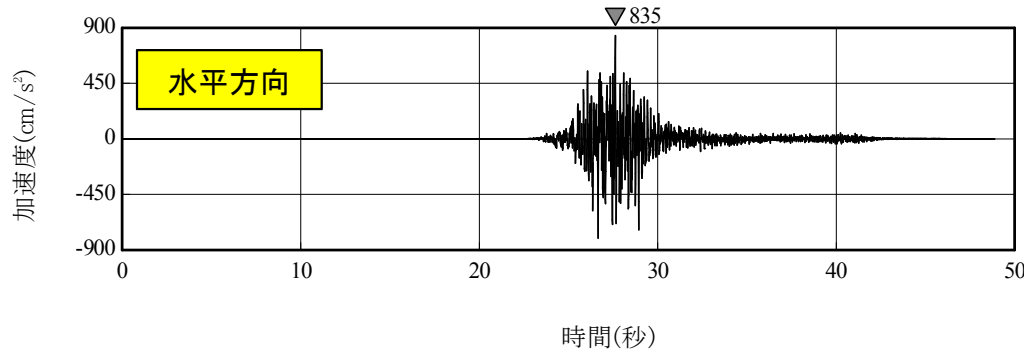


4. 検討用地震の地震動評価

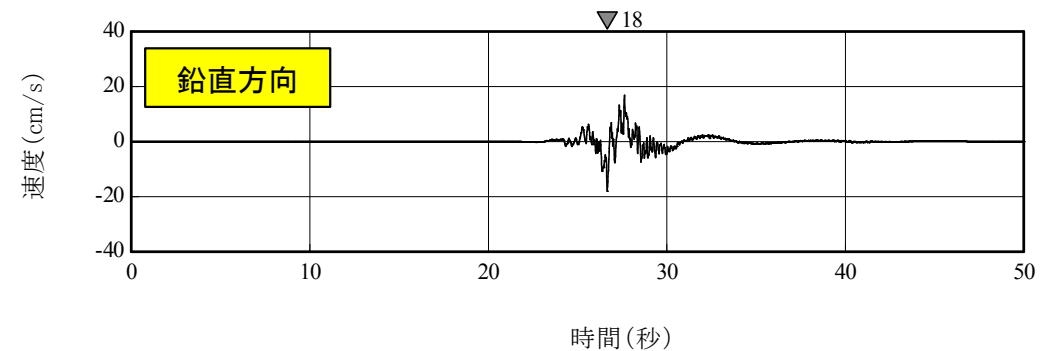
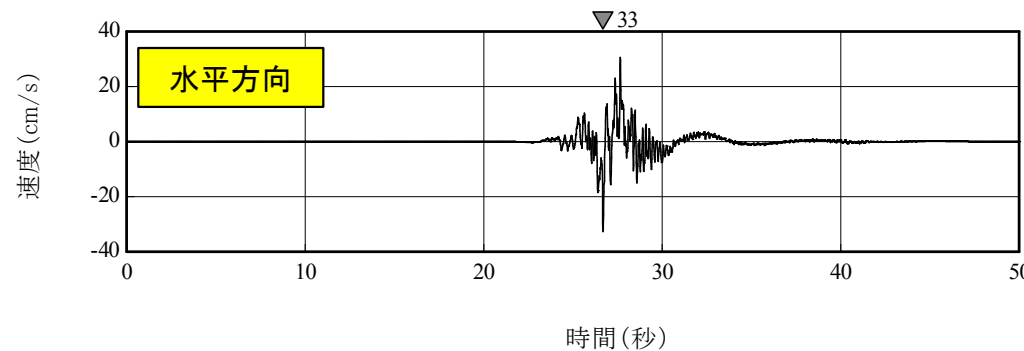
断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■不確かさケース3(SMGAマントル内集約) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF

<時刻歴波形>



加速度時刻歴波形

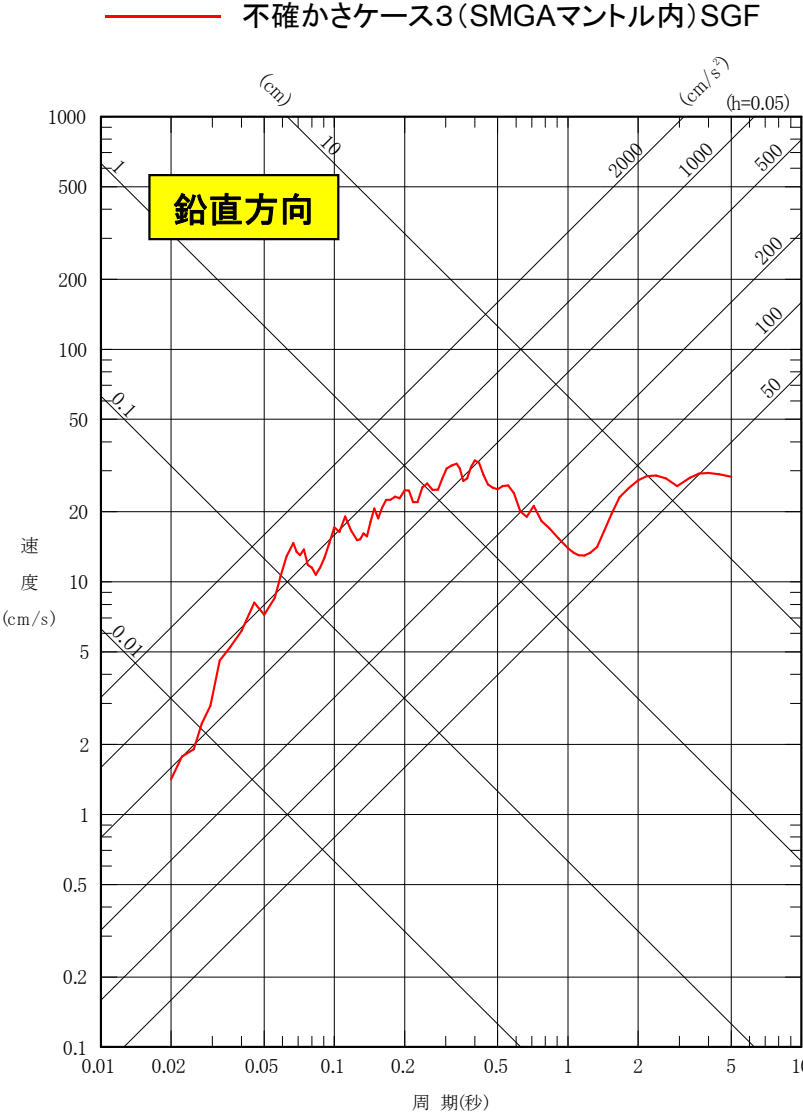
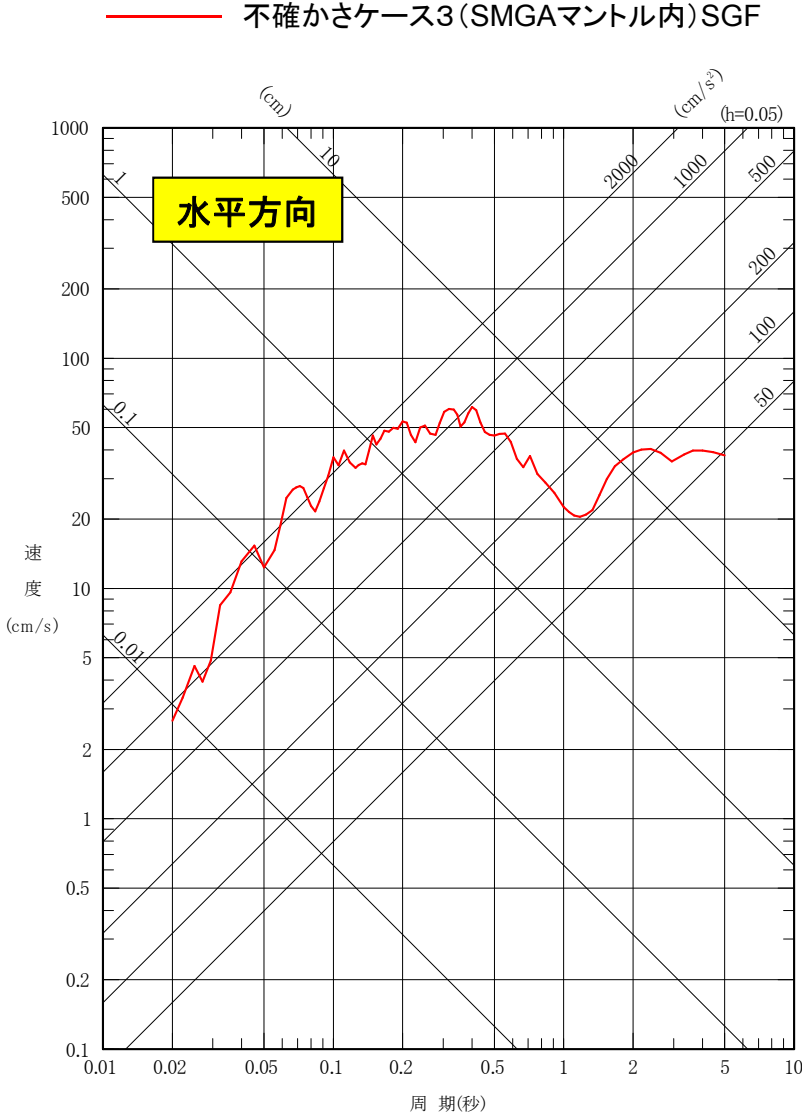


速度時刻歴波形

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■不確かさケース3 (SMGAマントル内集約) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 SGF ＜応答スペクトル＞



4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

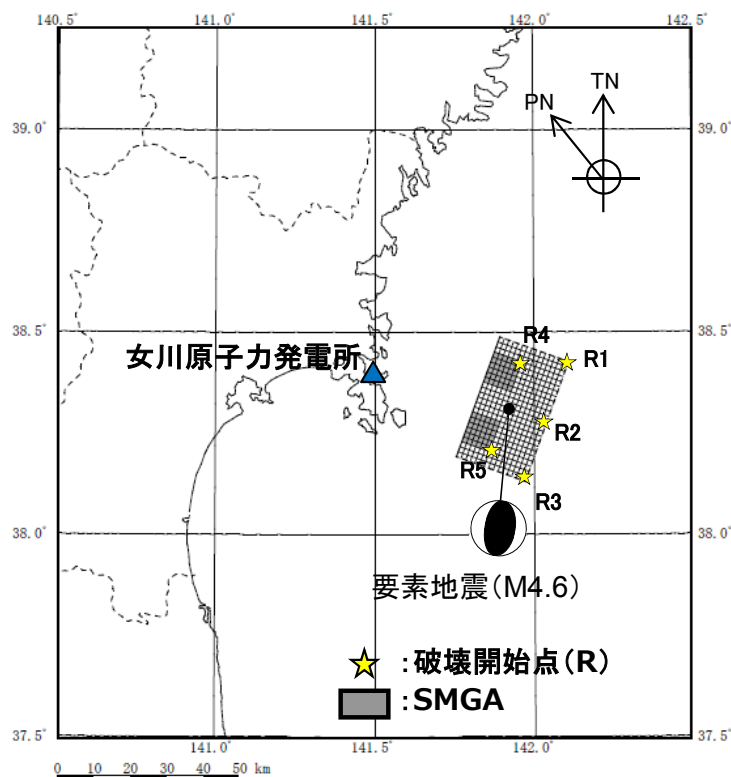
■不確かさケース2 (SMGA地殻内集約)

○断層モデル

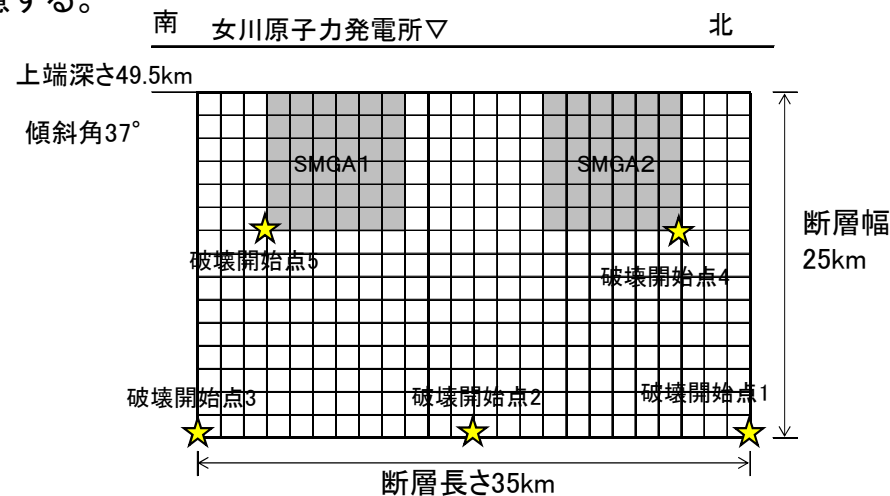
- 地震規模としては、基本ケースと同様に予め規模の不確かさを考慮しM7.5とする。
- 断層面は敷地に厳しい条件となるように4.7型地震の断層モデルの延長部に設定し、強震動生成域 (SMGA) を海洋地殻上端に配置する。また、短周期レベル (応力降下量) は、海洋性マントルと海洋地殻の物性の違い (0.47~0.70倍, pp.89~100参照) を考慮したうえで、保守的に4.7地震の0.8倍 (笹谷ほか (2006) の1.2倍) を考慮する。

○断層モデルを用いた手法による地震動評価

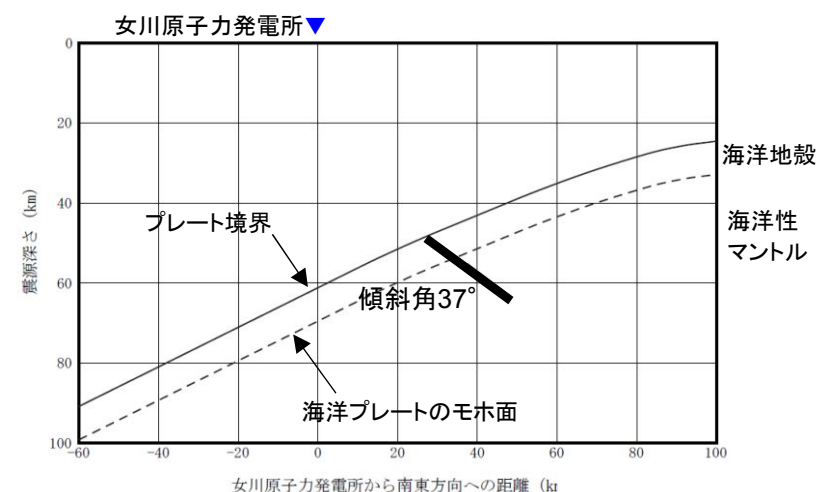
- 経験的グリーン関数法により評価。要素地震は、海洋プレート内の比較的浅く (海洋地殻内)、想定断層のSMGAに近い位置で発生した地震を用いる。波形合成は入倉ほか (1997) による。



断層モデル(平面図)



断層モデル(展開図)



断面図

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

断層モデルを用いた手法による地震動評価

○SMGAを海洋地殻に配置した不確かさケース2 (SMGA地殻内集約, 4.7地震の短周期レベル相当 $\times 0.8 (1.2A_s^{\ast})$) は, 同じSMGAを海洋性マントルに配置した不確かさケース3 (SMGAマントル内集約, 4.7地震の短周期レベル相当 $(1.5A_s)$) と以下の違いがある。

- ・SMGAの位置がサイトに近い(等価震源距離で75km→65kmと近くなる)。この分, 地震動が大きくなる。
- ・SMGAの短周期レベルが小さい ($1.2A_s / 1.5A_s = 0.8$ 倍(逆数は $1.5A_s / 1.2A_s = 1.25$ 倍))。この分, 地震動が小さくなる。

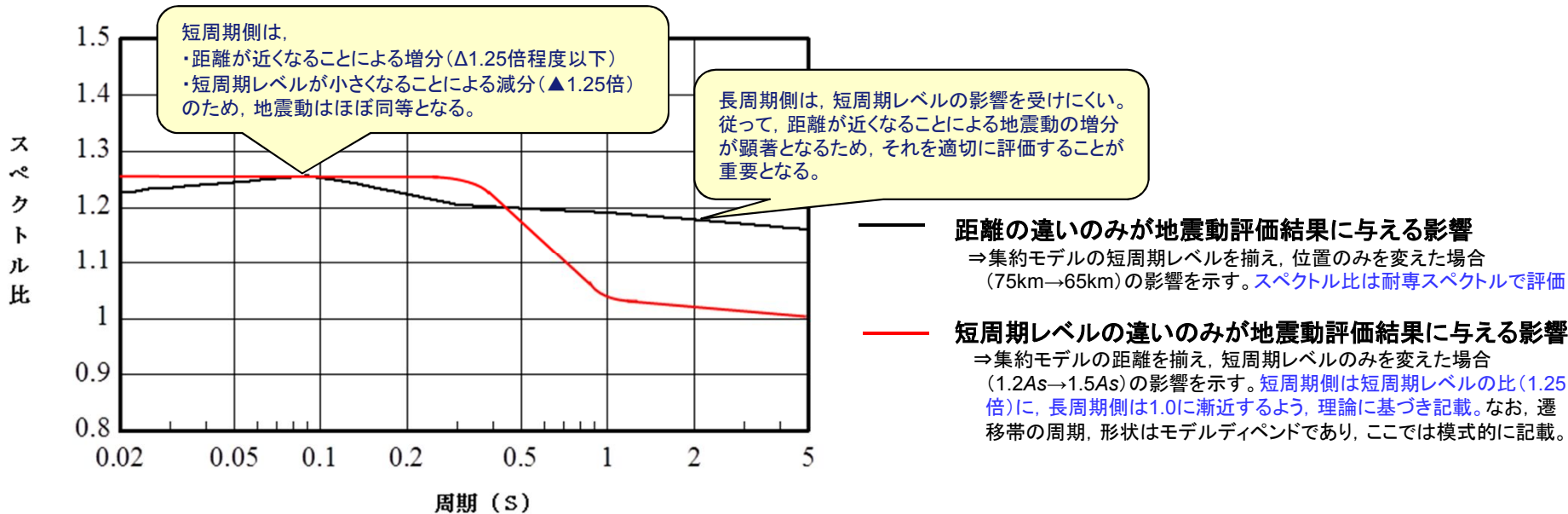
※ A_s : 笹谷ほか(2006)による短周期レベル

○震源距離の違い及び短周期レベルの違いが, 地震動の評価に与える平均的な傾向を下図に示す。この図から,

- ・短周期側は距離の違いによる増分と短周期レベルの違いによる減分により, 両者はほぼ同等の大きさになる。
- ・長周期側は距離の違いによる増分の影響が大きいいため, 不確かさケース2 (SMGA地殻内集約, $1.2A_s$) の方が大きくなる傾向にある。

従って, **不確かさケース2 (SMGA地殻内集約, $1.2A_s$) の地震動評価では, 長周期側の評価をより重視した手法を採用することが適切である。**

○検討対象地震における検討ケース3 (SMGA地殻内集約, $1.0A_s$) では, SMGAがマントル内にあった4.7地震のシミュレーションに採用した手法(統計的グリーン関数法, 放射特性一定)を採用しているが, この手法では長周期側が過小な評価になる恐れがある。一方, 4.7地震の余震では, 比較的浅い地震, すなわち海洋地殻に近い位置で発生したと思われる地震の記録が得られており, その地震の長周期成分は理論スペクトルと比較して大きい傾向にある(次ページ参照)。これらを踏まえ, **不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) の地震動評価には, 経験的グリーン関数法を採用する。**



距離, 短周期レベルの違いが地震動評価結果に与える影響

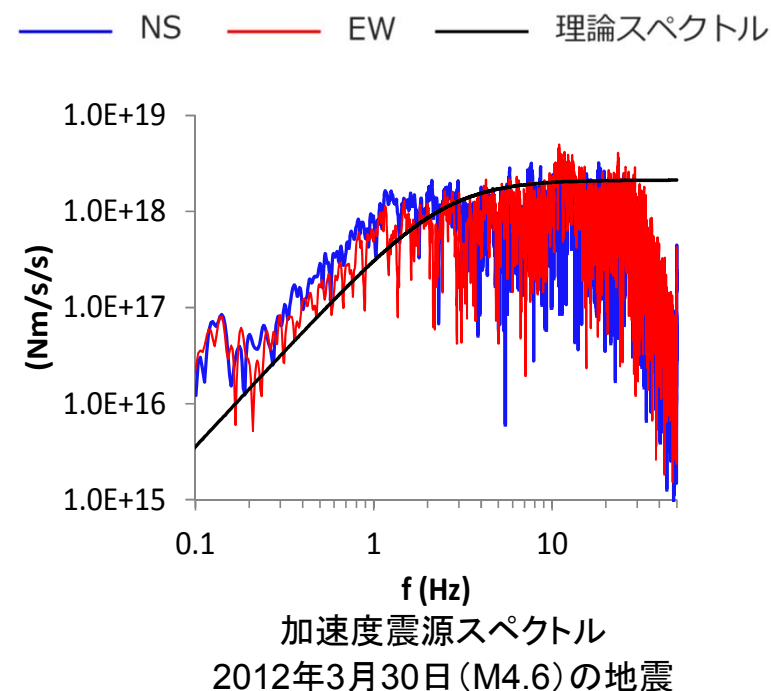
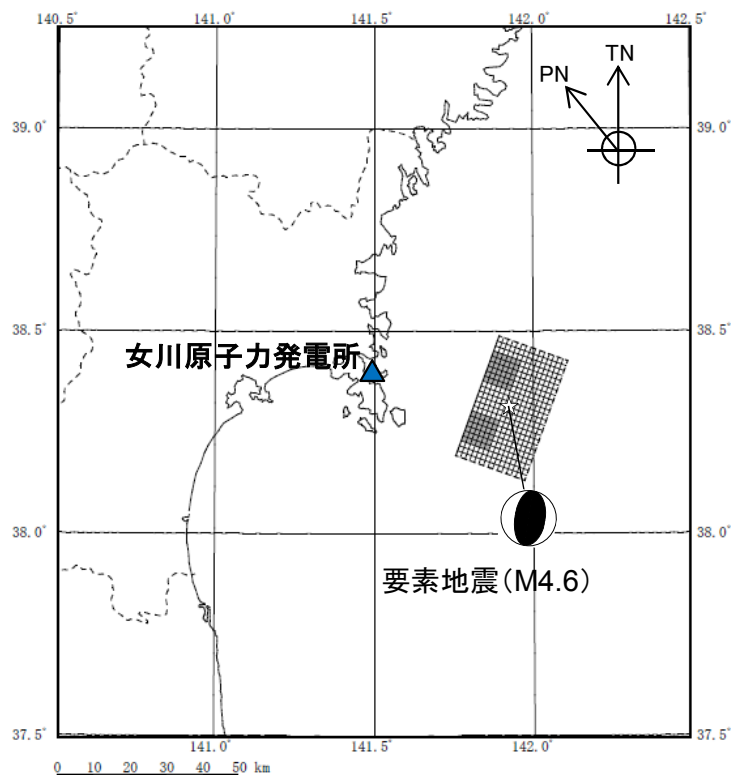
4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.89 一部修正

■不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) 経験的グリーン関数法の要素地震

- 海洋地殻の地震動特性を地震動評価に反映させるため、要素地震の選定にあたっては、①強震動生成域 (SMGA) に震源位置が近く海洋プレート上面からの距離が10km以内、②震源メカニズムが想定地震と同様の逆断層型の地震、③M4.5以上、④周期5秒までSN比が明瞭な地震とした。また、この地震は長周期 (低振動数) 成分が理論に比べ大きい傾向にあり、長周期評価にも適した傾向を持っている。



要素地震の諸元

発震の発生日時	震央位置 (経度, 緯度)	地震 規模	震源 深さ (km)	地震モーメント M_0 (Nm)	臨界振動数 f_c (Hz)	応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa)
2012年3月30日 5:38	141° 55.2' , 38° 18.7'	M4.6	50	9.01E+15	2.44	17.2

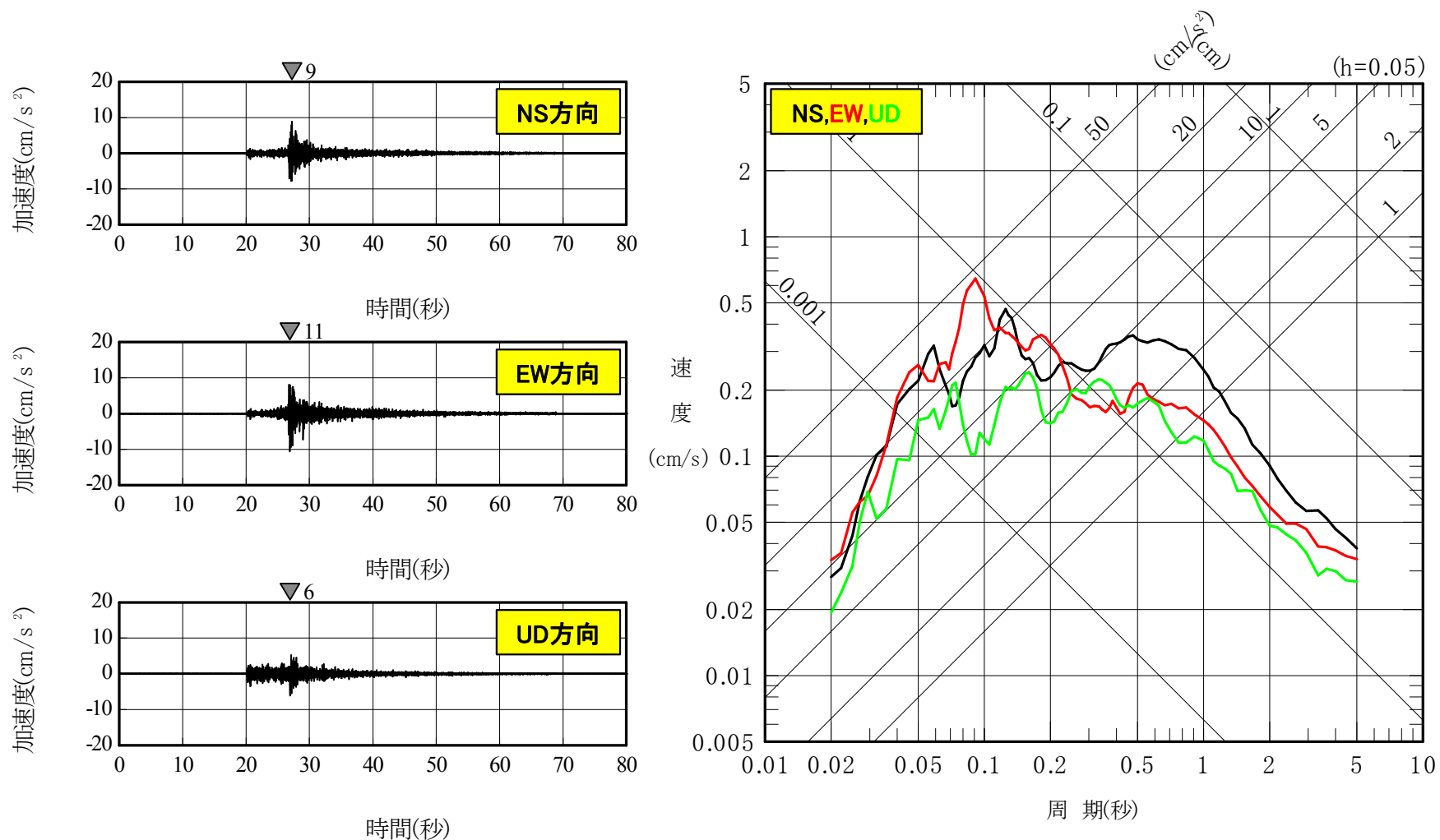
※地震諸元は、気象庁地震カタログによる。地震モーメント M_0 は、F-netによる。 f_c は、震源スペクトルより設定。

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.90 一部修正

■不確かさケース2(SMGA地殻内集約) 要素地震の観測記録(解放基盤相当(O.P.*-8.6m)でののはざとり波)



2012年3月30日(5:38)の宮城県沖の地震(M4.6)

※O.P.: 女川原子力発電所工事用基準面 (Onagawa peil) であり, O.P.±0m = T.P.(東京湾平均海面)-0.74m.

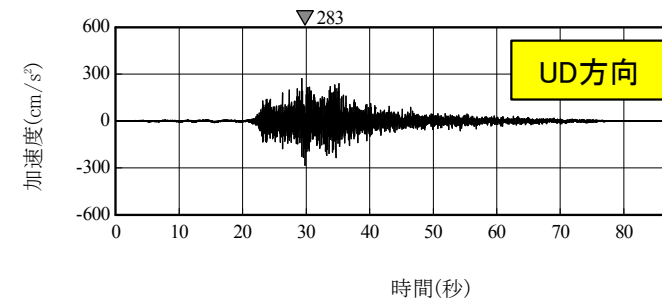
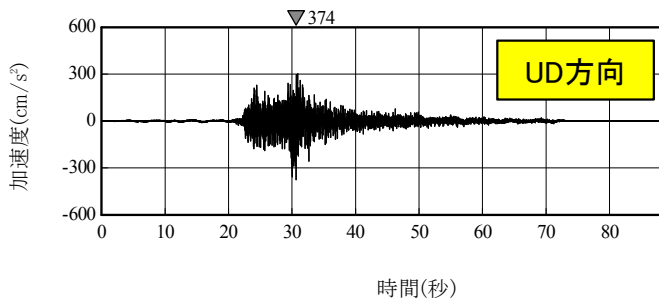
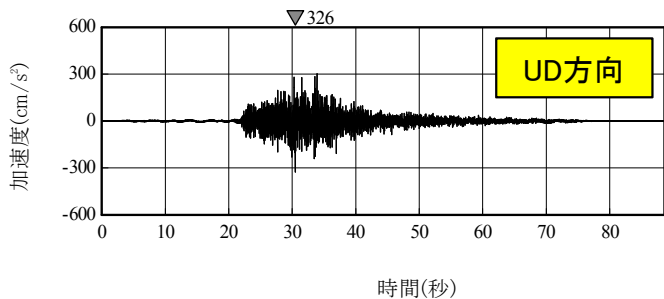
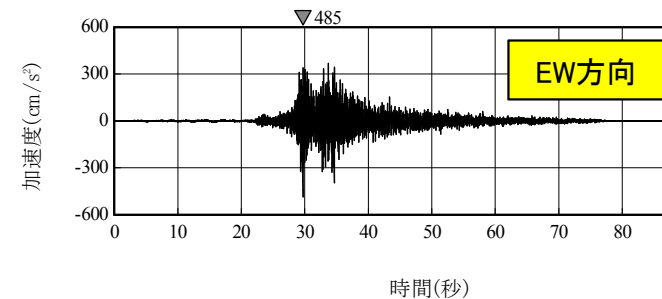
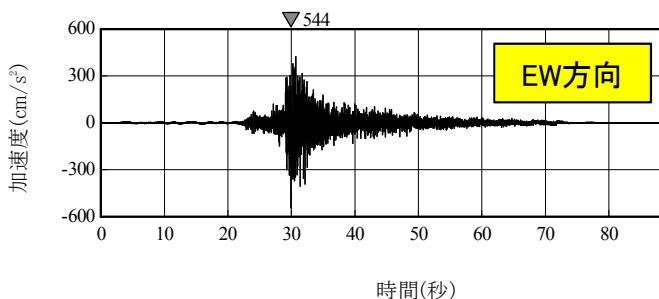
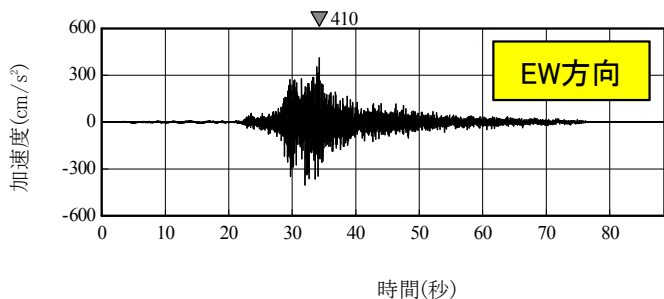
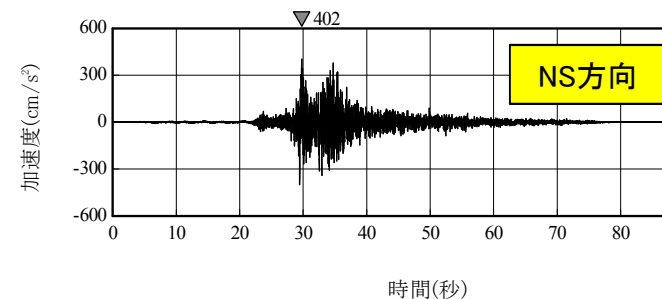
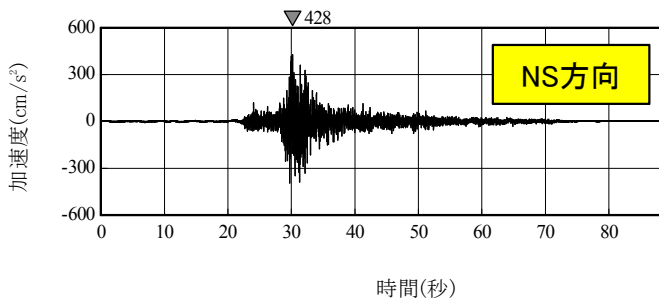
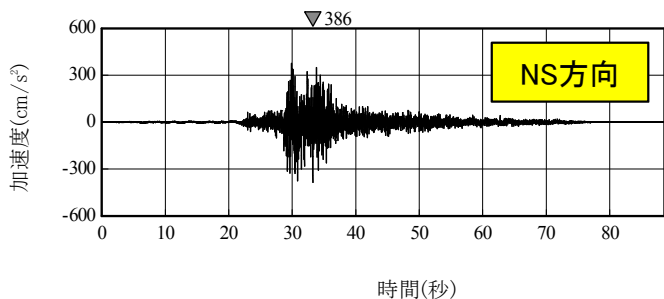
4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.91 一部修正

■不確かさケース2(SMGA地殻内集約) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 EGF

<加速度時刻歴波形>



破壊開始点1

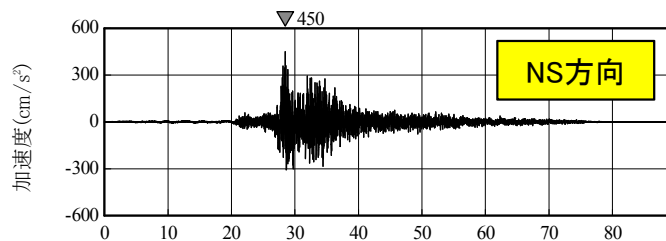
破壊開始点2

破壊開始点3

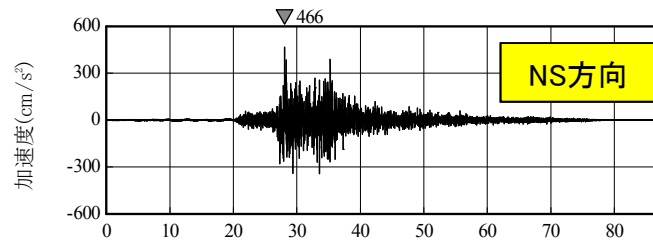
4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

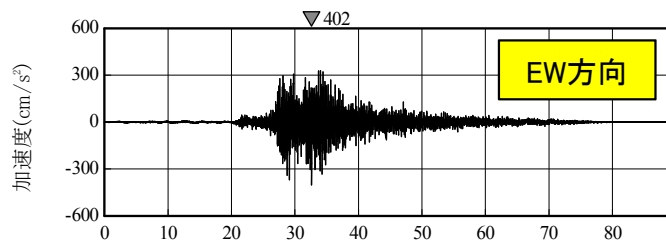
■不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 EGF 〈加速度時刻歴波形〉



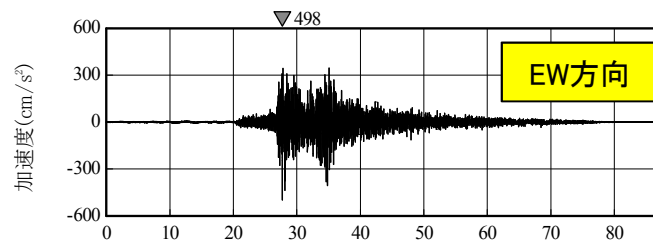
時間(秒)



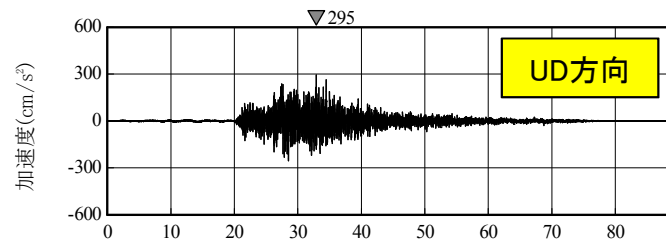
時間(秒)



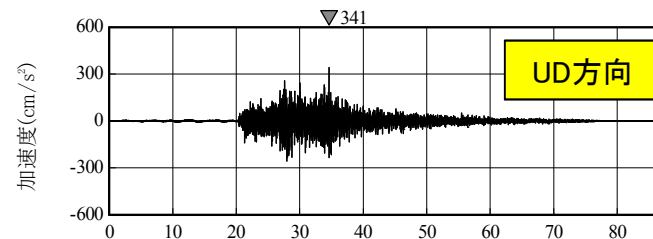
時間(秒)



時間(秒)



時間(秒)



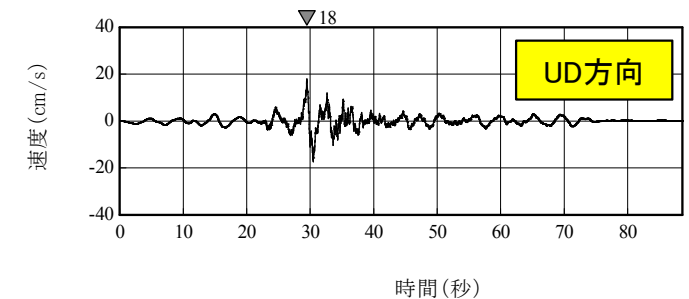
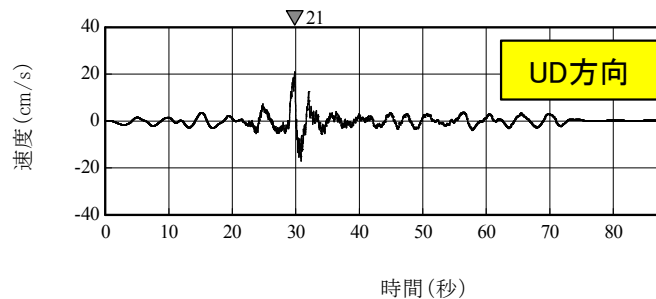
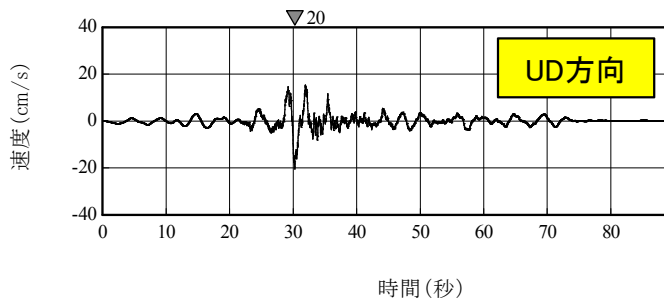
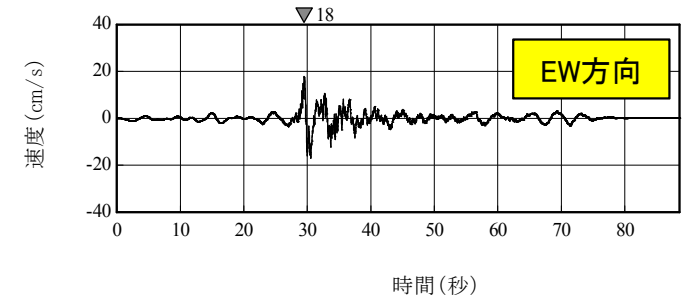
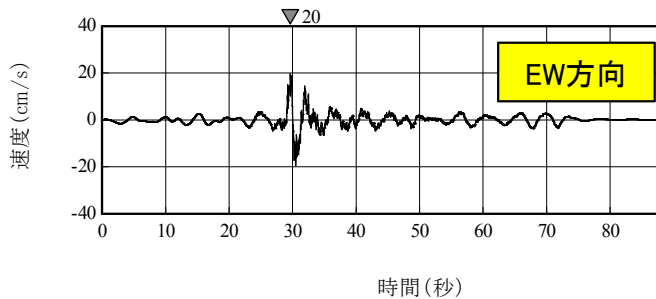
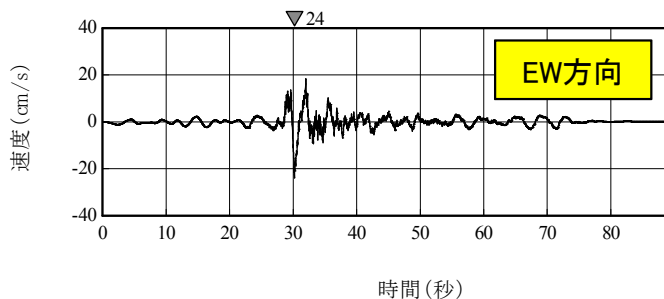
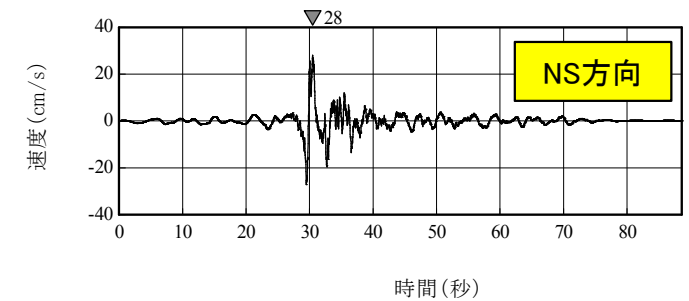
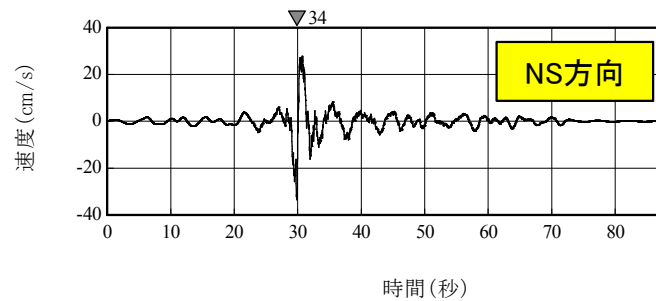
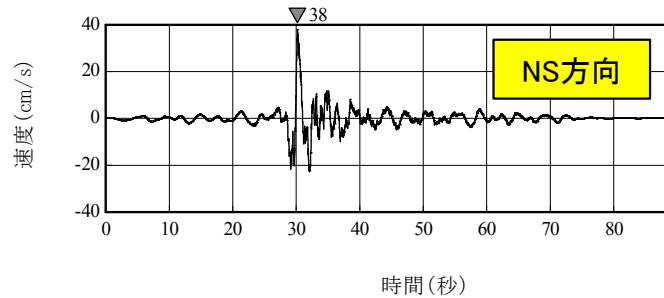
時間(秒)

破壊開始点4

破壊開始点5

4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.93 一部修正■不確かさケース2(SMGA地殻内集約) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 EGF
<速度時刻歴波形>

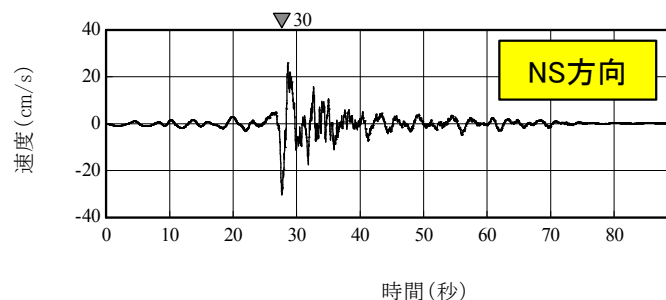
破壊開始点1

破壊開始点2

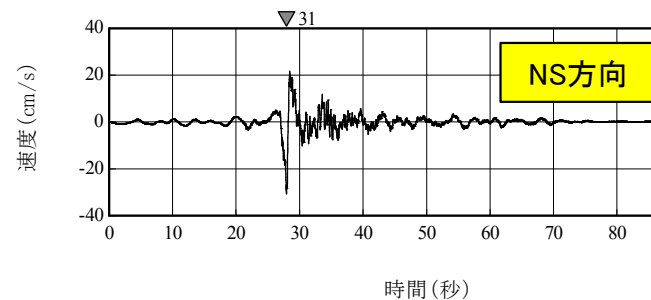
破壊開始点3

4. 検討用地震の地震動評価

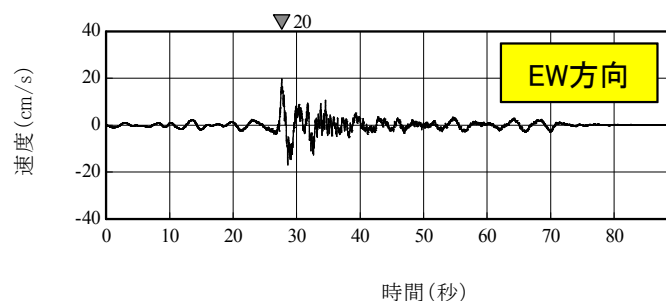
断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

■ 不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) 断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 EGF
<速度時刻歴波形>

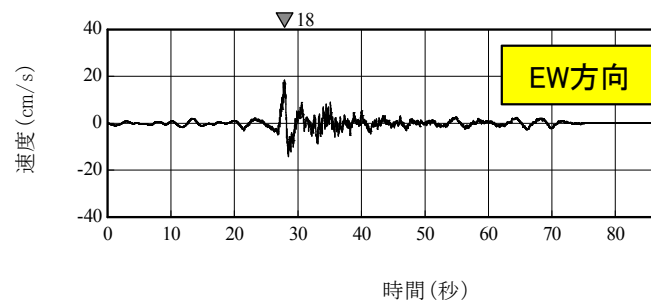
時間(秒)



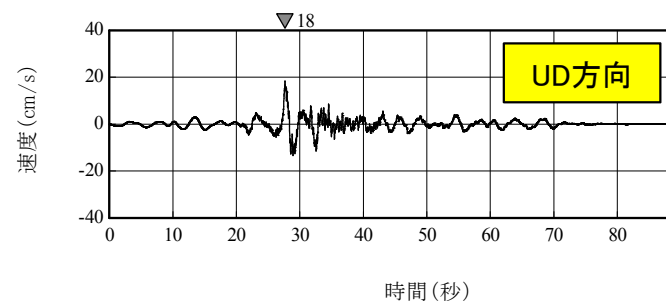
時間(秒)



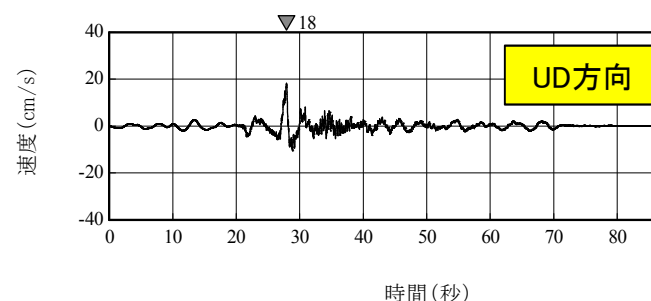
時間(秒)



時間(秒)



時間(秒)



時間(秒)

破壊開始点4

破壊開始点5

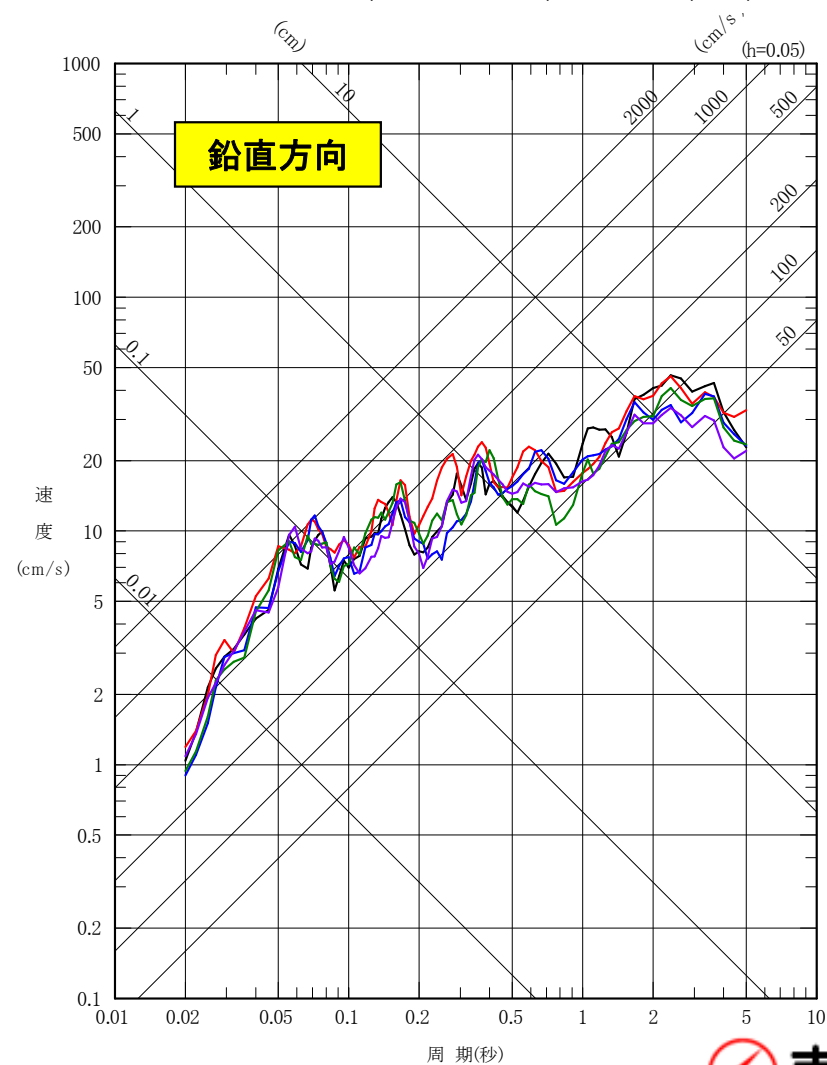
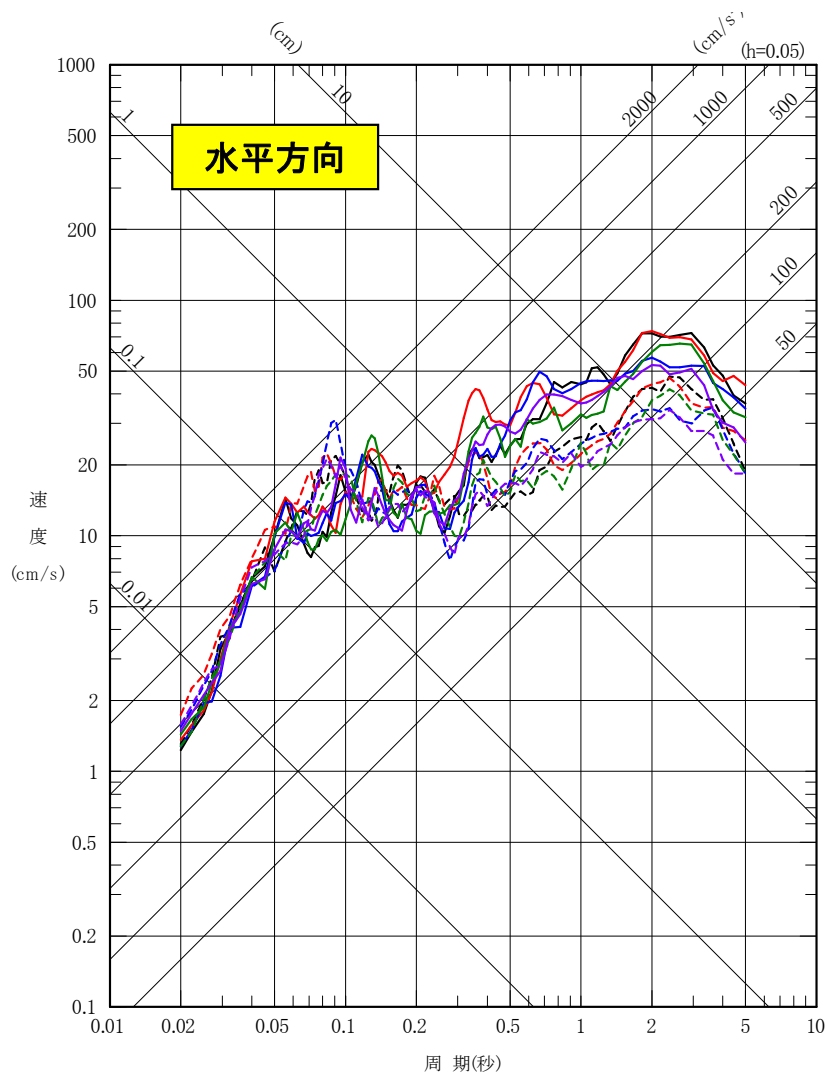
4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.95 一部修正■ 不確かさケース2 (SMGA地殻内集約) 評価結果 EGF
〈応答スペクトル〉

— 破壊開始点1 (NS), - - - 破壊開始点1 (EW) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点2 (NS), - - - 破壊開始点2 (EW) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点3 (NS), - - - 破壊開始点3 (EW) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点4 (NS), - - - 破壊開始点4 (EW) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点5 (NS), - - - 破壊開始点5 (EW) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)

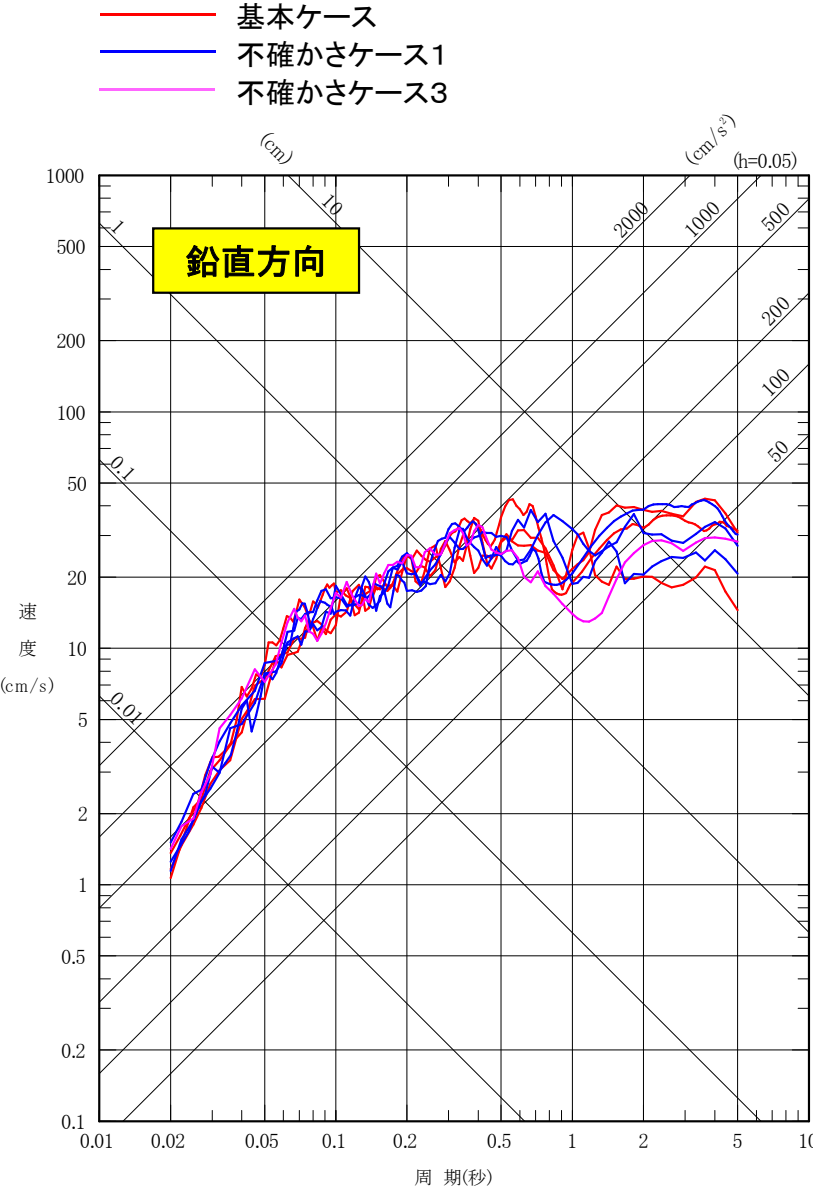
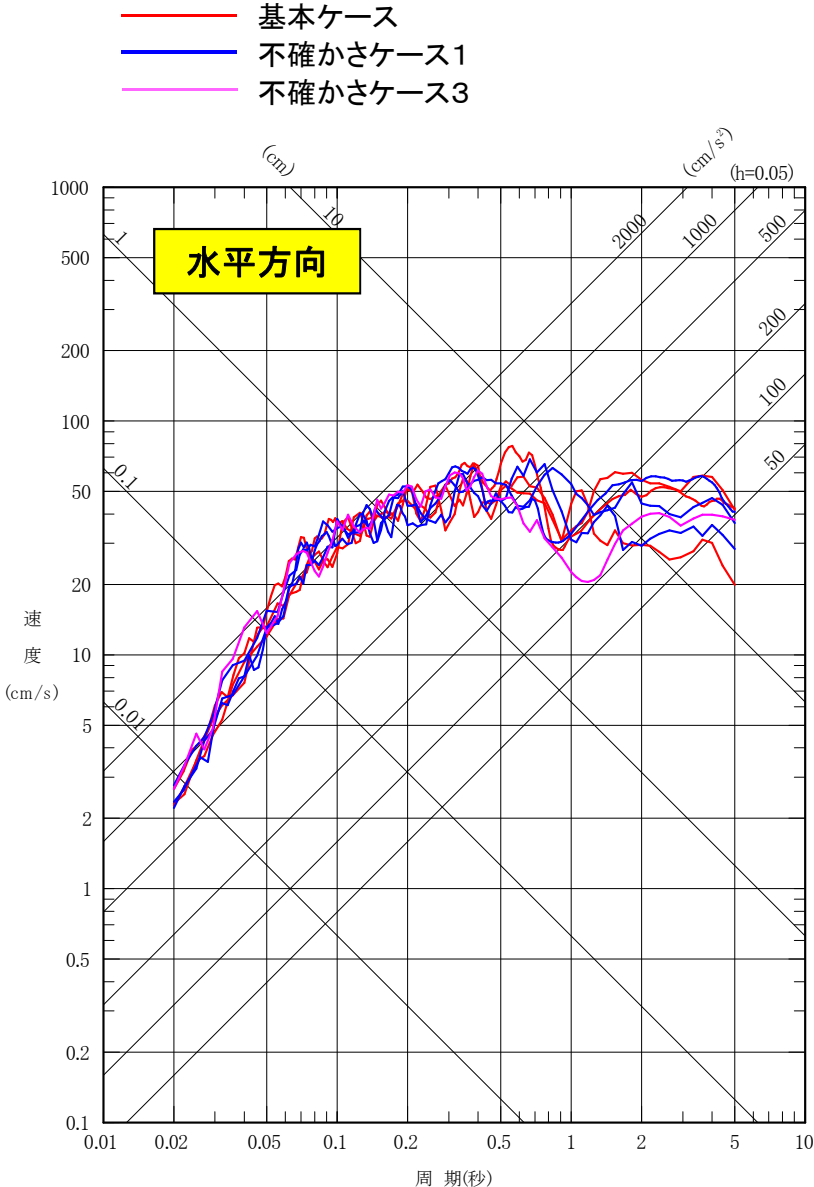
— 破壊開始点1 (UD) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点2 (UD) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点3 (UD) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点4 (UD) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)
 — 破壊開始点5 (UD) (不確かさケース2 (SMGA地殻内) EGF)



4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価 (SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

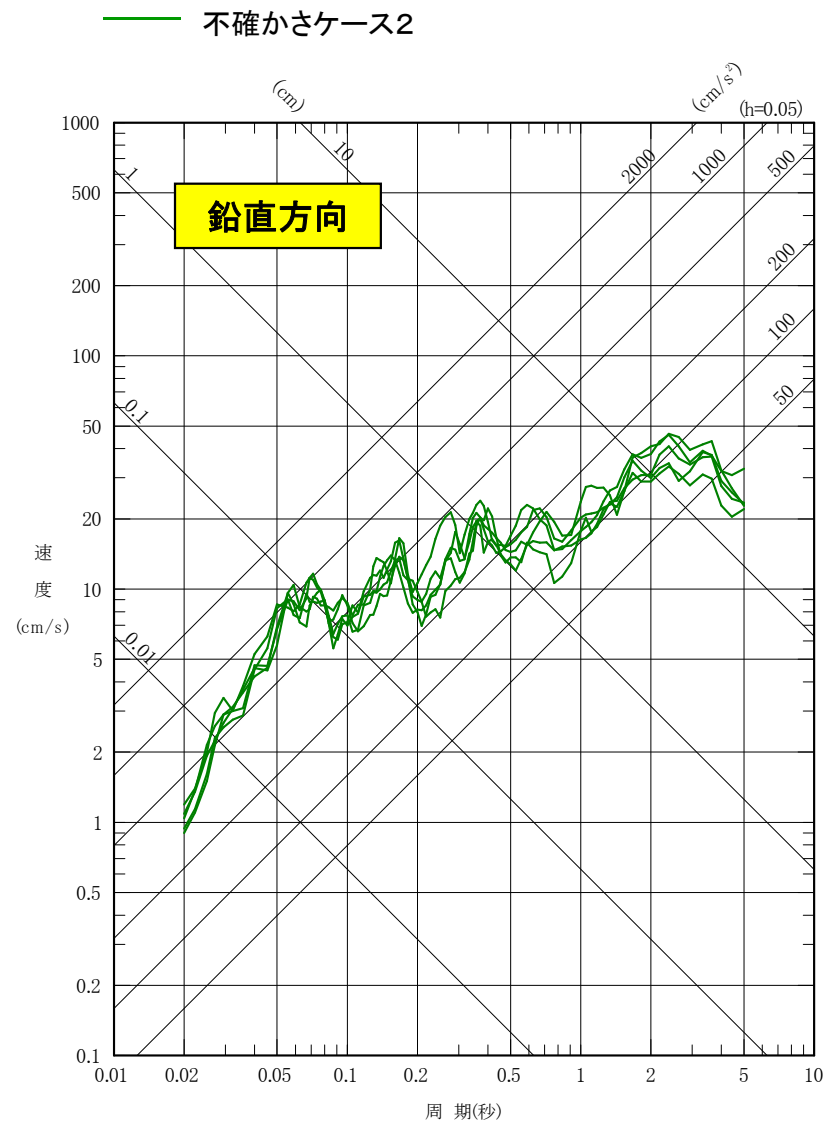
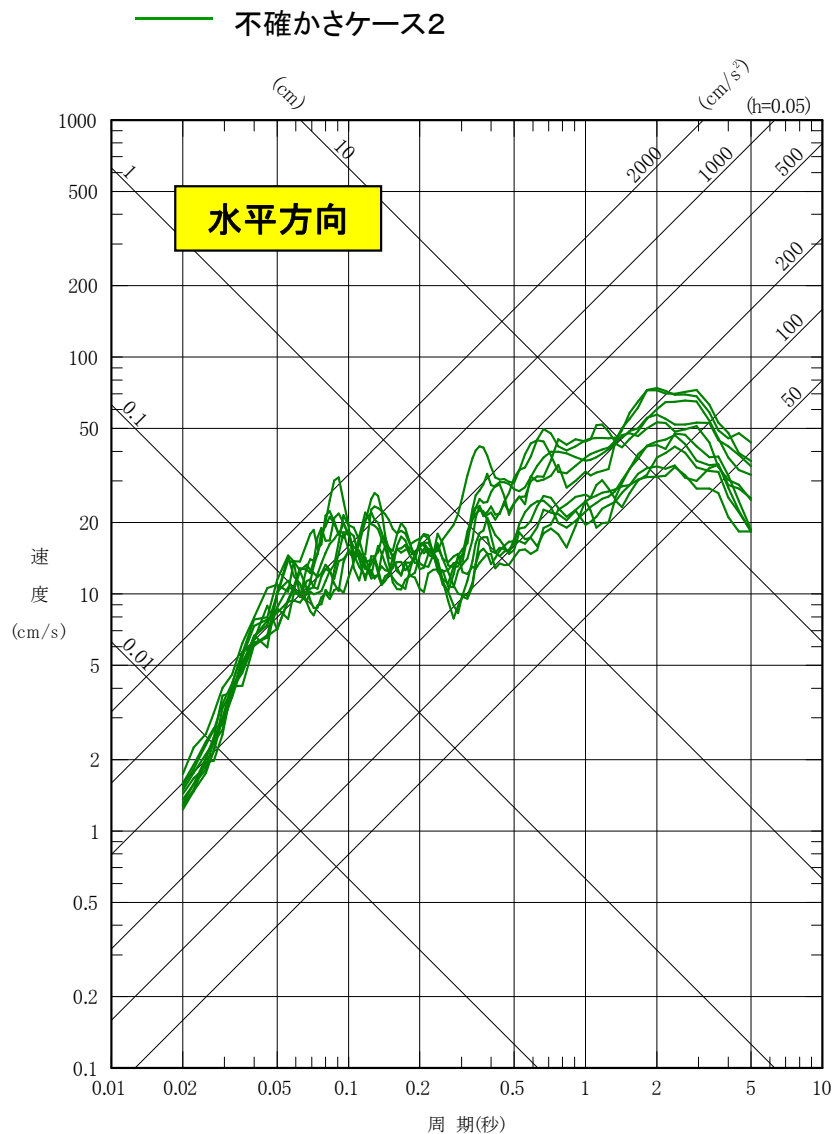
断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 まとめ: SMGAマントル内の各ケース



4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

■断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 まとめ:SMGA地殻内のケース



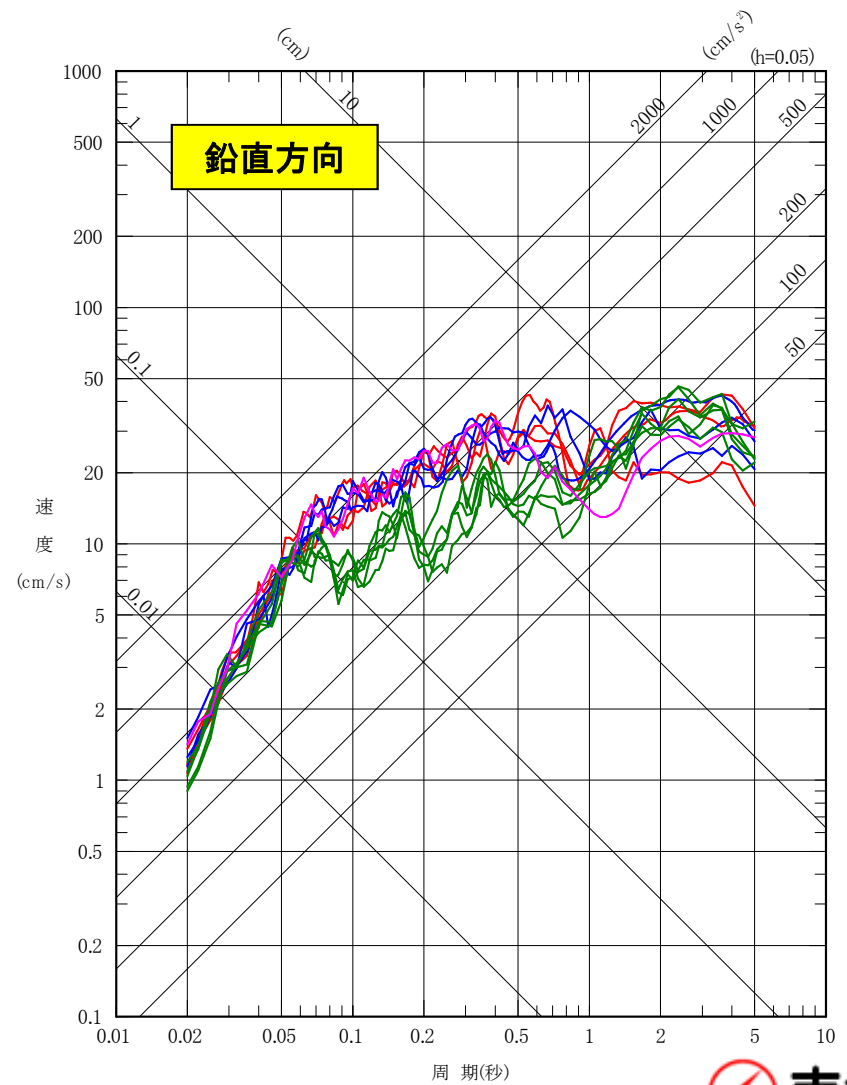
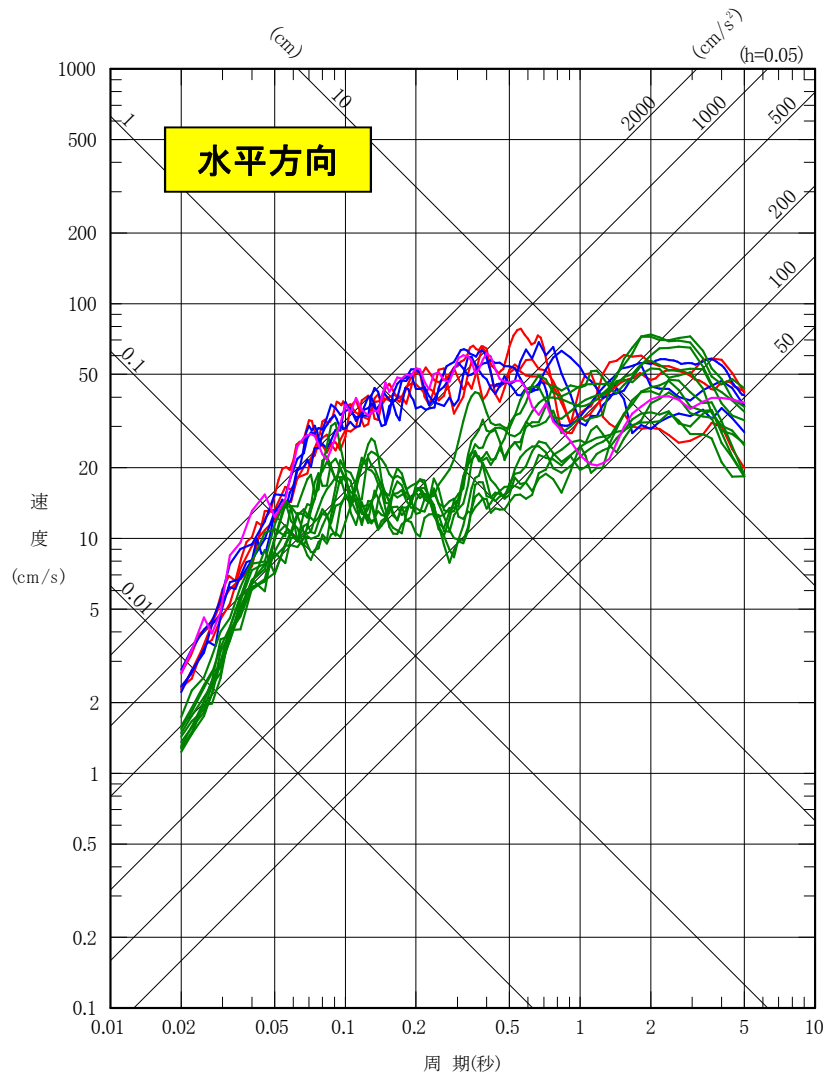
4. 検討用地震の地震動評価

断層モデルを用いた地震動評価(全ケース)

■断層モデルを用いた手法による地震動評価結果 まとめ:全ケース

- 基本ケース
- 不確かさケース1
- 不確かさケース2
- 不確かさケース3

- 基本ケース
- 不確かさケース1
- 不確かさケース2
- 不確かさケース3



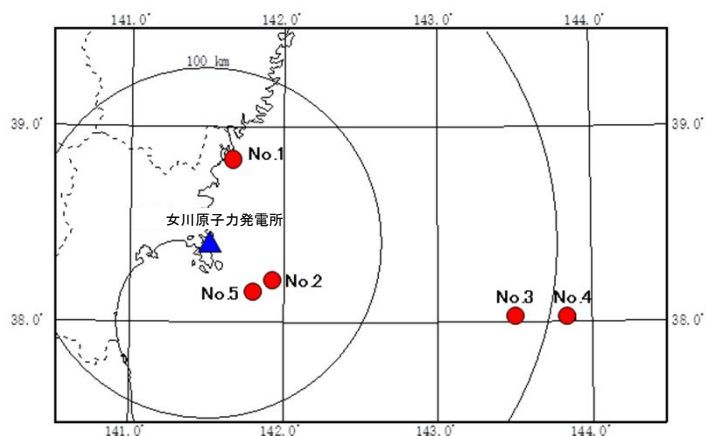
4. 検討用地震の地震動評価

応答スペクトルに基づく地震動評価

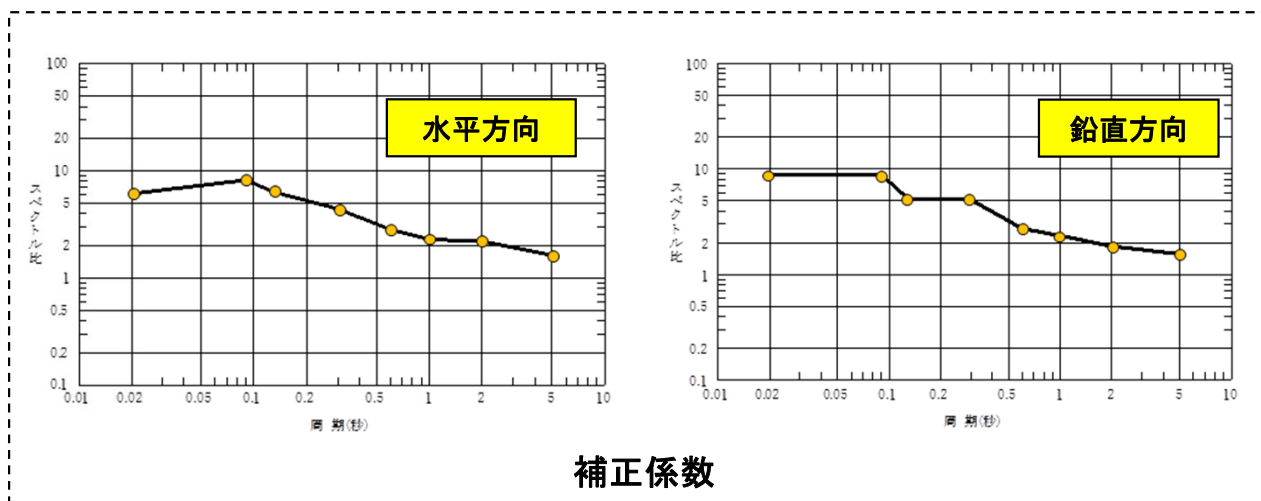
第367回審査会合(H28.6.3)
資料1-1 p.97 再掲

■補正係数の算定方法

- ・敷地で観測された海洋プレート内地震はプレート間地震と比較して少なく、Noda et al.(2002)のデータの範囲(M=5.5~7.0, Xeq=28~202km, 評価式を確認したデータセットM=5.4~8.1, Xeq=14~218km)に対応する海洋プレート内地震の数は限られている。
- ・地震数は少ないが、敷地から約200kmの範囲内で発生したM6以上の海洋プレート内地震5地震を対象とし、これらの観測記録の応答スペクトルとNoda et al.(2002)に基づく応答スペクトルの比の平均値を基にサイト補正係数を算出。
- ・サイト補正係数のコントロールポイントは、Noda et al.(2002)によるコントロールポイントの周期(8点)の値とする。



サイト補正係数算定に用いた地震の震央分布



補正係数

サイト補正係数算定に用いた地震の諸元

No.	発生日時	M	震央距離 (km)	震源深さ (km)
1	2003年5月26日	7.1	48	72
2	2011年4月7日	7.2	43	66
3	2011年7月10日	7.3	180	34
4	2012年12月7日	7.3	211	49
5	2013年8月4日	6.0	37	58

Table 1. Control Points of Horizontal Earthquake Motion on Seismic Bedrock

Field	M	Xeq (km)	Coordinates of Control Points pSv (cm/s)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			TA(s)	TB(s)	TC(s)	TD(s)	TE(s)	TF(s)	TG(s)	TH(s)
Very Near	8.5	40	1.62	18.44	27.32	47.87	68.05	64.66	53.52	40.06
	8	25	1.69	20.05	28.96	48.22	67.80	65.25	52.51	38.35
	7	12	1.40	17.20	24.84	33.86	43.42	36.42	25.15	17.85
	6	6	1.04	12.82	18.51	21.84	23.17	17.41	9.64	3.88
Near	8.5	80	0.73	7.36	11.43	22.92	34.79	32.58	27.60	21.96
	8	50	0.67	7.45	11.17	20.05	28.65	27.06	22.70	17.19
	7	20	0.78	9.44	13.64	19.10	24.83	20.69	14.48	10.37
Inter mediate	6	8	0.77	9.45	13.65	16.23	17.18	12.73	7.16	2.89
	8.5	160	0.26	2.22	3.67	9.45	15.17	14.83	13.64	12.26
	8	100	0.32	3.08	4.86	10.27	18.04	14.98	12.73	10.37
Far	7	50	0.23	2.65	4.01	6.02	7.64	6.88	4.87	3.64
	6	25	0.21	2.49	3.60	4.54	4.84	3.98	2.07	0.86
	8.5	200	0.18	1.44	2.43	6.87	11.17	11.17	10.67	10.04
	8	200	0.10	0.80	1.35	3.82	6.21	6.21	5.93	5.58
Far	7	125	0.046	0.43	0.70	1.34	1.81	1.59	1.26	1.05
	6	78	0.041	0.45	0.65	0.95	1.03	0.80	0.49	0.22

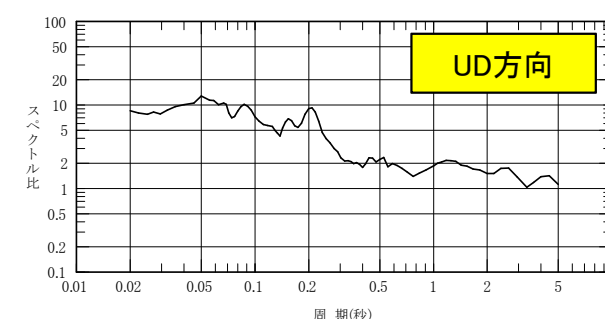
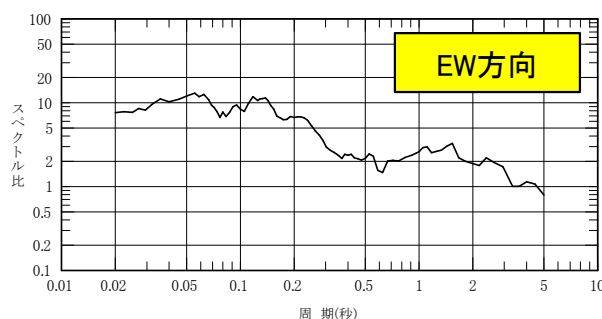
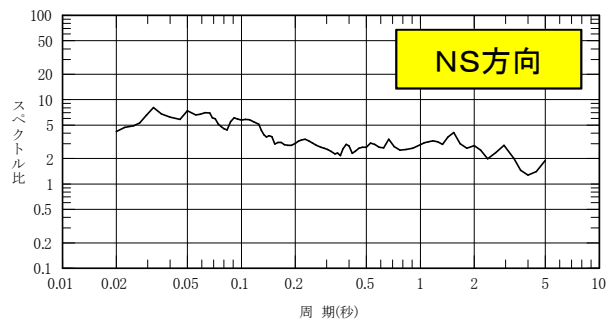
The value of pSv is pseudo-velocity response spectrum with a damping factor of 5%.

4. 検討用地震の地震動評価

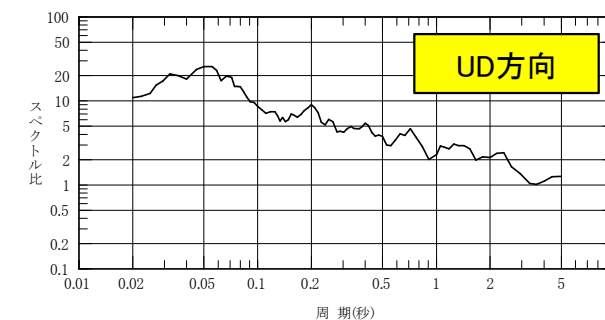
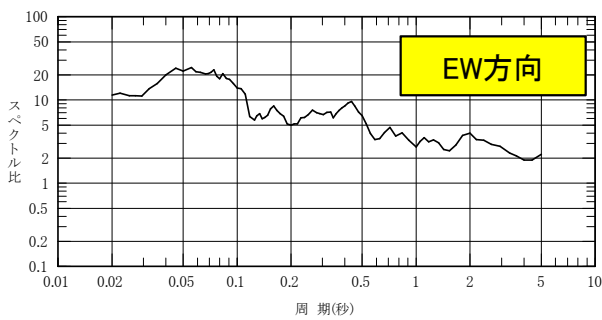
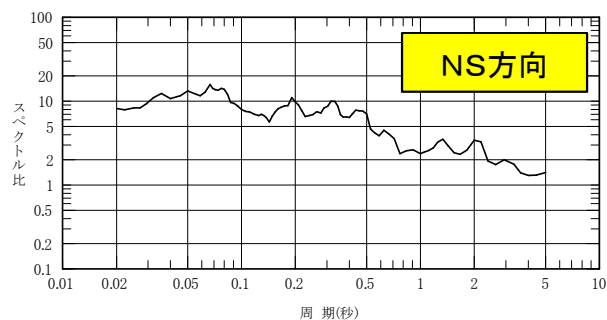
応答スペクトルに基づく地震動評価

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.98 再掲

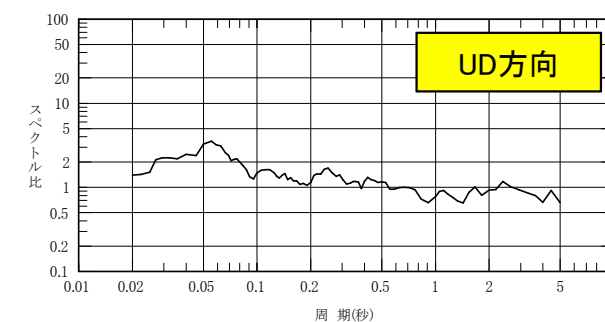
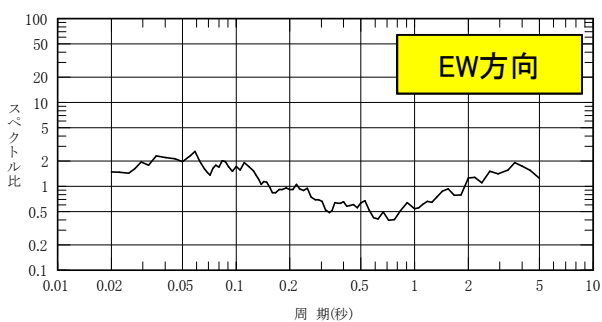
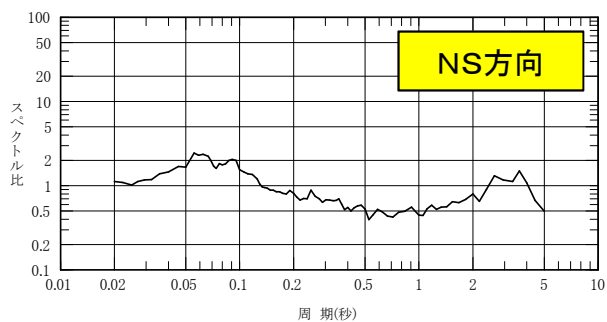
■ 観測記録の応答スペクトルとNoda et al.(2002)に基づく応答スペクトルの比



No.1 2003年5月26日の地震(M7.1)



No.2 2011年4月7日の地震(M7.2)



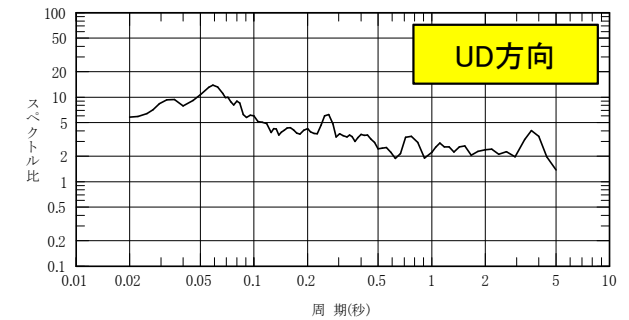
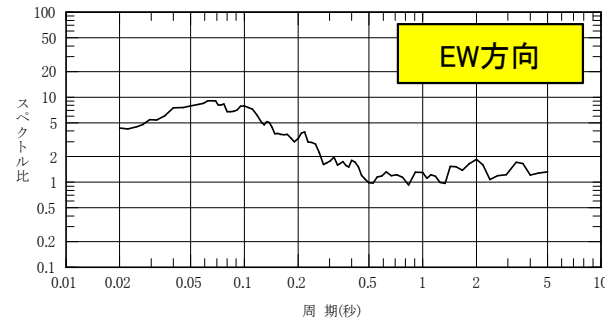
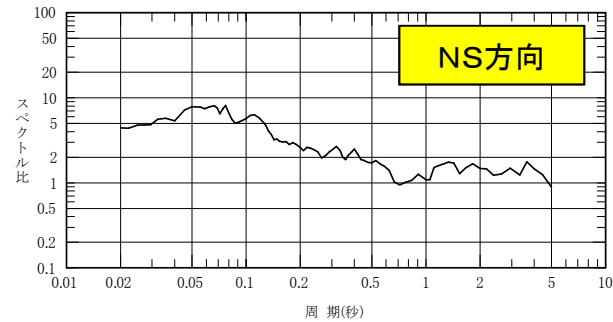
No.3 2011年7月10日の地震(M7.3)

4. 検討用地震の地震動評価

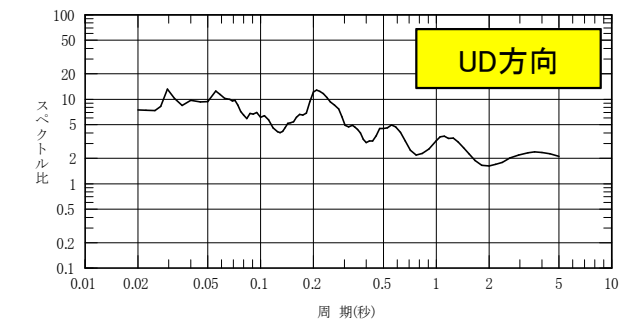
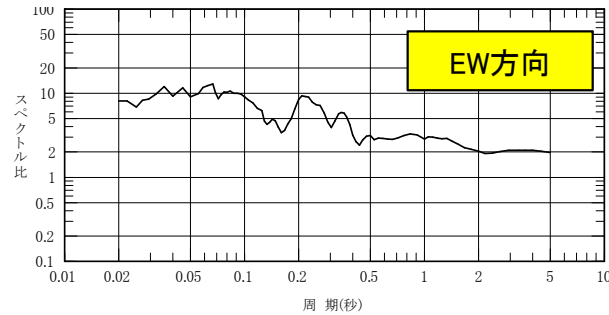
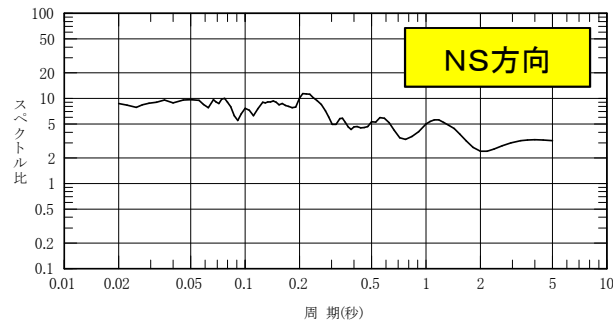
応答スペクトルに基づく地震動評価

第367回審査会合 (H28.6.3)
資料1-1 p.99 再掲

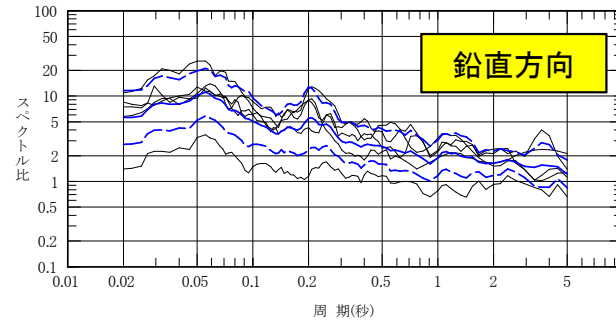
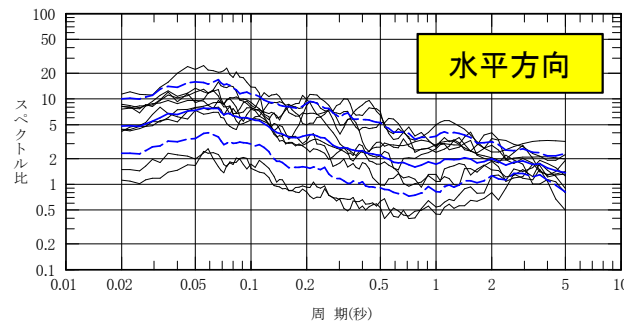
■ 観測記録の応答スペクトルとNoda et al.(2002)に基づく応答スペクトルの比



No.4 2012年12月7日の地震(M7.3)



No.5 2013年8月4日の地震(M6.0)

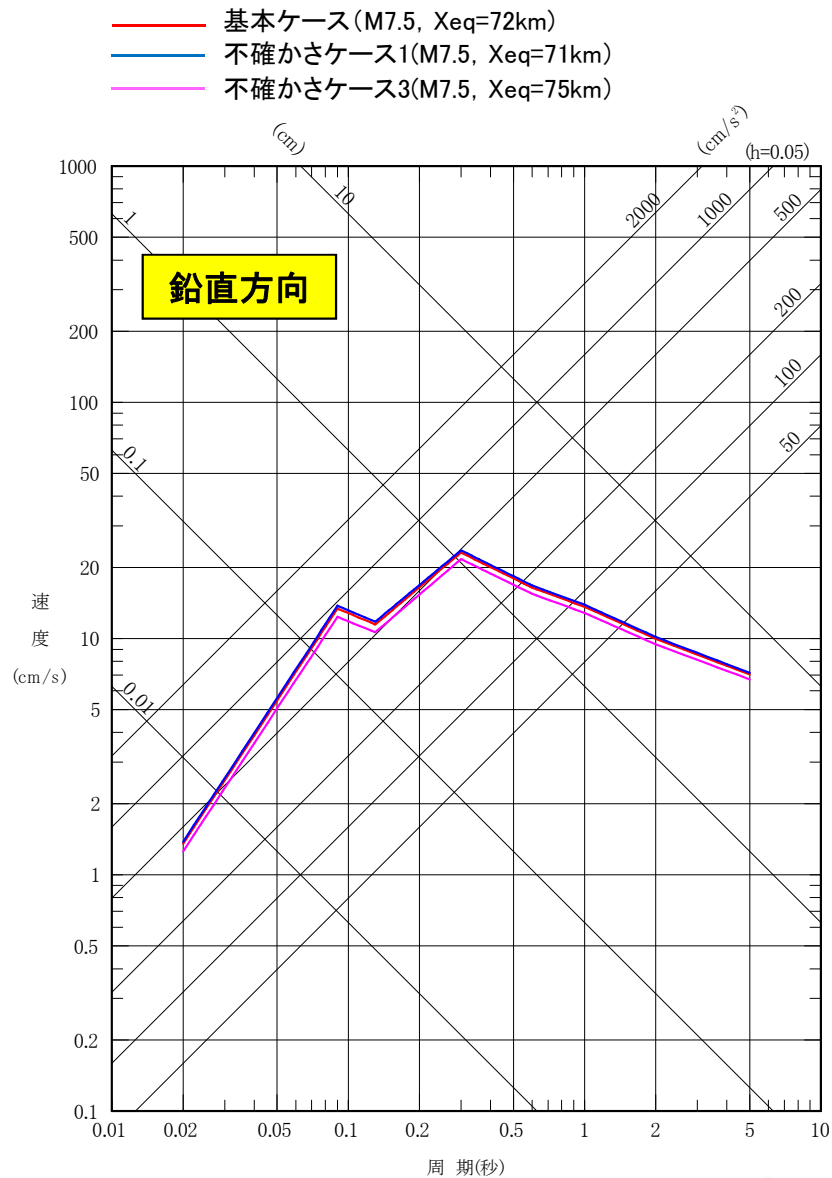
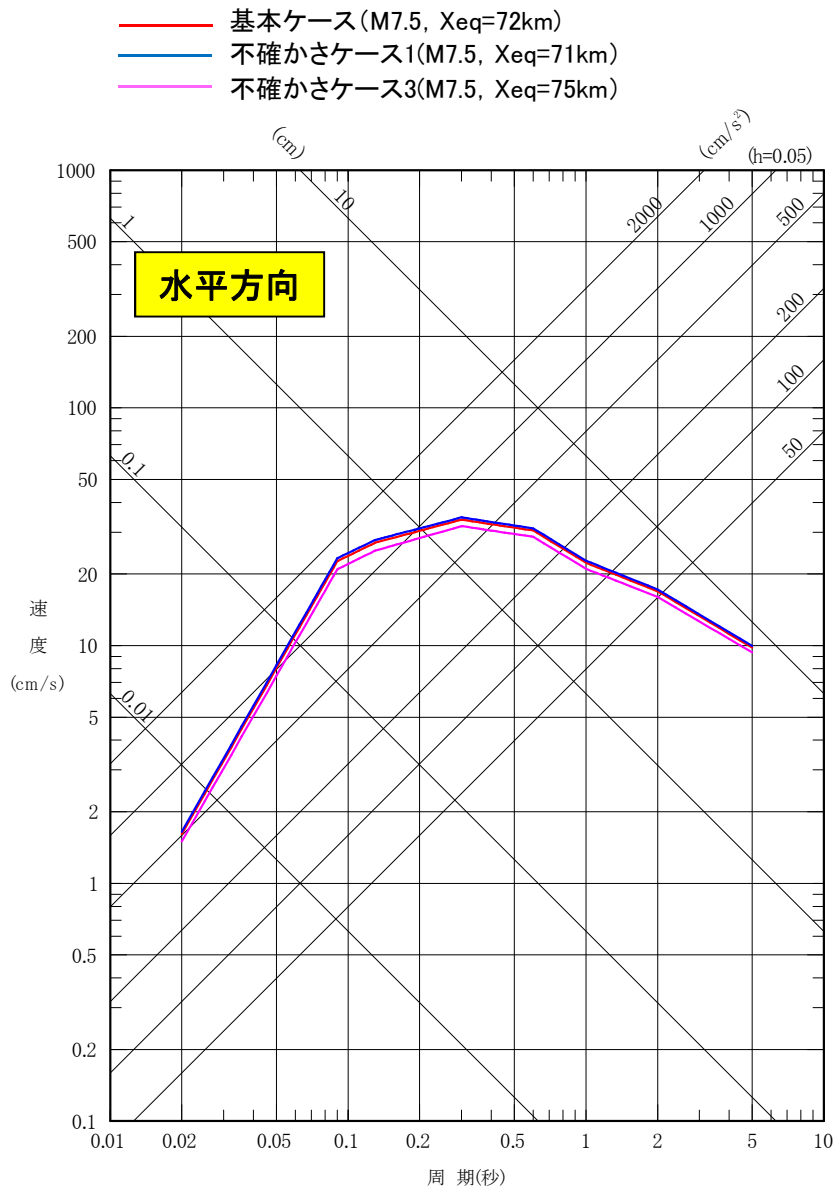


— 各地震のNoda et al.(2002)との応答スペクトル比
 — 5地震の平均
 - - 5地震の平均±標準偏差

5地震のNoda et al.(2002)との応答スペクトル比及び平均と±σ

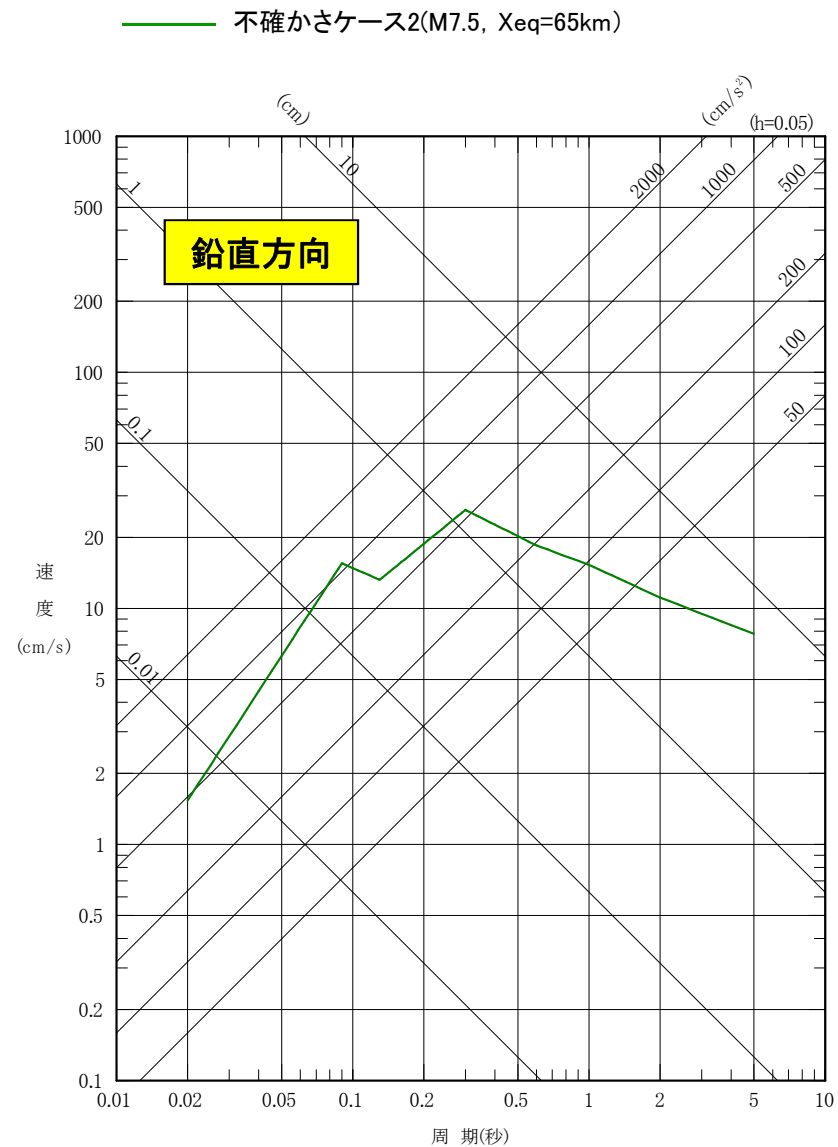
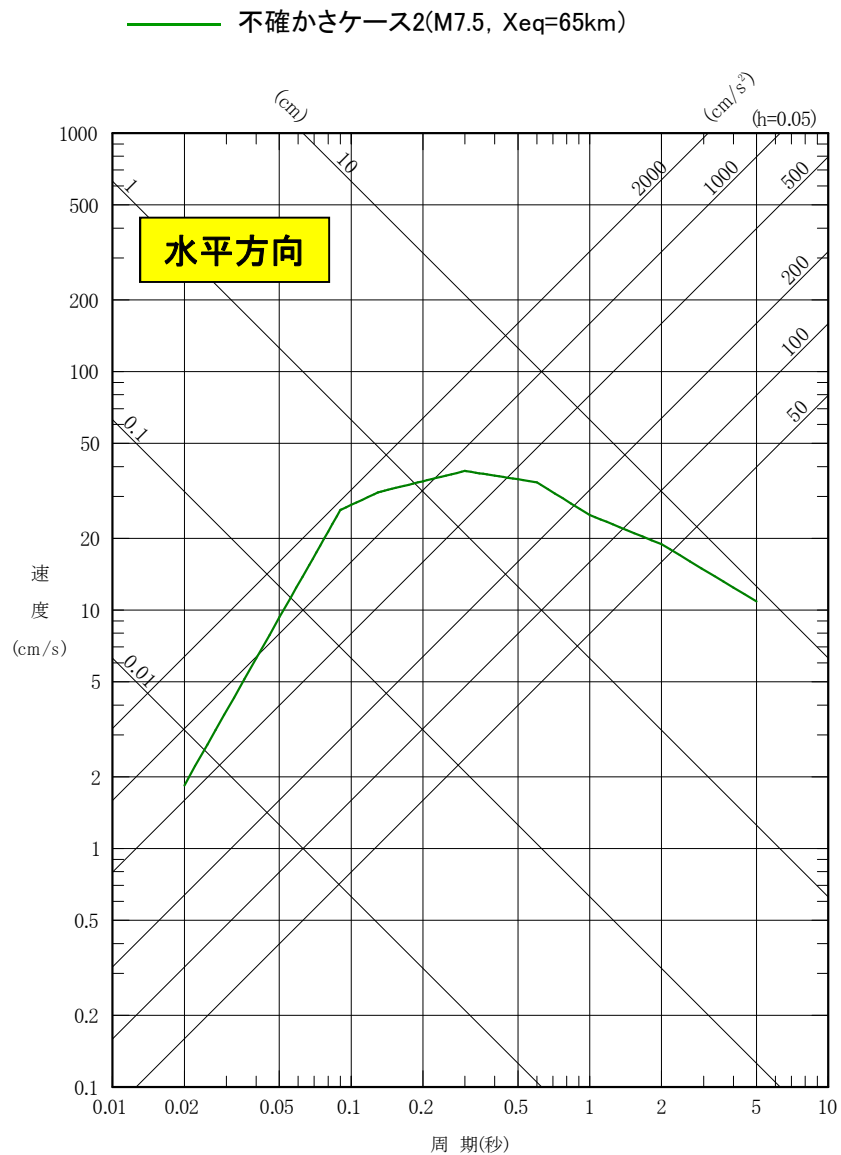
4. 検討用地震の地震動評価 応答スペクトルに基づく地震動評価

■ 応答スペクトルに基づく地震動評価結果 まとめ: SMGAマントル内の各ケース



4. 検討用地震の地震動評価 応答スペクトルに基づく地震動評価

■ 応答スペクトルに基づく地震動評価結果 まとめ: SMGA地殻内のケース

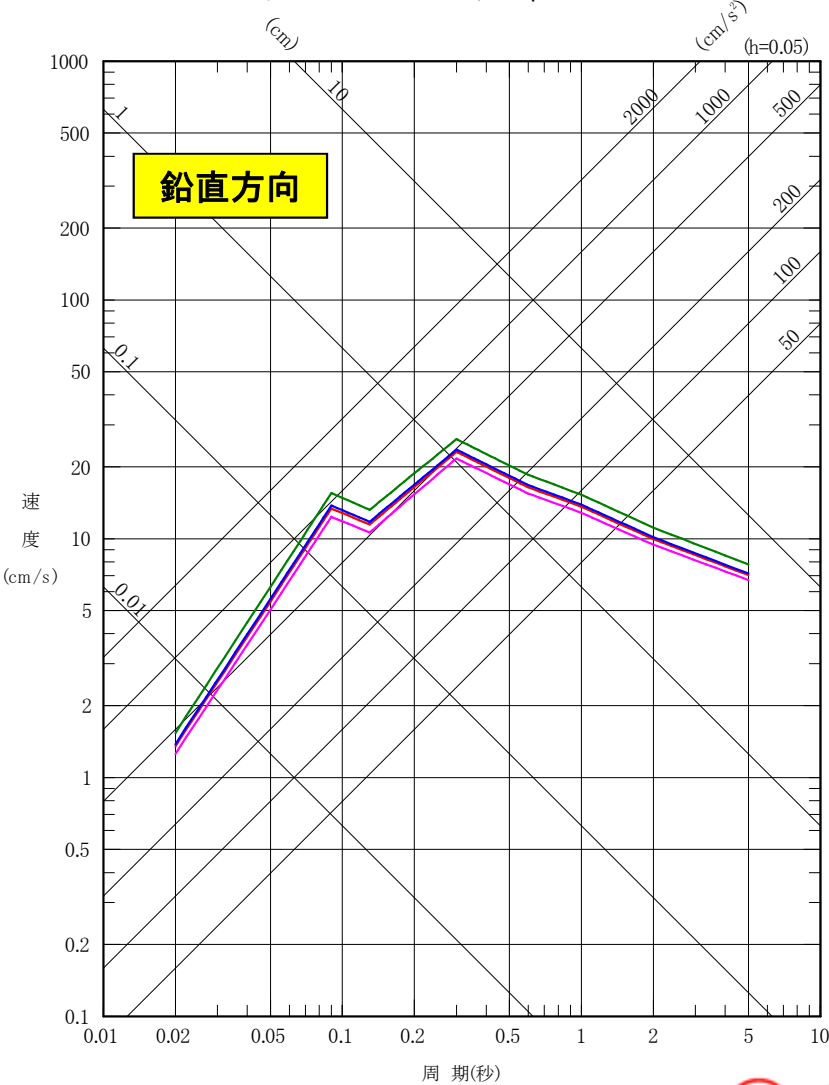
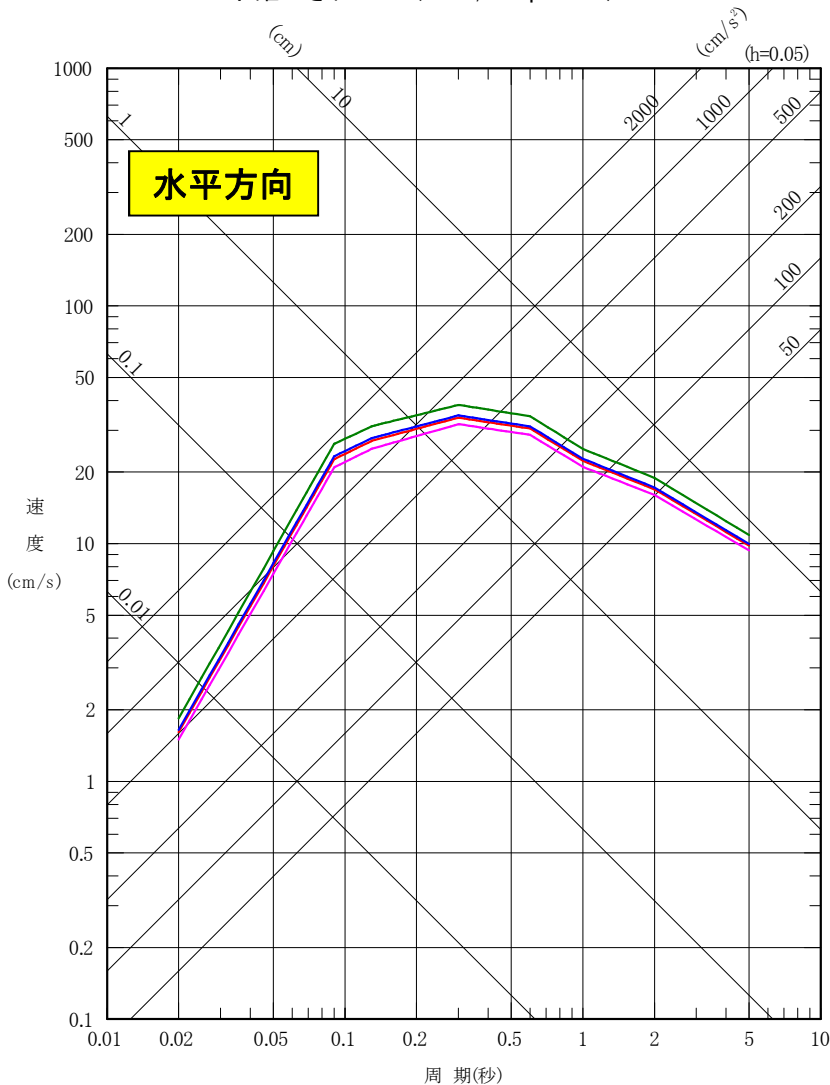


4. 検討用地震の地震動評価 応答スペクトルに基づく地震動評価

■ 応答スペクトルに基づく地震動評価結果 まとめ: 全ケース

- 基本ケース (M7.5, Xeq=72km)
- 不確かさケース1 (M7.5, Xeq=71km)
- 不確かさケース2 (M7.5, Xeq=65km)
- 不確かさケース3 (M7.5, Xeq=75km)

- 基本ケース (M7.5, Xeq=72km)
- 不確かさケース1 (M7.5, Xeq=71km)
- 不確かさケース2 (M7.5, Xeq=65km)
- 不確かさケース3 (M7.5, Xeq=75km)

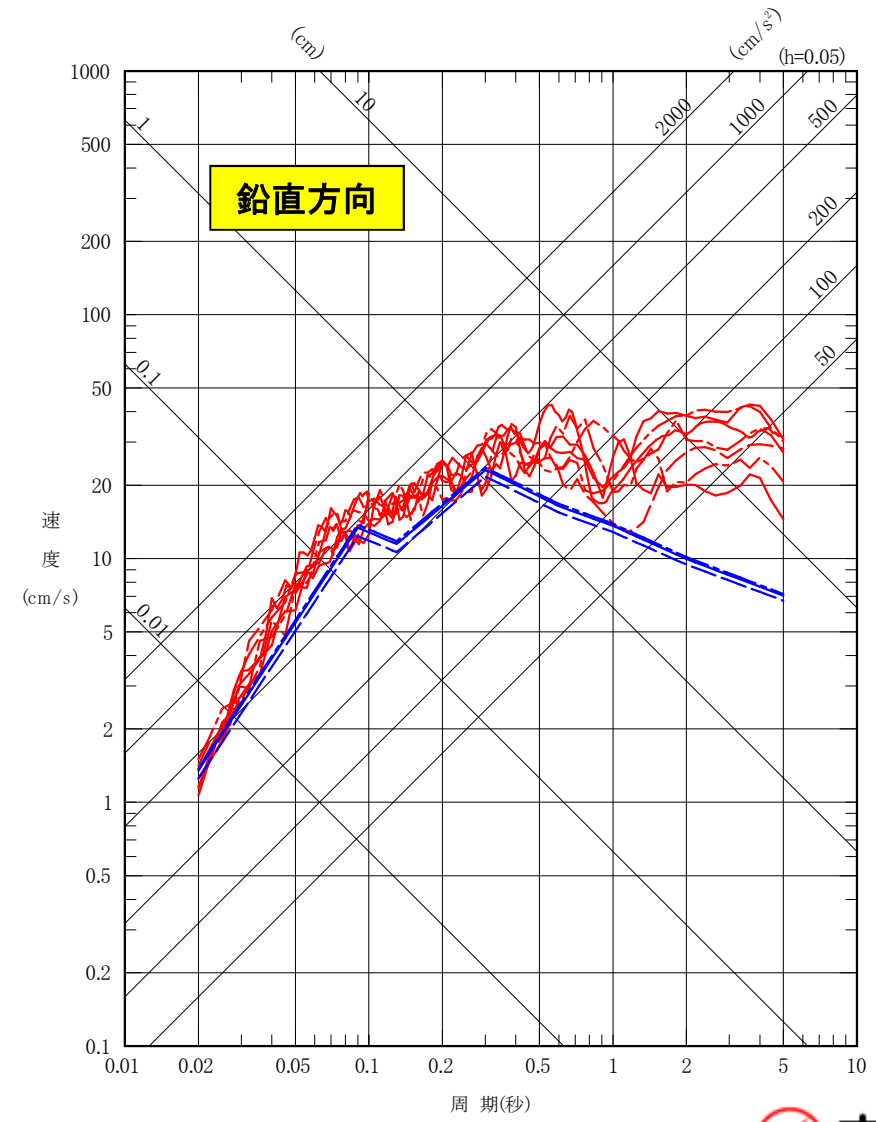
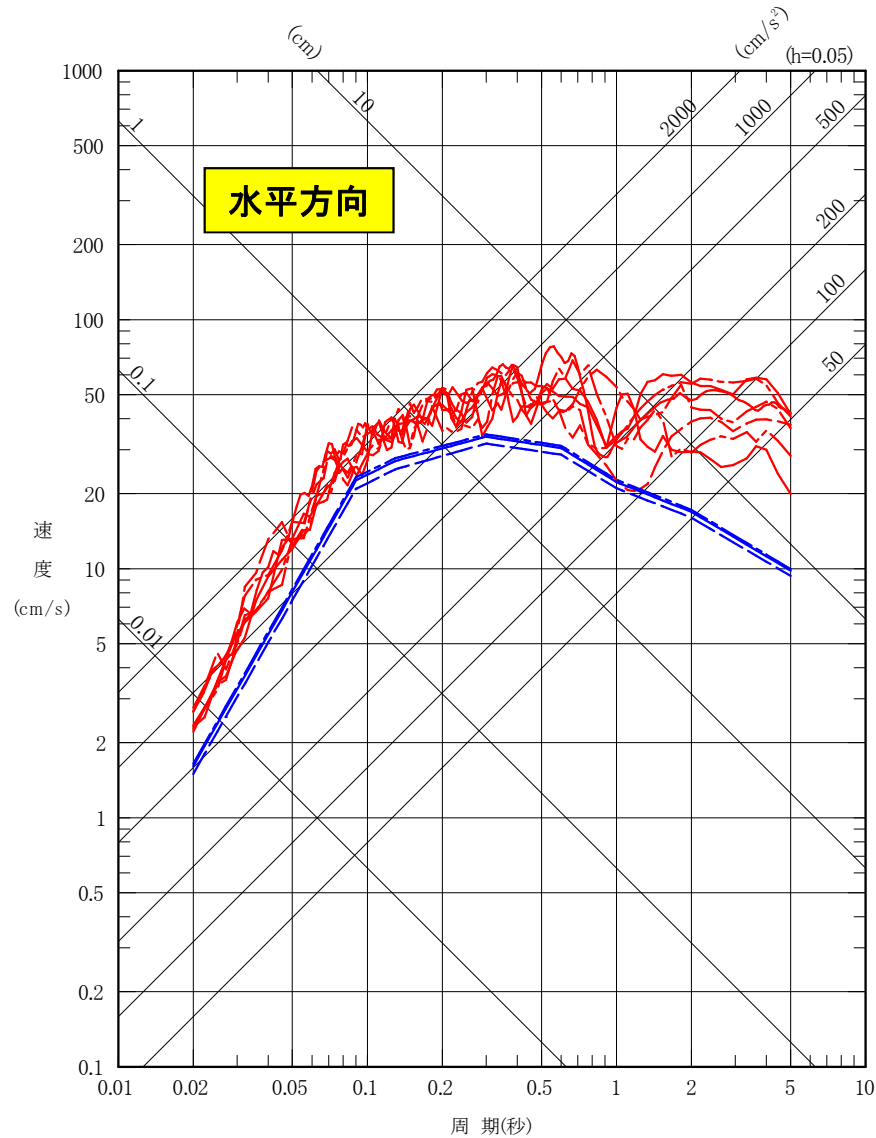


4. 検討用地震の地震動評価

検討用地震の地震動評価 まとめ(SMGAを海洋性マントル内に想定したケース)

■断層モデルを用いた手法による評価と応答スペクトルに基づく評価: SMGAマントル内の各ケース

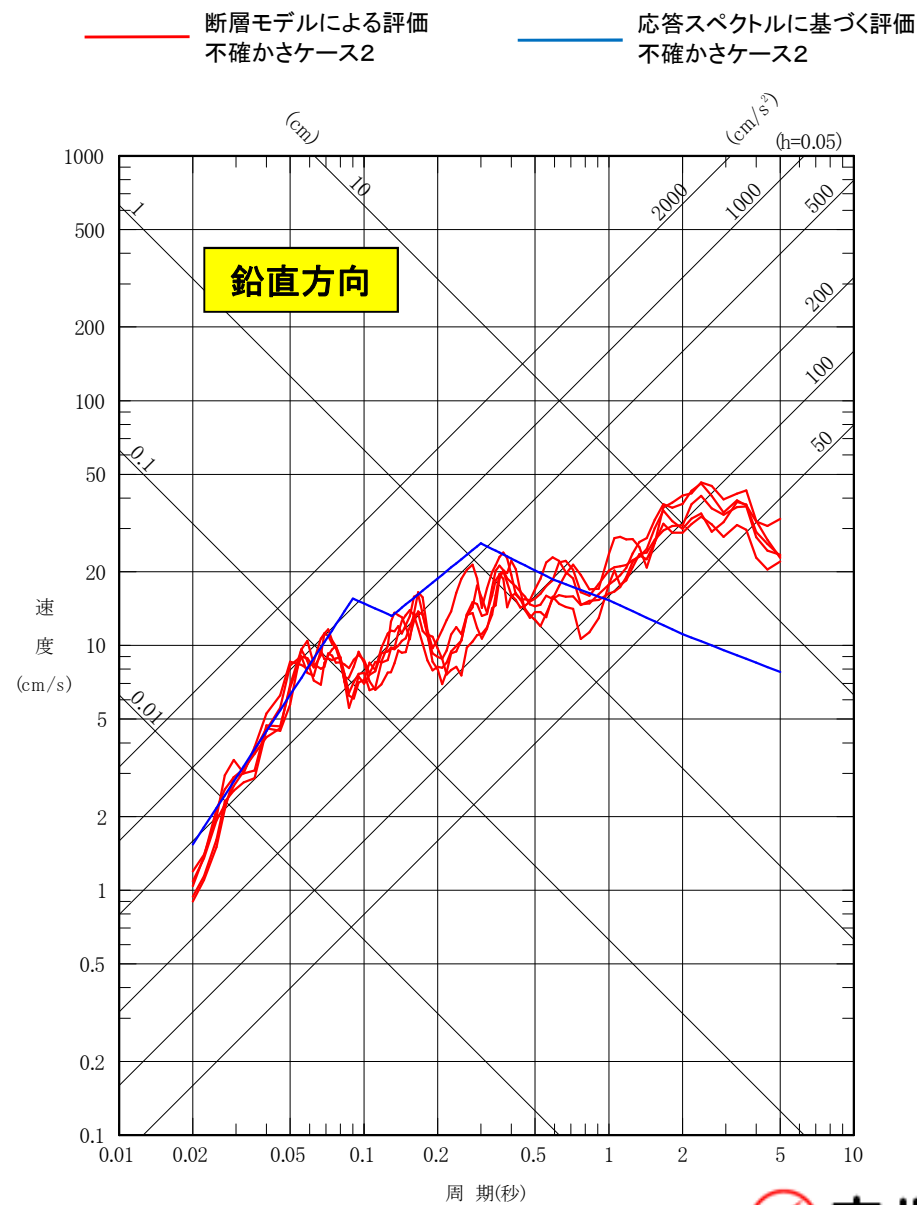
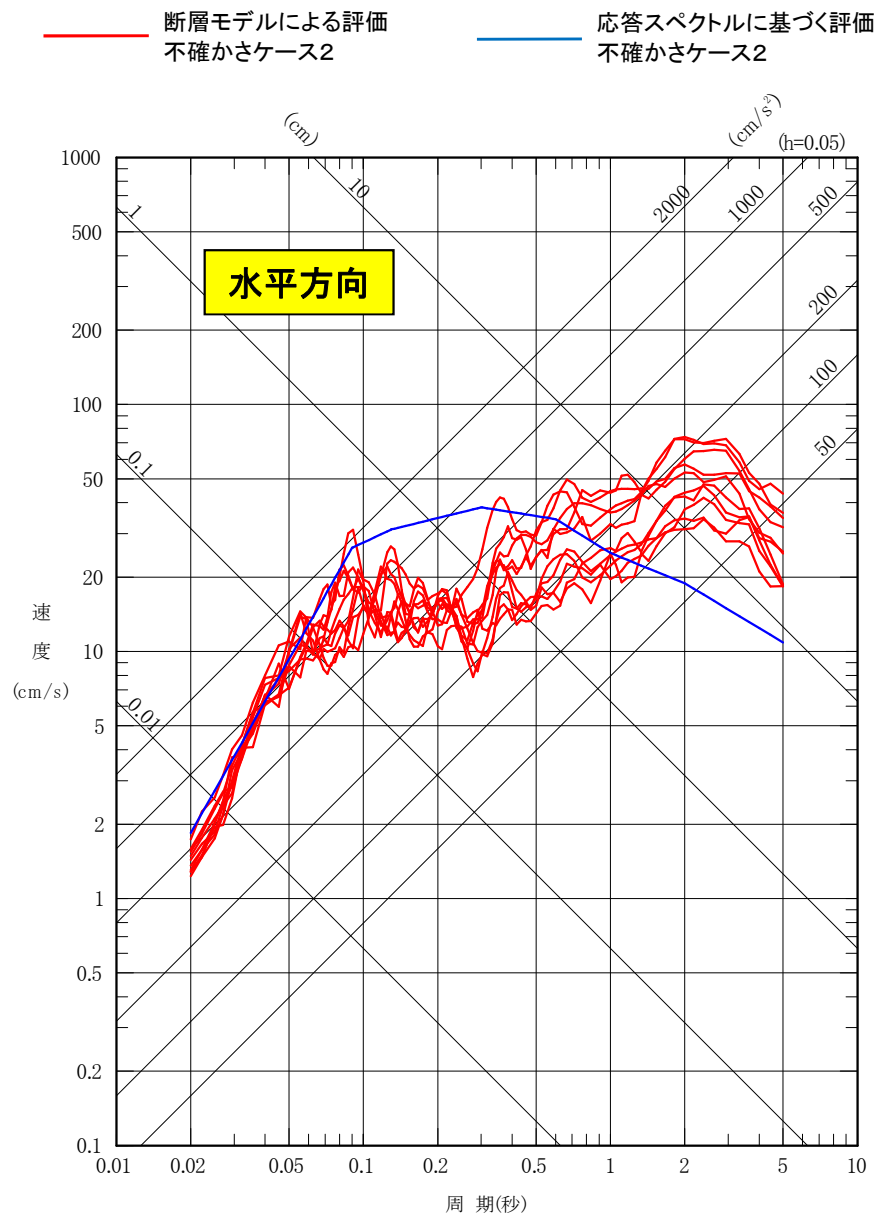
- 断層モデルによる評価(基本) 応答スペクトルに基づく評価(基本)
- 不確かさケース1 不確かさケース1
- 不確かさケース3 不確かさケース3



4. 検討用地震の地震動評価

検討用地震の地震動評価 まとめ(SMGAを海洋地殻内に想定したケース)

■断層モデルを用いた手法による評価と応答スペクトルに基づく評価: SMGA地殻内のケース

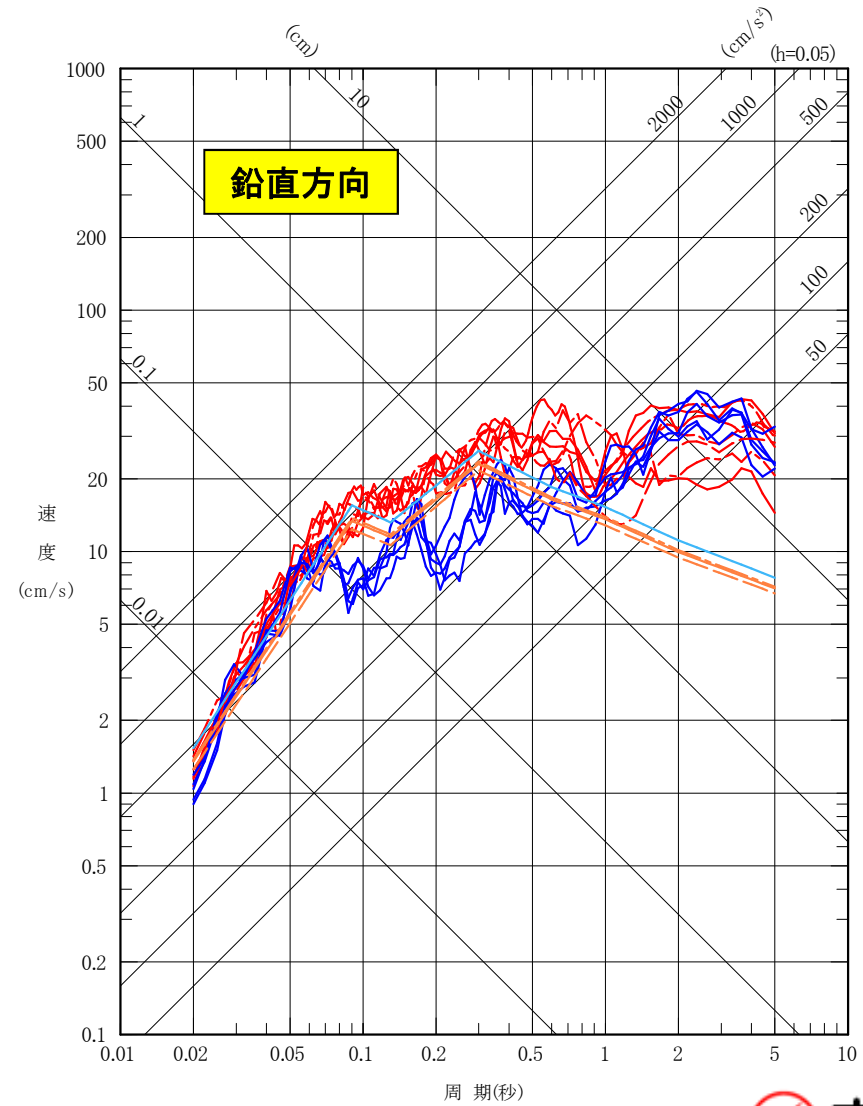
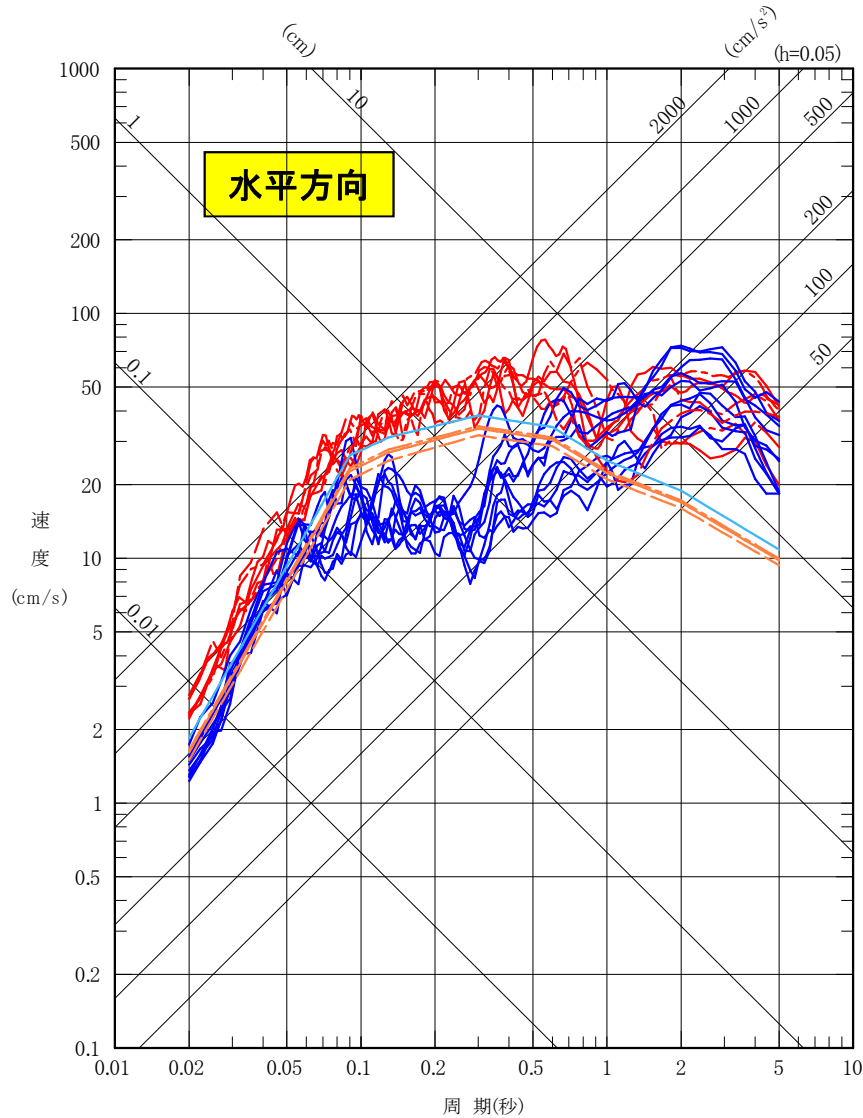


4. 検討用地震の地震動評価

検討用地震の地震動評価 まとめ(全ケース)

■断層モデルを用いた手法による評価と応答スペクトルに基づく評価:全ケース

- | | | | |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| — 断層モデルによる評価(基本) | — 応答スペクトルに基づく評価(基本) | — 断層モデルによる評価(基本) | — 応答スペクトルに基づく評価(基本) |
| - - - 不確かさケース1 | - - - 不確かさケース1 | - - - 不確かさケース1 | - - - 不確かさケース1 |
| — 不確かさケース2 | — 不確かさケース2 | — 不確かさケース2 | — 不確かさケース2 |
| - - - 不確かさケース3 | - - - 不確かさケース3 | - - - 不確かさケース3 | - - - 不確かさケース3 |



参考文献

- 1.地震調査研究推進本部(2012):「長周期地震動予測地図」2012年試作版
- 2.笹谷努, 森川信之, 前田宜浩(2006):スラブ内地震の震源特性, 北海道大学地球物理学研究報告, No.69
- 3.佐藤智美(2013):東北地方のアウトサイズ地震, スラブ内地震, プレート境界地震の短周期レベルと f_{max} 及び距離減衰特性, 日本建築学会構造系論文集, 689, 1227-1236
- 4.地震調査研究推進本部(2013):今後の地震動ハザード評価に関する検討～2013年における検討結果～,
<http://jishin.go.jp/main/chousa/13_yosokuchizu/index.htm>
- 5.防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net, <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>
- 6.原田怜, 釜江克宏(2011):2011年4月7日宮城県沖のスラブ内地震の震源のモデル化, <<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/>>
- 7.入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子(1997):経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, B25
- 8.地震調査研究推進本部(2005):宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)
- 9.Nakajima, J., A. Hasegawa, and S. Kita (2011): Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault in the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku Earthquake, *Geophys.Res. Lett.*, 38, L00G06, doi:10.1029/2011GL048432, 2011.
- 10.Kanamori, H.(1977): The Energy Release in Great Earthquakes, *J. Geophys. Vol. 82*
- 11.東北大学(2011):東北大学大学院理学研究科 第190回 地震予知連絡会, <<http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/project/yoti/y-zisin/ccep/>>
- 12.佐藤智美, 巽誉樹(2002):全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第556号
- 13.浅野公之, 岩田知孝, 入倉孝次郎(2004):2003年5月26日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, 地震 第2輯, 第57巻
- 14.地震ハザードステーション(2014):独立行政法人防災科学技術研究所, 地震ハザードステーション(Japan Seismic Hazard Information Station, 略称:J-SHIS)(オンライン), <<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>>
- 15.Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M.Tohdo and T. Watanabe (2002):RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis. Oct. 16-18, Istanbul.
- 16.気象庁地震カタログ(1923～2016):地震月報ほか

余 白

【補足説明資料】

- 1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い 89
- 2. 物性の違いを反映した断層モデル101
- 3. 不確かさケース2 経験的グリーン関数法の要素地震の特性108
- 4. 不確かさケース2 統計的グリーン関数法による検討112

【補足説明資料】

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

No.	コメント時期	コメント内容
S135	平成28年6月3日 第367回審査会合	不確かさケース2の海洋地殻と海洋性マントルとの剛性率等の違いについて他の知見等も収集、整理し説明性の向上を図ること。

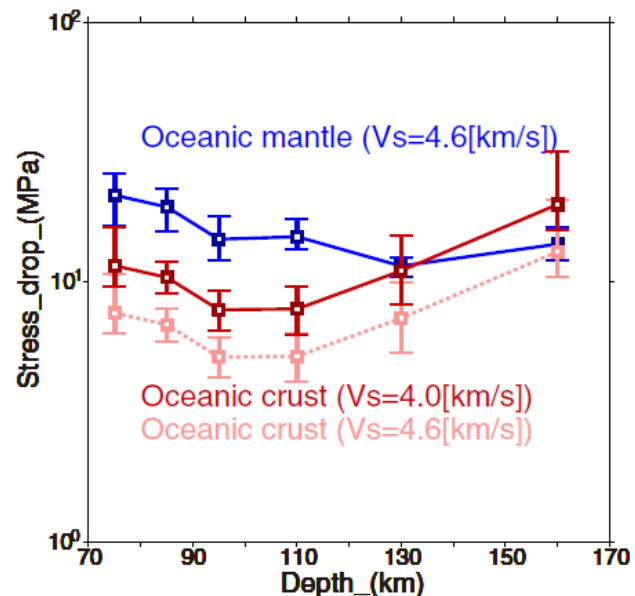
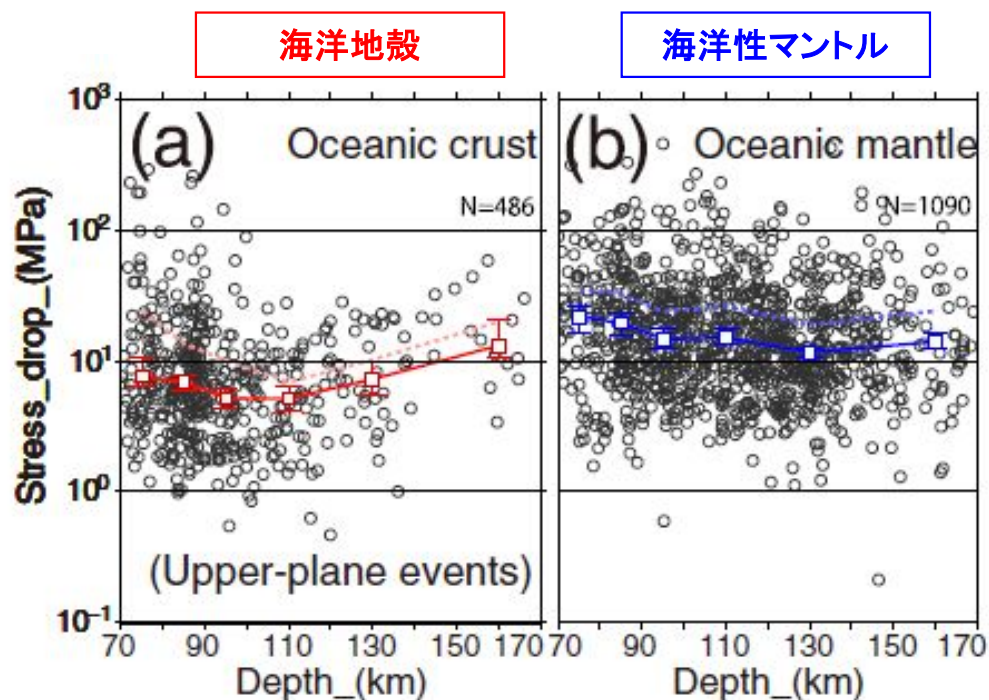
1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

■海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いに起因する応力降下量の違いについて

【Kita and Katsumata(2015)】

・北海道下の海洋プレート内地震を分析すると、海洋地殻で発生する地震の応力降下量は、海洋性マントル内で発生する地震の応力降下量よりも小さい傾向がある。

⇒海洋性マントルの応力降下量は海洋地殻の約1.9倍程度となっている。



海洋地殻、海洋性マントルともS波速度を4.6km/sとした場合、海洋性マントルの応力降下量は、海洋地殻の約2.8倍程度(70~120km)。

海洋地殻のS波速度を4.0km/s、海洋性マントルのS波速度を4.6km/sとした場合、海洋性マントルの応力降下量は海洋地殻の約1.9倍程度(70~120km)。

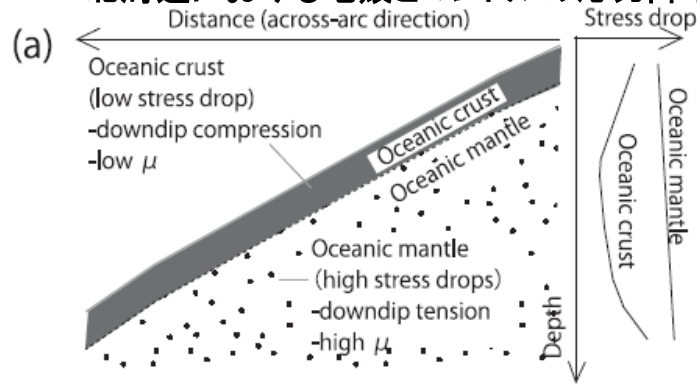
1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

■海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いに起因する応力降下量の違いについて

【Kita and Katsumata(2015)】

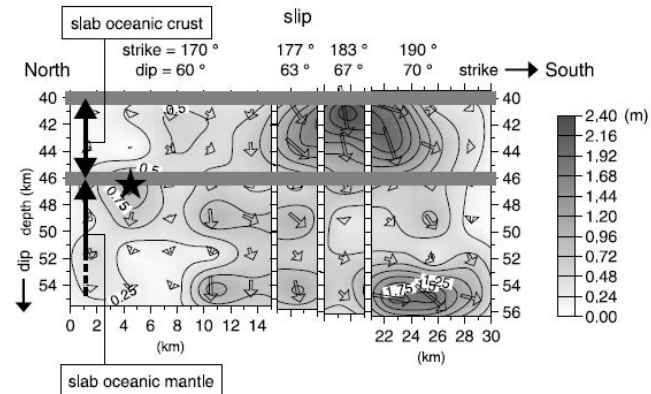
- ・海洋地殻と海洋性マントルの応力降下量の違いは、剛性とD/rの違いで説明できる可能性がある。
- ・応力降下量は、一般的に剛性に比例※すると考えられるので、海洋地殻と海洋性マントルの岩石のタイプによる剛性の差が応力降下量の差の原因の可能性がある。
- ・また、この違いは、2001年芸予地震の震源モデル(Kakehi(2004), Miyatake et al.(2004))等の研究においても報告されている。

⇒北海道における地殻とマントルの応力降下量の違いは、 Kita and Katsumata(2015)では剛性の違いが主要因と考えられている。

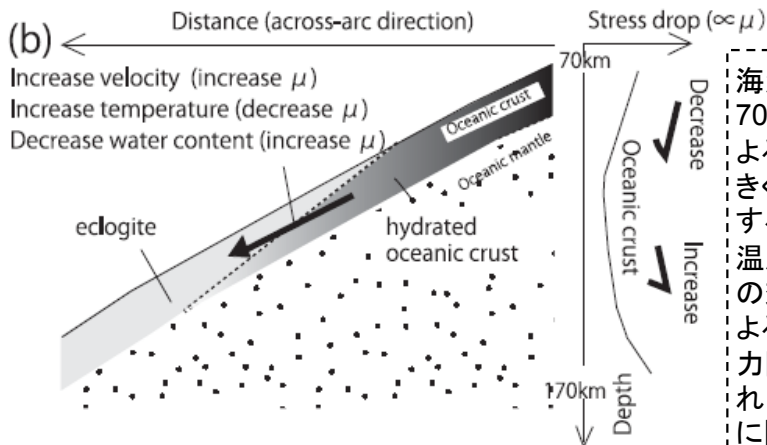


※:
$$\Delta\sigma = \frac{7\pi}{16r} \cdot \mu D$$

$\Delta\sigma$: 応力降下量, r: 等価半径
 μ : 剛性率, D: すべり量

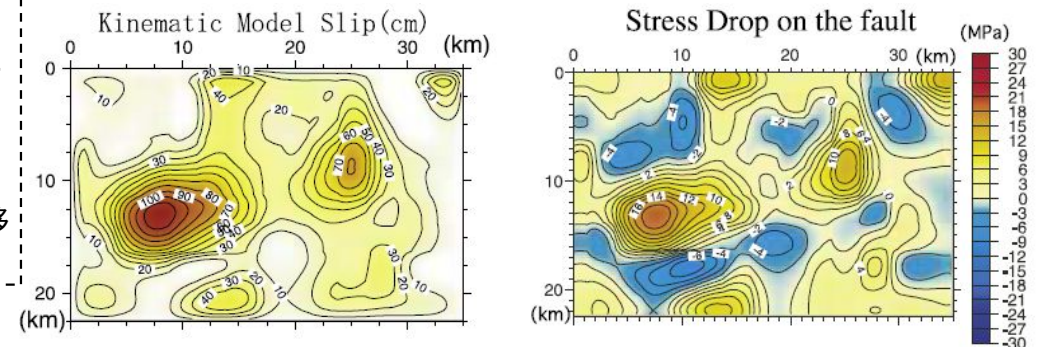


2001年芸予地震のすべり分布(Kakehi(2004))



海洋地殻の応力降下量は、70~100kmでは、温度による剛性低下の効果が大きく、応力降下量が減少する。110~170kmでは、温度上昇による剛性低下の効果より脱水作用等による剛性の増大により応力降下量が増加する。これは海洋地殻での相転移に関連する。

海洋プレート内地震の応力降下量 模式図
(Kita and Katsumata(2015))



2001年芸予地震のすべり分布と応力降下量(Miyatake et al.(2004))

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

【Kita and Katsumata.(2015)による知見】
 ・Christensen(1996)は、封圧1.0GPaにおける岩石の密度及びVsを示しており、上部マントルの剛性率は67~75GPa、地殻(深さ70~120km)の剛性率は45~48GPaとなる。
 ・この知見から、海洋地殻/上部マントルの剛性率の比として、60~71%が導かれる。



【Christensen(1996)及びChristensen and Mooney(1995)による知見】
 ・Christensen(1996)は、Christensen and Mooney(1995)の知見に基づき、封圧1.0GPaにおける岩石の物性について整理している。

封圧下における物性値【Christensen(1996)より抜粋・一部加筆】

Name Specimens (s) Rocks (r)	ρ, kg/m ³	200 MPa		400 MPa		600 MPa		800 MPa		1000 MPa	
		V _p	V _s	V _p	V _s	V _p	V _s	V _p	V _s	V _p	V _s
<div style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">海洋地殻の構成岩石 玄武岩</div> Basalt (BAS) s=252 Average r=145 S.D.	2882	5.914	3.217	5.992	3.246	6.044	3.264	6.084	3.279	6.118	3.291
	139	0.546	0.302	0.544	0.293	0.543	0.291	0.542	0.288	0.542	0.288
<div style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">海洋地殻の構成岩石 角閃岩</div> Amphibolite (AMP) s=78 Average r=26 S.D.	2996	6.866	3.909	6.939	3.941	6.983	3.959	7.018	3.974	7.046	3.987
	85	0.224	0.151	0.199	0.136	0.197	0.133	0.197	0.131	0.197	0.130
<div style="border: 1px solid red; padding: 2px;">マントルの構成岩石 かんらん岩</div> Dunite (DUN) s=36 Average r=12 S.D.	3310	8.299	4.731	8.352	4.759	8.376	4.771	8.390	4.778	8.399	4.783
	14	0.091	0.118	0.083	0.116	0.083	0.116	0.084	0.116	0.085	0.116

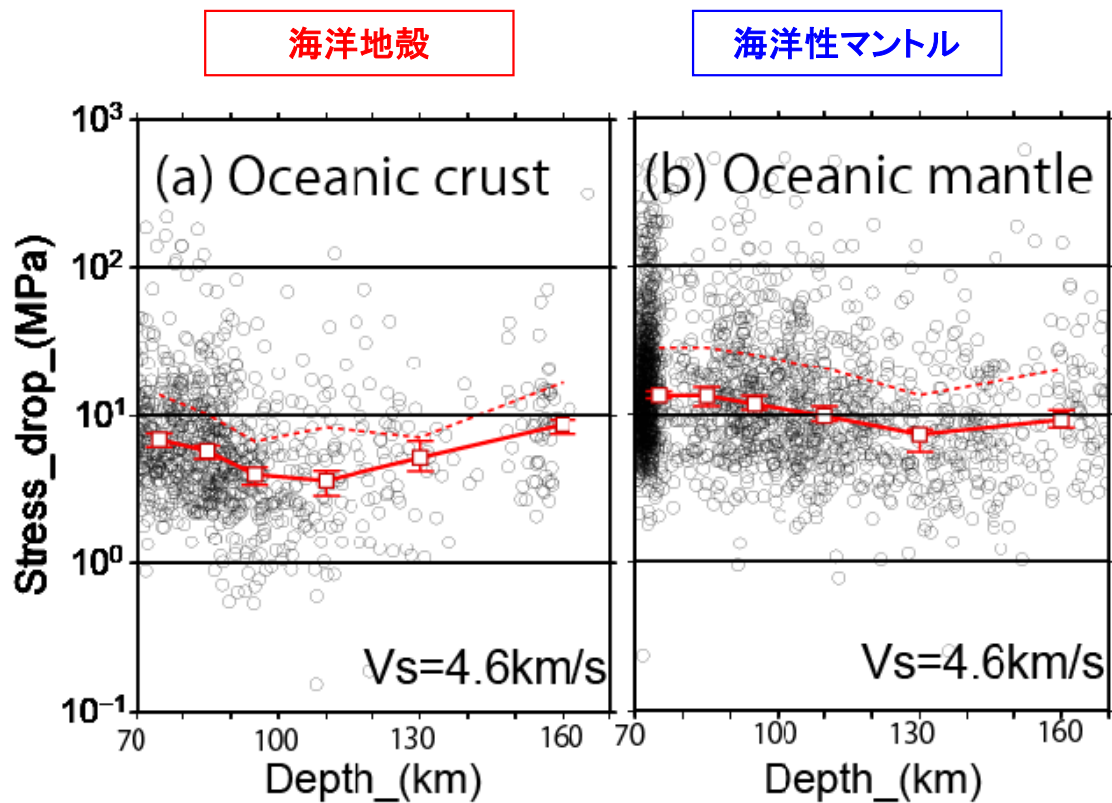
マントルの構成岩石(かんらん岩)は、地殻の構成岩石(玄武岩等)に比べて密度・S波速度・P波速度が大きい。

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

■ 海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いに起因する応力降下量の違いについて

【北(2016): 東北日本下におけるスラブ内地震の応力降下量の深さ変化の特徴】

- ・東北日本下の海洋プレート内地震について分析すると、北海道下と同様に、海洋地殻で発生する地震の応力降下量は、海洋性マントル内で発生する地震の応力降下量よりも小さい傾向がみられた。
- ・東北・北海道では、スラブ内の応力場の違いは、海洋プレート内地震の応力降下量へあまり影響を与えていないと推察される。



東北日本下の海洋プレート内地震の応力降下量（北(2016)）

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

■地震本部(2012)「長周期地震動予測地図」2012年試作版における太平洋プレートの構造モデル

- ・地震本部(2012)の評価に用いている地下構造モデルにおいて、北海道地方から東北地方にかけての太平洋プレートは同じ構造(S波速度, 密度等)のモデルが用いられている。
- ・この地下構造モデルの海洋地殻と海洋性マントルの物性の違い($\mu = \rho \beta^2$, ρ :密度, β :S波速度)から算定される応力降下量の比は約2.10倍である。これは, Kita and Katsumata(2015)における海洋地殻と海洋性マントルの応力降下量の関係(海洋性マントル/海洋地殻=約1.9倍程度)と対応している。

全国1次地下構造モデル(暫定版)の物性値(地震本部(2012))

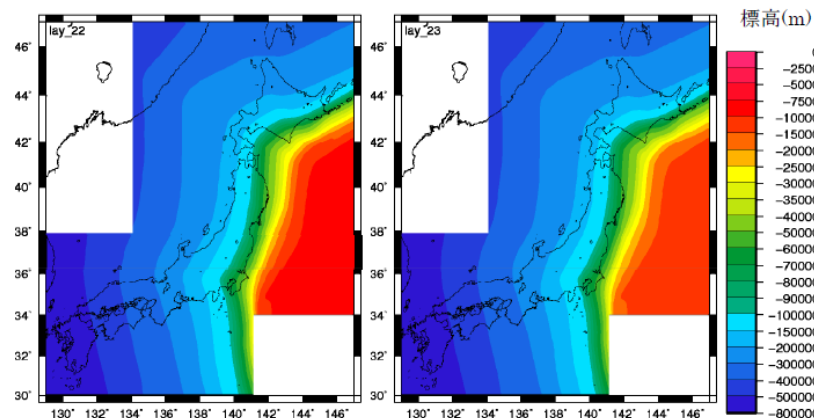
Layer	Vp(km/s)	Vs(km/s)	ρ (g/cm ³)	Qp	Qs	
1	1.7	0.35	1.80	119	70	
2	1.8	0.5	1.95	170	100	
3	2.0	0.6	2.00	204	120	
4	2.1	0.7	2.05	238	140	
5	2.2	0.8	2.07	272	160	
6	2.3	0.9	2.10	306	180	
7	2.4	1.0	2.15	340	200	付加体を含む
8	2.7	1.3	2.20	442	260	
9	3.0	1.5	2.25	510	300	
10	3.2	1.7	2.30	578	340	
11	3.5	2.0	2.35	680	400	
12	4.2	2.4	2.45	680	400	
13	5.0	2.9	2.60	680	400	地震基盤(近畿圏)
14	5.5	3.2	2.65	680	400	地震基盤(上部地殻第1層)
15	5.8	3.4	2.70	680	400	上部地殻第2層
16	6.4	3.8	2.80	680	400	下部地殻
17	7.5	4.5	3.20	850	500	マントル
18	5.0	2.9	2.40	340	200	海洋性地殻第2層(フィリピン海プレート)
19	6.8	4.0	2.90	510	300	海洋性地殻第3層(フィリピン海プレート)
20	8.0	4.7	3.20	850	500	海洋性マントル(フィリピン海プレート)
21	5.4	2.8	2.60	340	200	海洋性地殻第2層(太平洋プレート)
22	6.5	3.5	2.80	510	300	海洋性地殻第3層(太平洋プレート)
23	8.1	4.6	3.40	850	500	海洋性マントル(太平洋プレート)

- 地震本部などによる地下構造モデル
- Ludwig et al. (1970)
- 長周期地震動予測地図2009年試作版(宮城県沖地震)
- Yamada and Iwata (2005)
- H17年度大大特広域モデル(田中・他, 2006)
- Qs=1000*Vs/5 Qp=1.7*Qs Qsが400を超える場合は400とする(Kawabe and Kamae, 2008 を参考)

海洋地殻と海洋性マントルの剛性率の比(応力降下量*の比)

	S波速度 β (km/s)	密度 ρ (g/cm ³)	剛性率 $\mu = \rho \beta^2$ (N/m ²)	剛性率の比 マントル/地殻 (地殻/マントル)
海洋地殻 (第22層)	3.5	2.8	3.4E+10	2.10 (0.47)
海洋性マントル (第23層)	4.6	3.4	7.2E+10	

※ $\Delta\sigma = \frac{7\pi}{16r} \cdot \mu D$ $\Delta\sigma$: 応力降下量, r: 等価半径
 μ : 剛性率, D: すべり量



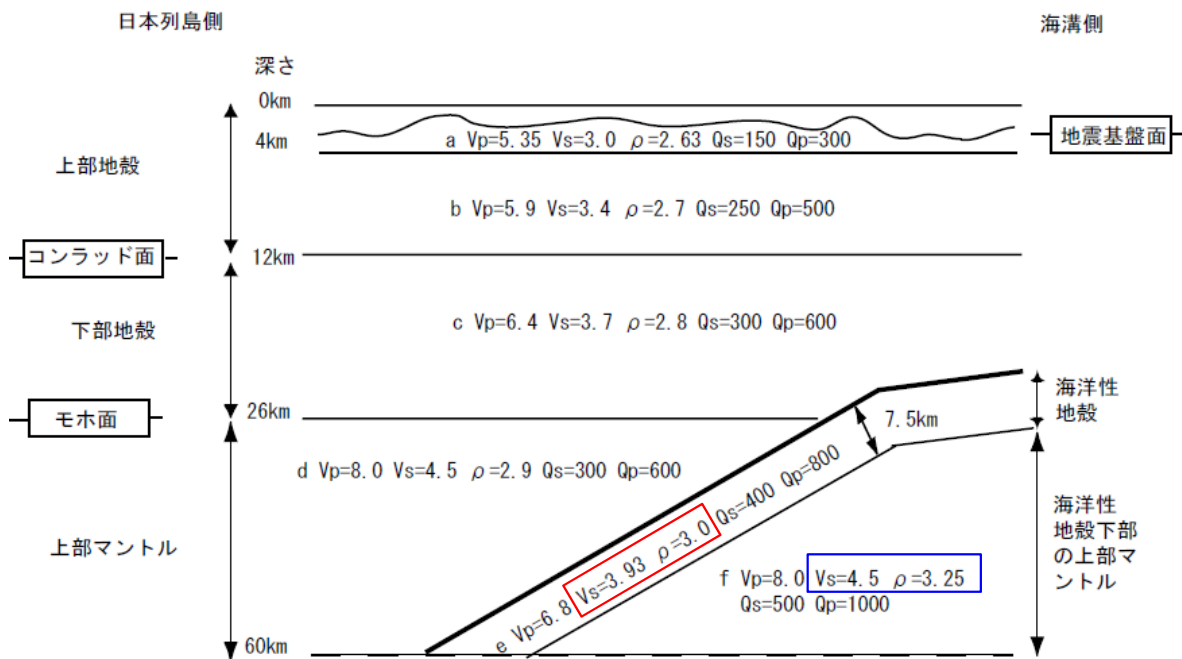
第22層 海洋地殻 (Vs(β)=3.5km/s)
 第23層 海洋性マントル (Vs(β)=4.6km/s)
 太平洋プレート構造モデル(地震本部(2012))

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

■海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いに起因する応力降下量の違いについて

- ・応力降下量と剛性率は比例関係にある※。
- ・一方、地震本部(2005)では、宮城県沖地震を想定した強震動予測に用いるため、東北地方の上部マントルから地震基盤までの大構造を設定しているが、海洋地殻と海洋性マントルの物性の違い($\mu = \rho \beta^2$, ρ :密度, β :S波速度)から算定される応力降下量の比は、約1.42倍となる。

海溝軸に直交断面



※
$$\Delta\sigma = \frac{7\pi}{16r} \cdot \mu D$$

$$\Delta\sigma : \text{応力降下量}, r : \text{等価半径}$$

$$\mu : \text{剛性率}, D : \text{すべり量}$$

海洋地殻と海洋性マントルの剛性率の比(応力降下量の比)

	S波速度 β (km/s)	密度 ρ (g/cm ³)	剛性率 $\mu = \rho \beta^2$ (N/m ²)	剛性率の比 マントル/地殻 (地殻/マントル)
海洋地殻	3.93	3.0	4.6E+10	1.42 (0.70)
海洋性マントル	4.5	3.25	6.6E+10	

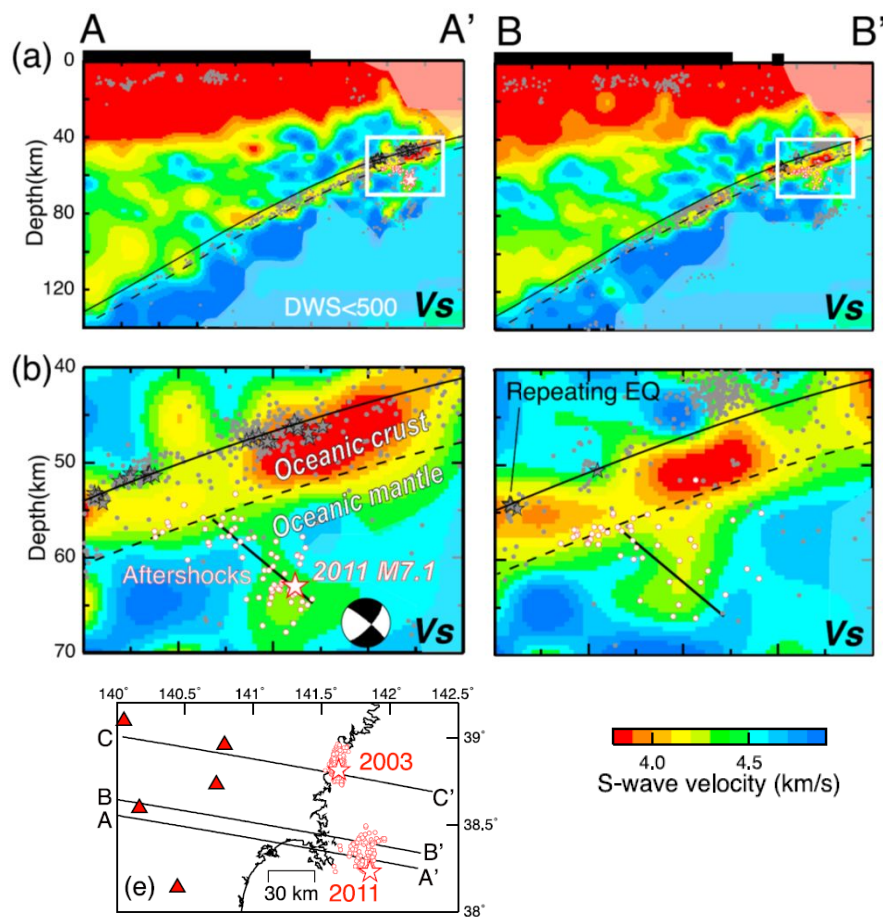
理論的評価法を用いる場合の伝播経路のモデル (VsとVpの単位はkm/s、 ρ の単位はg/cm³)

上部マントルから地震基盤までの大構造(地震本部(2005))

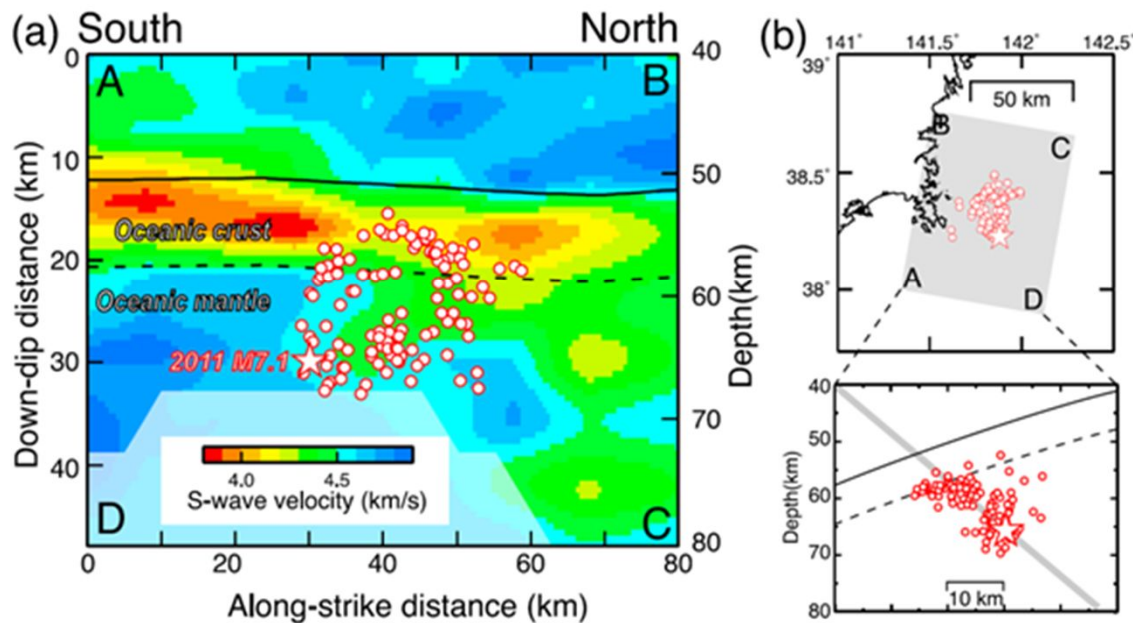
1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

■海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いに起因する応力降下量の違いについて

・4.7地震が発生した付近の海洋性マントルと海洋地殻のS波速度構造(Nakajima et al.(2011)による地震波トモグラフィ結果)は、地震本部(2005)の大構造と同様の傾向を示している。従って、「物性の違い」に起因する地殻とマントルの応力降下量の違いとしては、当該地域においても1.4倍程度の違いがあると考えられる。他の速度構造モデル等(次頁以降)でも同様の傾向にある。



東西断面



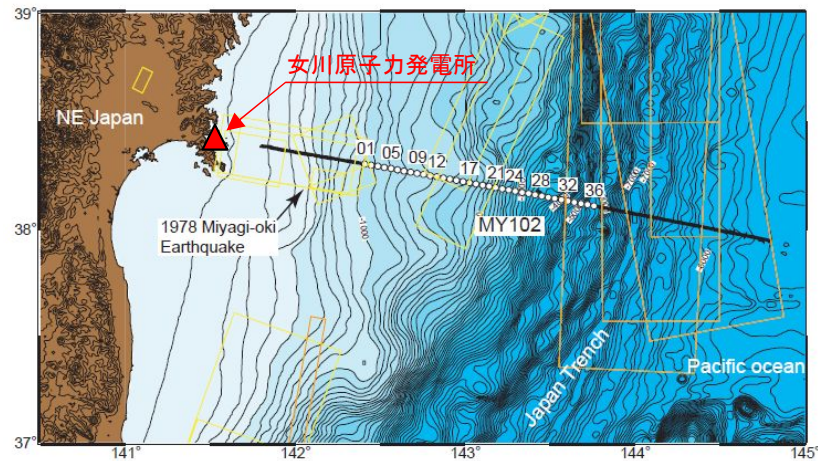
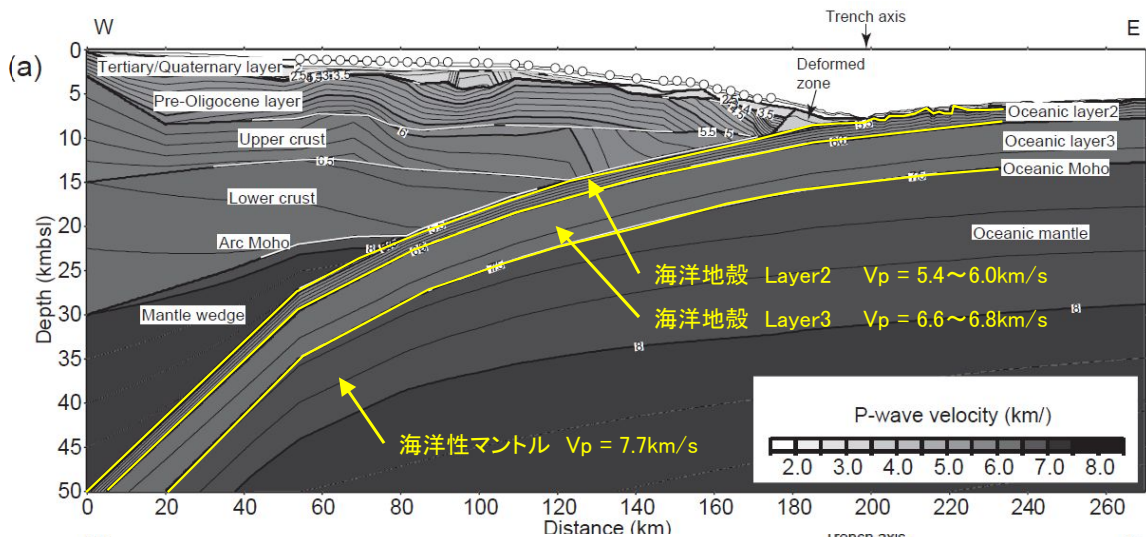
南北断面

4.7地震の震源域周辺の地震波トモグラフィによるS波速度構造(Nakajima et al.(2011))

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

【三浦ほか(2001)及びMiura et al.(2005)】

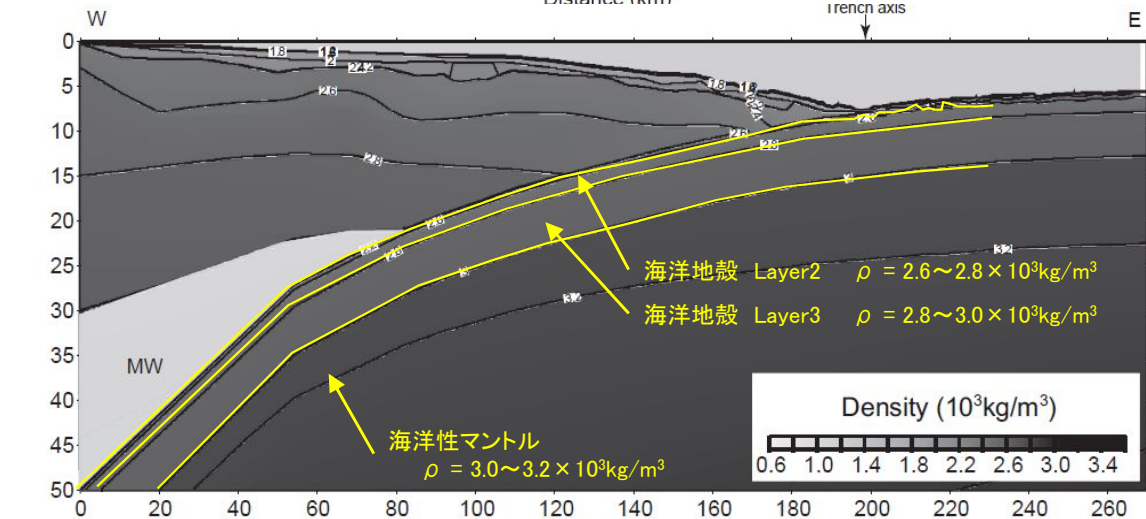
- ・宮城県沖から日本海溝に至る測線(MY102)において、エアガンを用いた深部構造探査を実施した。
- ・太平洋プレートの海洋地殻※は2層(oceanic layer2及び3)で構成され、それぞれのP波速度は、5.4~6.0km/s及び6.6~6.8km/s、それぞれの密度は $2.6\sim 2.8 \times 10^3\text{kg/m}^3$ 及び $2.8\sim 3.0 \times 10^3\text{kg/m}^3$ である。
- ・太平洋プレートの海洋性マントルのVpは、7.7km/s、密度は $3.0\sim 3.2 \times 10^3\text{kg/m}^3$ である。



探査測線(三浦ほか(2001)に一部加筆)

○地震本部(2005)の深部構造モデルは、三浦ほか(2001)を参考に設定している。

(参考)
 海洋地殻の層構成は、上部から順番に以下の3層からなる。
 第1層: 堆積物層, 第2層: 玄武岩層, 第2層: ハンレイ岩層。
 なお, Miura et al.(2005)では, 速度構造モデルに第1層(堆積物層)は含めていない。

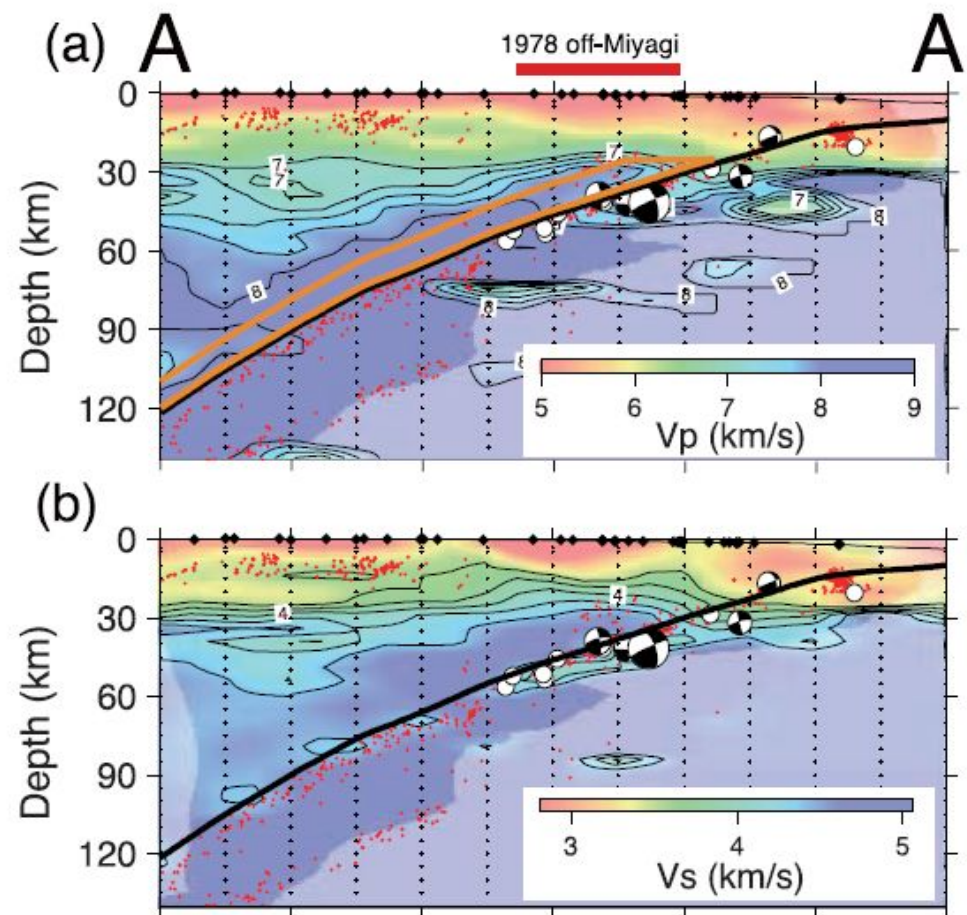
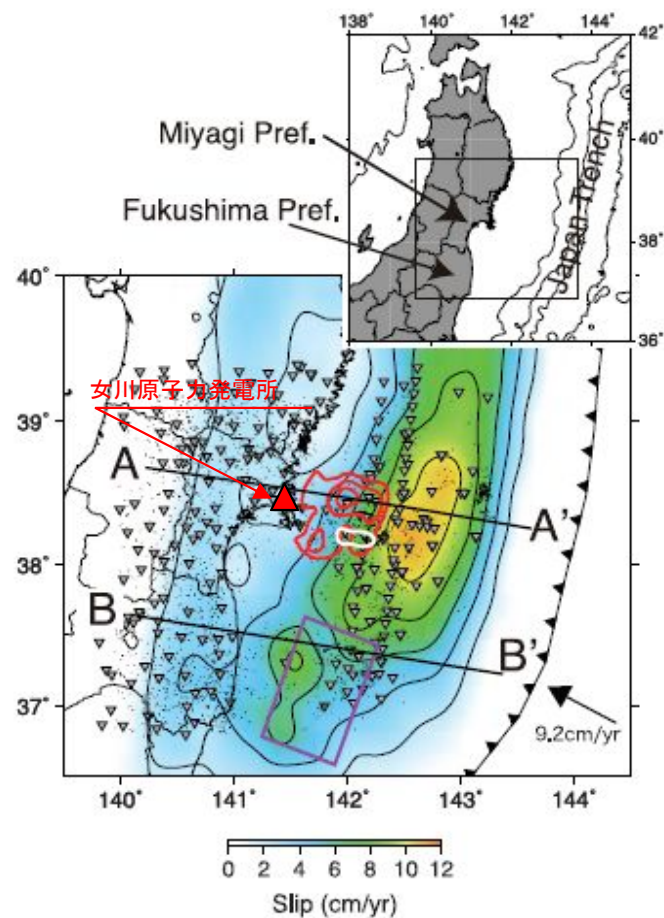


P波速度及び密度の分布 (Miura et al.(2005)に一部加筆)

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

【Yamamoto et al.(2008)】

- ・宮城県沖及び福島県沖について、地震波トモグラフィーにより3次元速度構造を求めた。
- ・2004年～2005で宮城県沖及び福島県沖で発生した、海洋プレート内地震を含む3293地震を用いた。



宮城県沖のVp及びVs構造(Yamamoto et al.(2008))

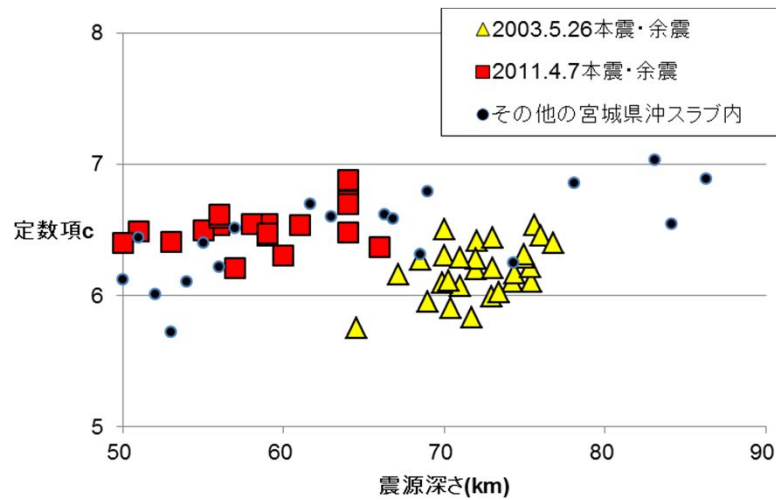
検討対象地域
(Yamamoto et al.(2008)に一部加筆)

- 海洋地殻及び海洋性マントルの速度構造の違いが読み取れる。
- 海洋地殻のS波速度は4km/s程度，海洋性マントルは4.5km/s程度とされている。

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

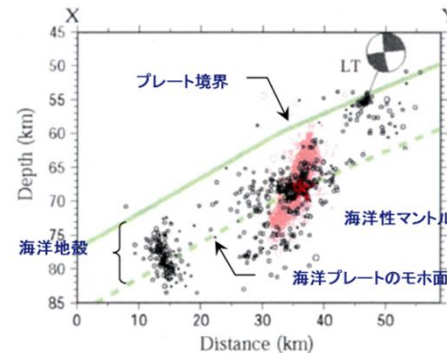
■ 海洋プレート内地震の応力降下量(短周期レベル)の深さ依存性 震度インバージョン

- ・2003年の地震の余震の発生位置について、プレート上面からの距離で整理したところ、最もc値※が小さい地震は、明らかに海洋地殻内で発生している地震と解釈できる。この地震と他の地震(海洋性マントル内の地震とみなす)の平均から短周期レベル相当の比を求めると約1.6倍程度の違いがある。
- ・また、海洋地殻内で発生した地震を除き、再度、c値の深さ依存性について検討を行った所、弱いながらもc値の深さ依存性が確認できる。
⇒このことから、海洋性マントルの応力降下量(笹谷ほか(2006)の1.5倍)に対し、海洋地殻の応力降下量を笹谷ほか(2006)の1.2倍に設定することは保守的評価である。

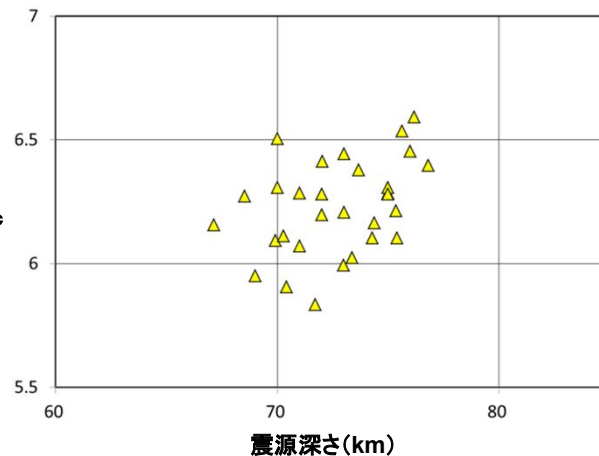
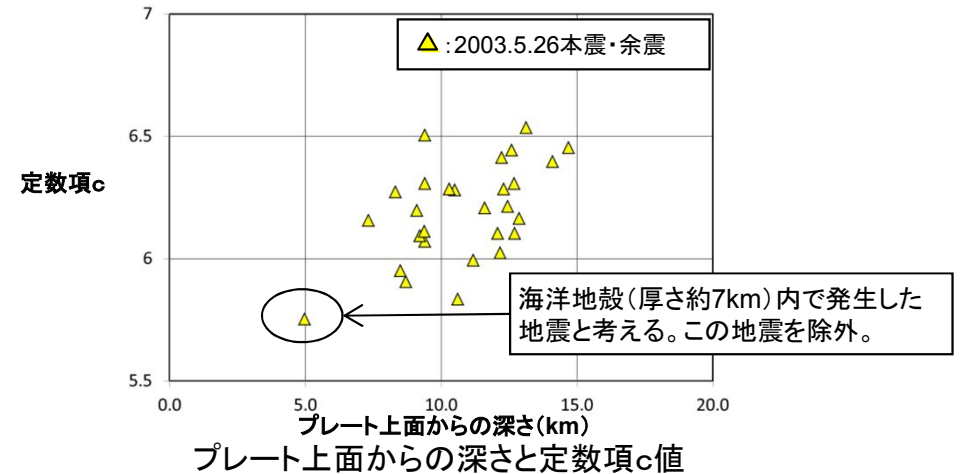


震源深さと定数項c値
(神田ほか(2013))

※ $I = -a \log X + b M_j + c + I_r$
震度 震源距離 マグニチュード 相対震度
C: 震源距離やマグニチュードの影響を除いた残差
= 短周期地震動の励起の大小を示す(短周期レベルに相当)



2003年宮城県沖の地震の余震分布
(迫田ほか(2004))



震源深さと定数項c値
(神田ほか(2013))に3地震のデータを追加, 計30地震)

1. 海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違い

■海洋地殻と海洋性マントルとの物性の違いの考慮

○海洋地殻の地震と海洋性マントルの地震の応力降下量(短周期レベル)

【地震記録等による検討】

・Kita and Katsumata(2015)での応力降下量(短周期レベル)

海洋地殻:海洋性マントル=約**0.53:1**(1:1.9)

(Christensen(1996)の岩石試験を基にした 応力降下量(短周期レベル)

海洋地殻:海洋性マントル=約**0.60 :1**(1:1.7)

【地盤構造モデルに基づく検討】

・地震本部(2012)速度構造での応力降下量(短周期レベル)

海洋地殻:海洋性マントル=約**0.47:1**(1:2.10)

・地震本部(2005)速度構造での応力降下量(短周期レベル)

海洋地殻:海洋性マントル=約**0.70:1**(1:1.42)

海洋性マントルの応力降下量に対し海洋地殻の応力降下量(短周期レベル)は**0.47倍**~**0.70倍**程度の値と評価される。

北海道下の太平洋プレートでは、海洋性マントルの応力降下量は海洋地殻より大きく、東北日本下の太平洋プレートでも同様の傾向がある(Kita and Katsumata(2015), 北(2016))。

SMGAを海洋性マントル内に設定した場合は、4.7地震の知見から笹谷ほか(2006)の短周期レベルの1.5倍を考慮している。従って、SMGAを海洋地殻内の場合は、4.7地震の**0.47倍**~**0.70倍**(笹谷ほか(2006)の短周期レベルの約**0.7**($=1.5 \times 0.47$) ~ **1.05倍**($=1.5 \times 0.70$))程度と考えられる。

不確かさケース2(SMGA地殻内集約)の応力降下量(短周期レベル)としては、海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いを考慮し、保守的に**4.7地震の0.8倍**(笹谷ほか(2006)の短周期レベルの**1.2倍**)を考慮する。

【補足説明資料】

2. 物性の違いを反映した断層モデル

No.	コメント時期	コメント内容
S136	平成28年6月3日 第367回審査会合	海洋地殻と海洋性マントルで剛性率等の違いを断層モデルに反映した場合の断層モデルに与える影響について説明すること。

2. 物性の違いを反映した断層モデル

■ 海洋地殻と海洋性マントルの違いの断層モデルへの反映について

【断層モデルの設定の考え方】

海洋プレート内地震の断層モデルの設定にあたっては、同規模のプレート間地震に比べ短周期レベルが大きいという特徴を適切に評価できるように、短周期レベル(応力降下量)を主眼とした断層モデルの設定を行っている。

【基本ケースの断層モデル】

- ・4.7地震の敷地の観測記録と整合を確認したシミュレーションモデルを基に各断層パラメータを設定している。
- ・シミュレーションモデルの短周期レベルは、笹谷ほか(2006)による短周期レベルの1.5倍とし、剛性率($\mu = \rho \cdot \beta^2$, ρ :密度, β :S波速度)は、佐藤・巽(2002)による値*を用いている。



シミュレーションにより剛性率(β , ρ)を含むパラメータの適用性を確認

※佐藤・巽(2002)において東日本の海洋プレート内地震を含む、海洋性地震のスペクトルインバージョンに用いられた値である。

【不確かさケース2(SMGA地殻内)の断層モデル】

- ・地殻内の破壊を主とした地震のシミュレーション解析の研究実績がないことから、断層モデルは笹谷ほか(2006)を参考に設定。
- ・笹谷ほか(2006)を参考にした断層モデルの設定では、地震モーメント M_0 から短周期レベルとSMGA面積を求めることになる。

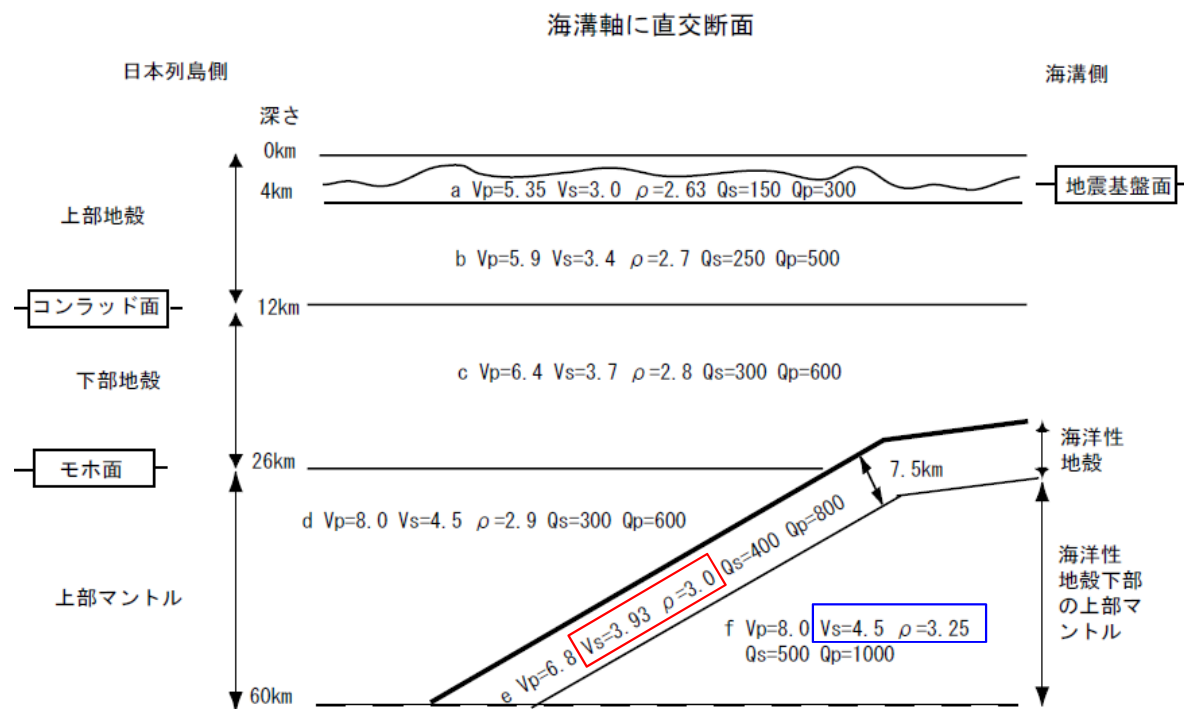


仮に、剛性率(β , ρ)の違いを断層モデルに反映しても、断層面全体の面積に影響するが、地震動評価に与える影響は小さいと考えられる。

2. 物性の違いを反映した断層モデル

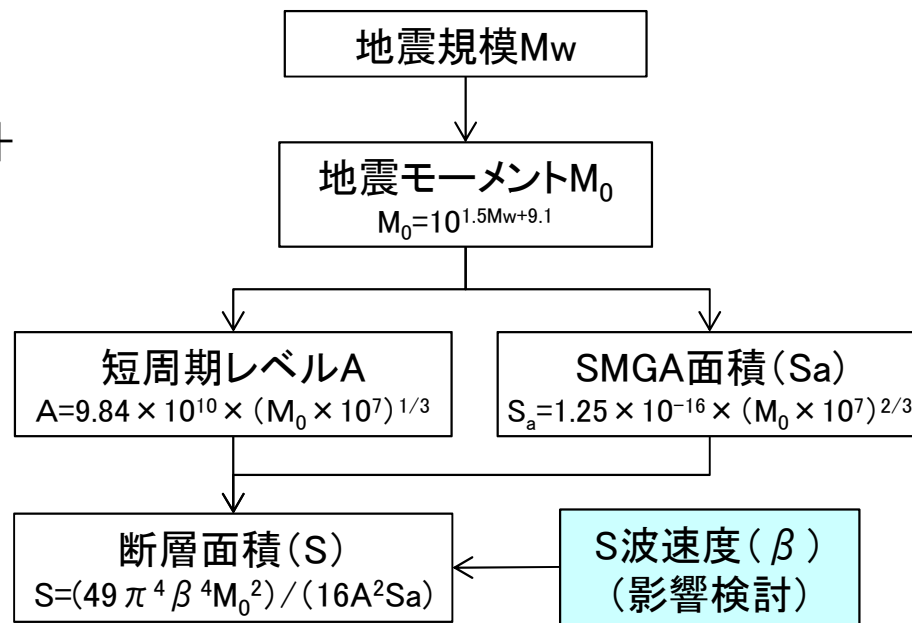
■海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いを反映した断層モデルによる影響検討

- ・S波速度 ($\beta : V_s$), 密度が断層モデルの設定に与える影響について, 笹谷ほか(2006)による海洋プレート内地震の断層モデル設定の考え方をもとに, 現モデルの $\beta = 4.0\text{km/s}$, 密度 $= 3.0\text{g/cm}^3$ を用いた場合と地震本部(2005)の海洋地殻のS波速度 (β) と密度を用いた断層モデルの設定を行い地震動評価に与える影響の確認を行う。



理論的評価法を用いる場合の伝播経路のモデル (V_s と V_p の単位は km/s 、 ρ の単位は g/cm^3)

上部マントルから地震基盤までの大構造(地震本部(2005))



断層モデル設定の流れ

注: 想定する地震規模が同じであれば, β が小さくなれば断層面積も小さくなる関係にある。

2. 物性の違いを反映した断層モデル

■不確かさケース2と同規模(M7.5(Mw7.4))を想定し、S波速度(β)を変化させた場合の主な断層パラメータの比較を行った。

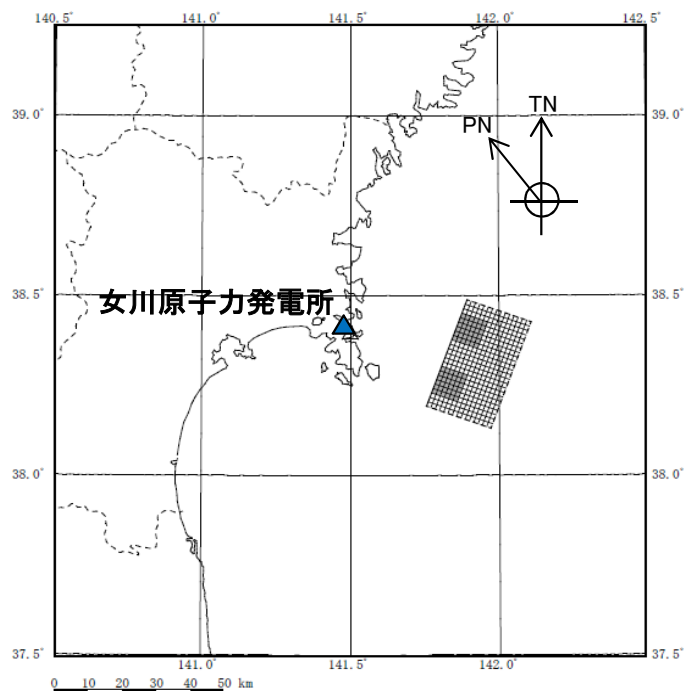
断層パラメータ		設定方法	現モデル 設定値	地震本部 (2005) 海洋地殻	備考	
S波速度	β (km/s)	検討対象	4.0	3.93		
密度	ρ (g/cm ³)	検討対象	3.0	3.0		
剛性率	μ (N/m ²)	$\mu = \rho \beta^2$	4.80E+10	4.63E+10		
地震モーメント	M_0 (Nm)	$M_0 = 10^{1.5M_w + 9.1}$	1.58E+20	1.58E+20	β を変更しても影響しない。	
短周期レベル	A (Nm/s ²)	$A = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \times 1.2$	1.38E+20	1.38E+20	β を変更しても影響しない。	
応力降下量	$\Delta \sigma$ (MPa)	$\Delta \sigma = (7\pi^{1.5}/16) (M_0/S^{1.5})$	15.4	17.1		
面積	S (km ²)	$S = (49\pi^4 \beta^4 M_0^2) / (16A^2 S_a)$	858	799	β の変更の影響が大きい	
平均すべり量	D (cm)	$D = M_0 / (\mu S)$	3.85	4.28		
S M G A	面積	S_a (km ²)	$S_a = 1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	170	170	β を変更しても影響しない。
	面積比	p_a	$p_a = S_a / S$	0.20	0.21	
	平均すべり量	D_a (cm)	$D_a = 2.0 \times D$	7.70	8.56	
	応力降下量	$\Delta \sigma_a$ (MPa)	$\Delta \sigma_a = A / (4\beta^2 (\pi S_a)^{0.5}) \times 1.2$	93.1	96.4	

※断層面積を算定する際の短周期レベルは、笹谷ほか(2006)による短周期レベルを用いる。短周期レベルは、海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いを考慮し、笹谷ほか(2006)による短周期レベルを1.2倍としている。

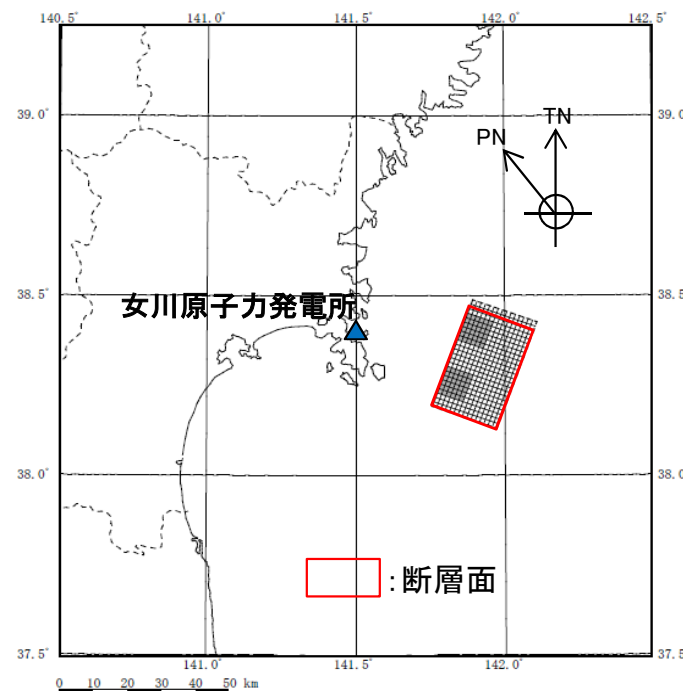
- ・S波速度(β)の変更に伴う影響は、断層面積、すべり量等が変化する。
- ・パラメータの影響確認のため、地震本部(2005)の海洋地殻のS波速度(β)を用いた場合の地震動評価を行う。

2. 物性の違いを反映した断層モデル

■不確かさケース2と同規模(M7.5(Mw7.4))を想定し, S波速度(β)を変化させた場合の断層面



不確かさケース2の
断層面 (L35km × W25km)



地震本部(2005)の海洋地殻による
断層面 (L32km × W25km)※

※: Wを25kmに固定。S=799km², L=799/25=32km

2. 物性の違いを反映した断層モデル

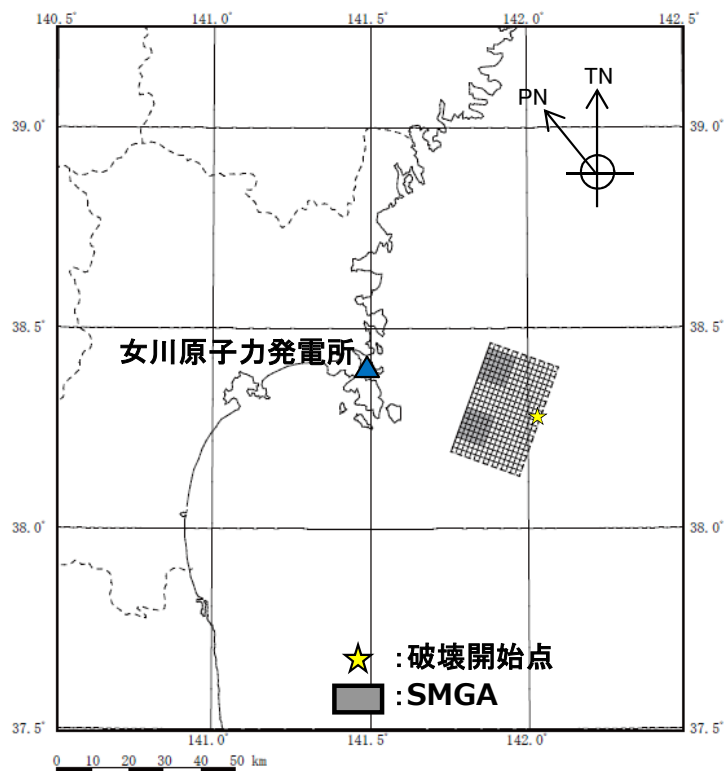
■不確かさケース2のS波速度を変化させた断層モデルの地震動評価

○断層モデル

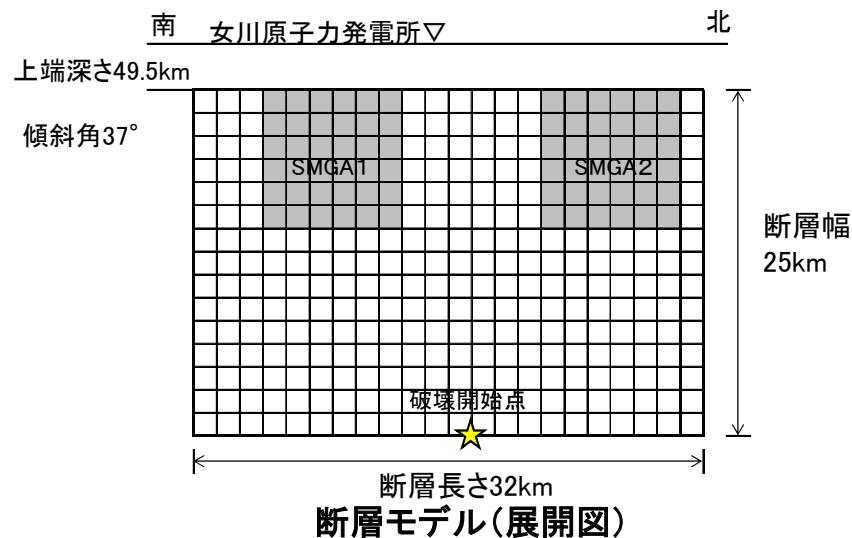
- ・不確かさケース2と同規模(M7.5(Mw7.4))でS波速度を地震本部(2005)の海洋地殻の値を用いて笹谷ほか(2006)を参考に断層モデルを設定した。なお、短周期レベル(応力降下量)は、不確かさケース2と同様に海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いを考慮し笹谷ほか(2006)による短周期レベルの1.2倍を考慮する。

○断層モデルを用いた地震動評価

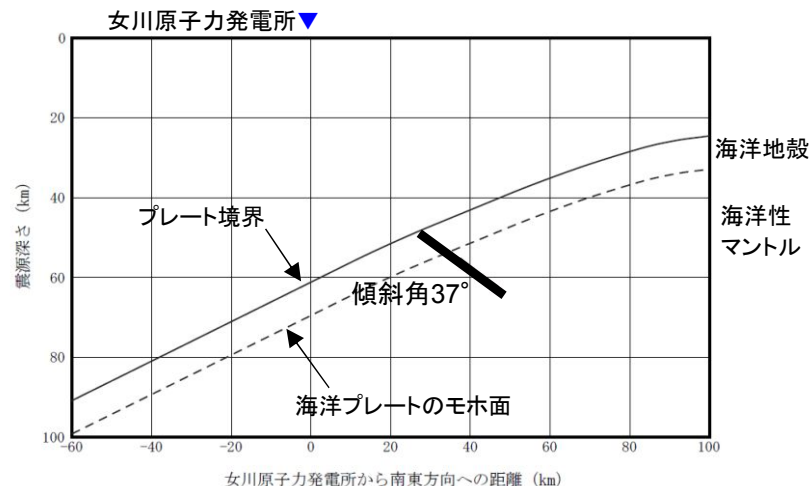
- ・不確かさケース2での参考検討(第367回審査会合 資料1-1 pp.189~196)と同様に統計的グリーン関数法により評価を行う。波形合成法は入倉ほか(1997)による。



断層モデル(平面図)



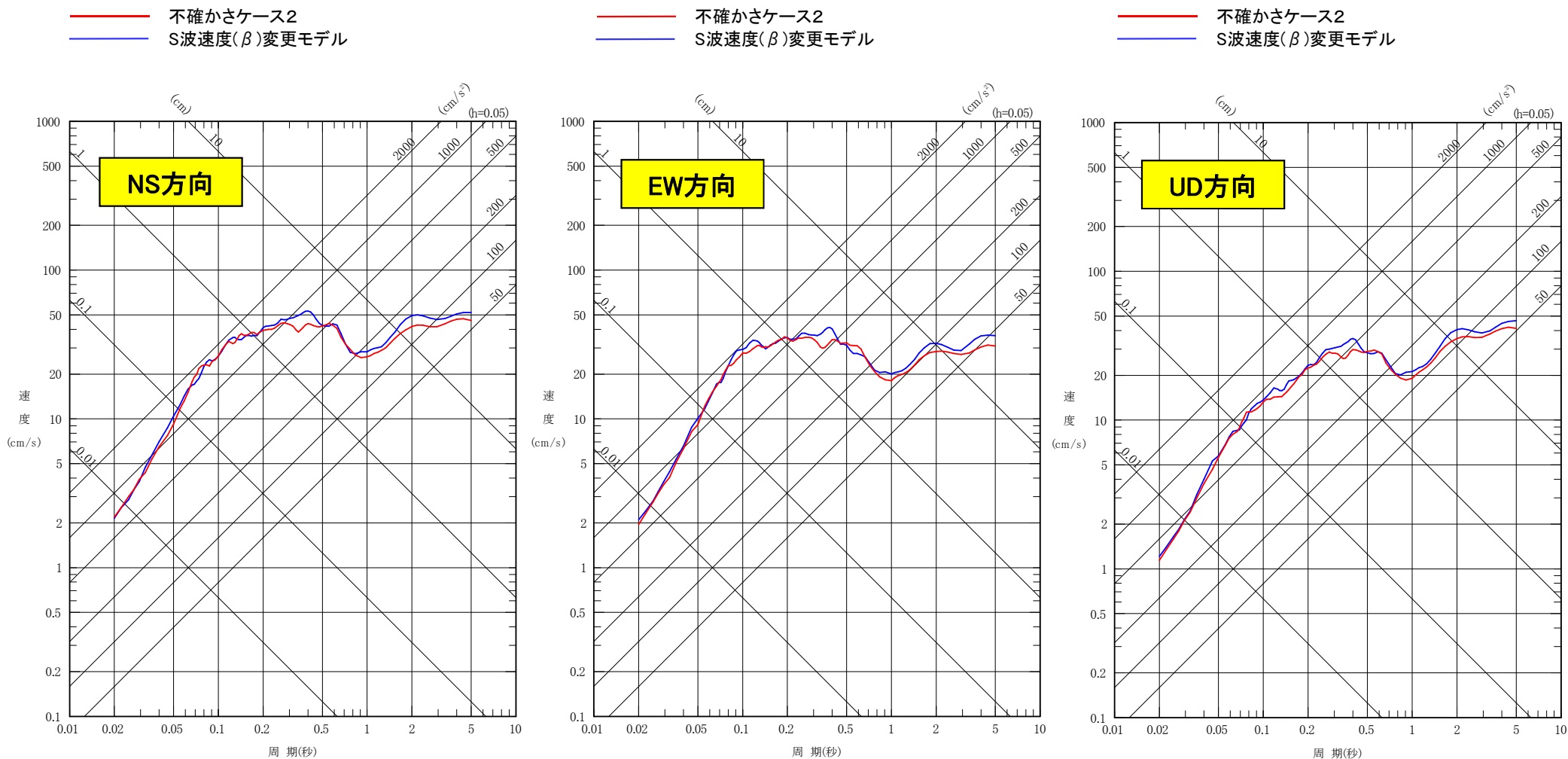
断層モデル(展開図)



断面図

2. 物性の違いを反映した断層モデル

■不確かさケース2とS波速度(β)変更モデルの評価結果(SGF)の比較 <平均応答スペクトル>



評価結果に大きな差はなく, S波速度(β)を地震本部(2005)の値を用いた場合の影響が小さいことを確認した。

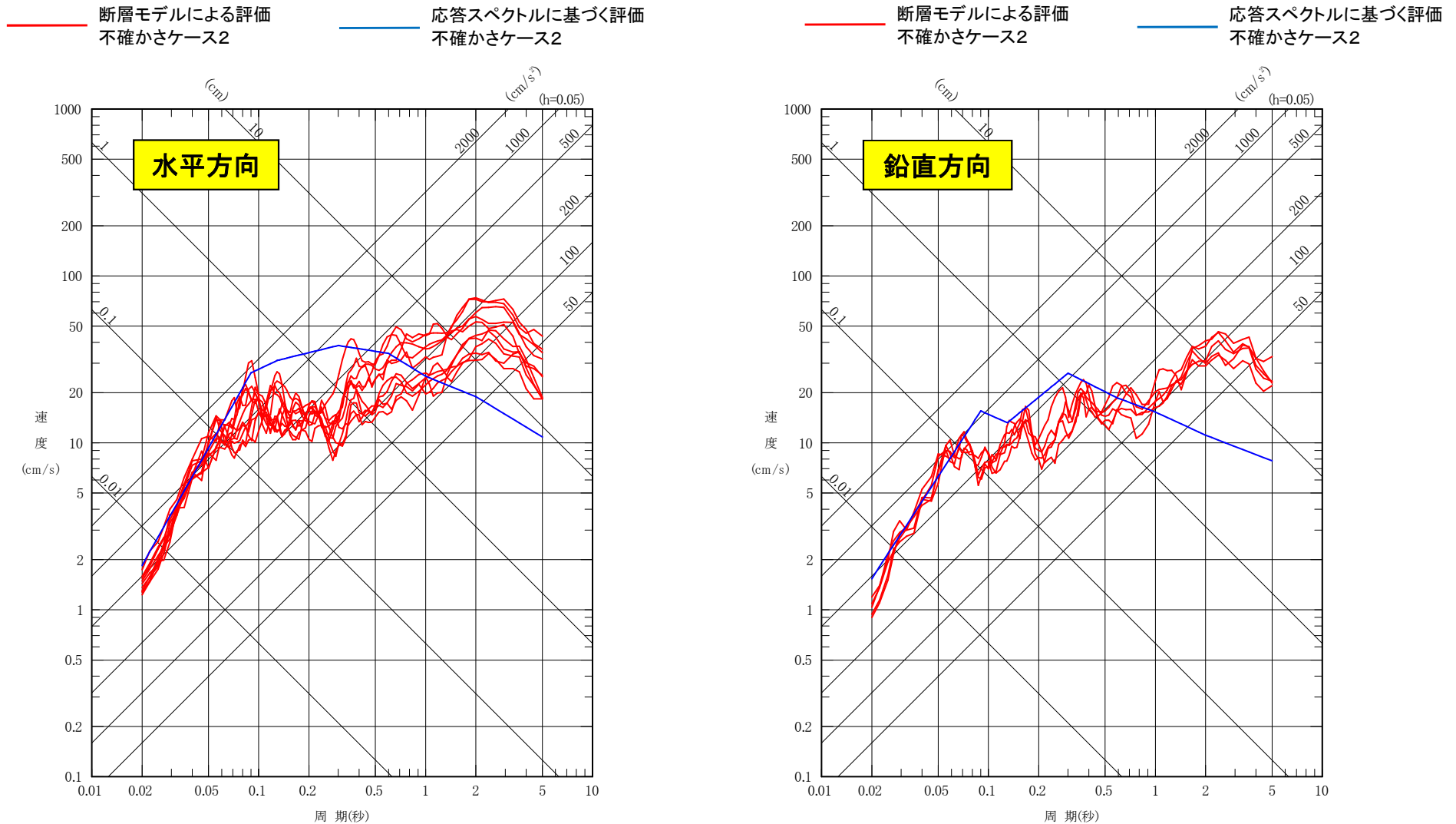
【補足説明資料】

3. 不確かさケース2 経験的グリーン関数法の要素地震の特性

No.	コメント時期	コメント内容
S137	平成28年6月3日 第367回審査会合	不確かさケース2の経験的グリーン関数法の評価結果で中周期帯の落ち込みが見られるので、その要因について要素地震の特性等を踏まえた分析を行うこと。

3. 不確かさケース2 経験的グリーン関数法の要素地震の特性

■ 断層モデルを用いた手法による評価と応答スペクトルに基づく評価：不確かさケース2 (SMGA地殻内集約)



経験的グリーン関数法(EGF)の評価結果は、応答スペクトルに基づく手法に対して、短周期側の整合性は良いが、周期0.2秒付近では小さい傾向に、逆に周期0.5秒以上の長周期側では大きい結果となっている。これは要素地震の特徴によるものと考えられる。

3. 不確かさケース2 経験的グリーン関数法の要素地震の特性

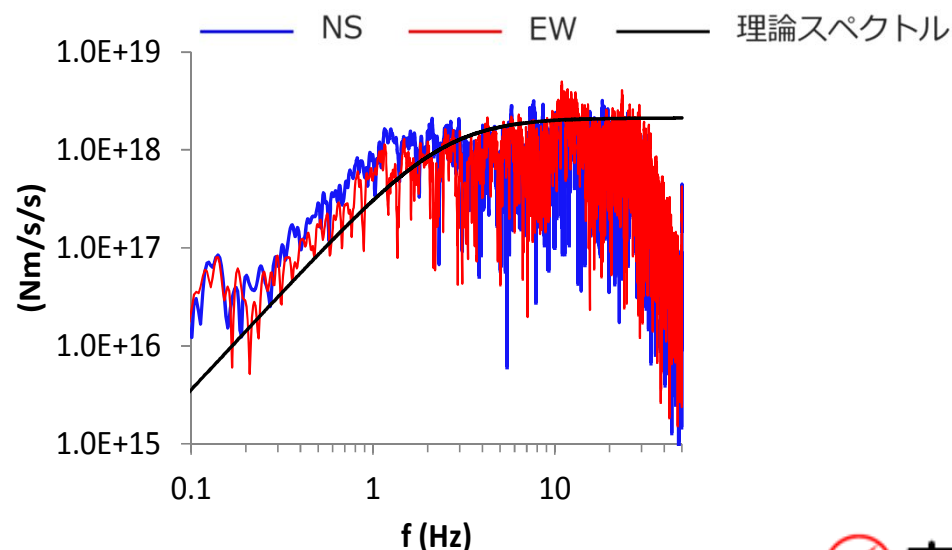
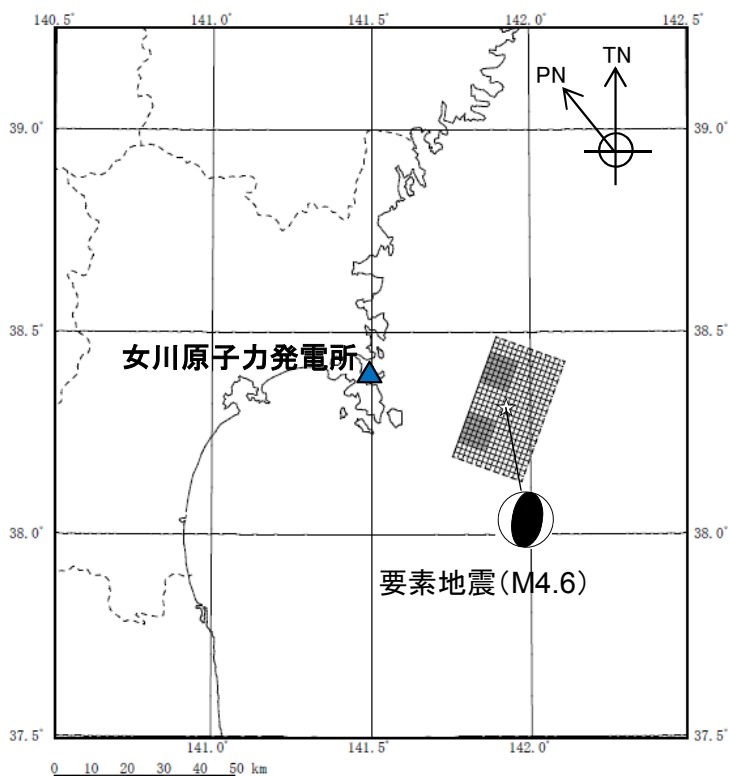
■不確かさケース2(SMGA地殻内) 経験的グリーン関数法の要素地震

- ・経験的グリーン関数法の要素地震としては、海洋地殻の地震特性を地震動評価に反映させるため、海洋プレート内で海洋地殻に最も近い位置で発生した2012年3月30日の地震(M4.6, 深さ50km)を選定している。
 - ・この地震の観測記録による震源スペクトルと理論による震源スペクトルは全周期帯で概ね整合している。詳細にみるとM₀で規定されている長周期側(低周波数側)は観測記録が大きめであるのに対し、周期0.1~0.5秒(2~10Hz)では観測記録が理論と同程度となっており、周期0.1秒以下(10Hz以上)では、観測記録が理論より若干大きくなっている。
- ⇒要素地震の震源スペクトルの特徴は、SGFの結果と比較し、中周期帯が小さいEGFの結果と整合している。

要素地震の諸元

発震の発生日時	震央位置 (経度, 緯度)	地震規模	震源深さ (km)	地震モーメント M ₀ (Nm)	臨界振動数 f _c (Hz)	応力降下量 Δσ (MPa)
2012年3月30日 5:38	141° 55.2' , 38° 18.7'	M4.6	50	9.01E+15	2.44	17.2

※地震諸元は、気象庁地震カタログによる。地震モーメントM₀は、F-netによる。f_cは、震源スペクトルより設定。



加速度震源スペクトル 2012年3月30日(M4.6)の地震

3. 不確かさケース2 経験的グリーン関数法の要素地震の特性

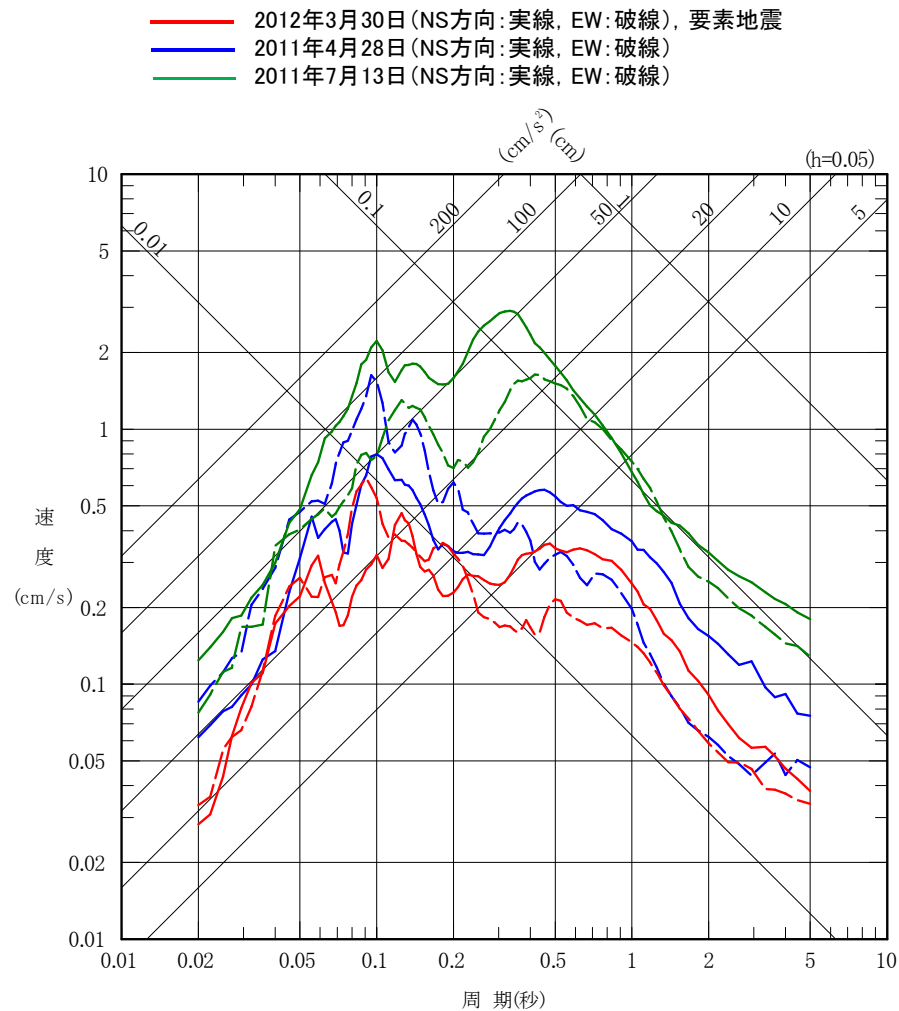
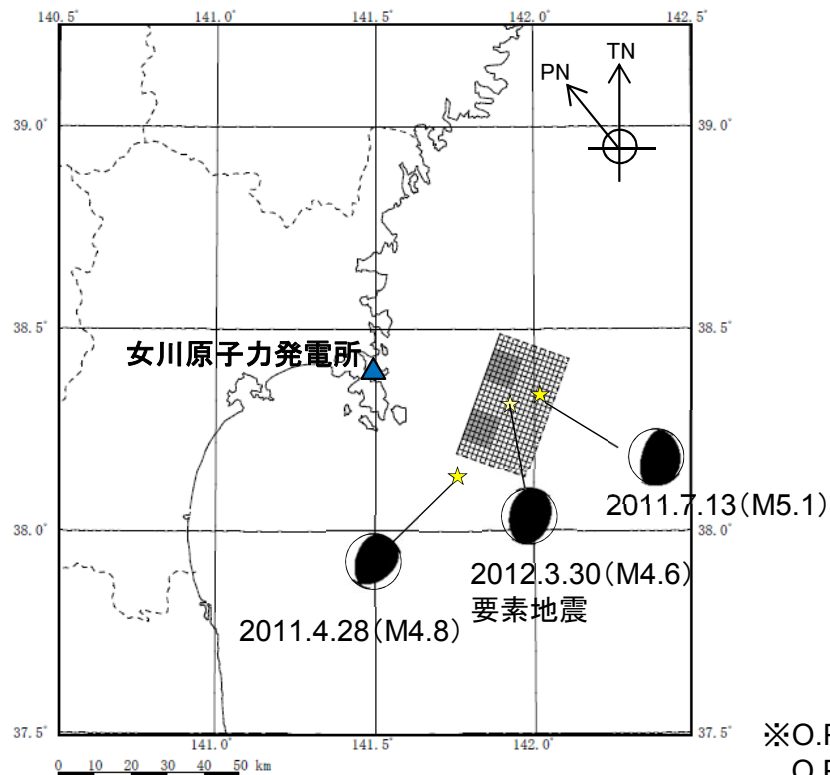
■他の浅い地震との比較

・経験的グリーン関数法の要素地震に用いた地震と同様に、海洋プレート内の比較的浅い(プレート上面からの距離が比較的短い)位置で発生した3地震について応答スペクトルでの比較を行った。

⇒要素地震に用いた地震と同様に、周期0.2秒周辺の周期帯に落ち込みがみられる。

No.	発震の発生日時	震央位置 (経度, 緯度)	地震規模	震源深さ (km)	備考
1	2012年3月30日5:38	141° 55.2' ,38° 18.7'	M4.6	50	要素地震
2	2011年4月28日6:45	141° 46.6' ,38° 07.6'	M4.8	53	
3	2011年7月13日0:37	142° 00.4' ,38° 19.8'	M5.1	47	

※地震諸元は、気象庁地震カタログによる。



観測記録(解放基盤相当(O.P.※-8.6m))でのほざとり波

※O.P.: 女川原子力発電所工事用基準面(Onagawa peil)であり, O.P.±0m = T.P.(東京湾平均海面)-0.74m.

【補足説明資料】

4. 不確かさケース2 統計的グリーン関数法による検討

No.	コメント時期	コメント内容
S138	平成28年6月3日 第367回審査会合	基本ケースと不確かさケース2の統計的グリーン関数法における放射特性の違い等が評価結果に与える影響について説明すること。

4. 不確かさケース2 統計的グリーン関数法による検討

■検討用地震の断層モデル評価における統計的グリーン関数法の位置づけ

検討用地震の断層モデルによる地震動評価については、地震タイプ毎に以下の手法を採用している。また、参考として、他の手法による検討も行い、評価結果の妥当性の確認を実施している。不確かさケース2における統計的グリーン関数法も妥当性の確認目的で実施したものである。

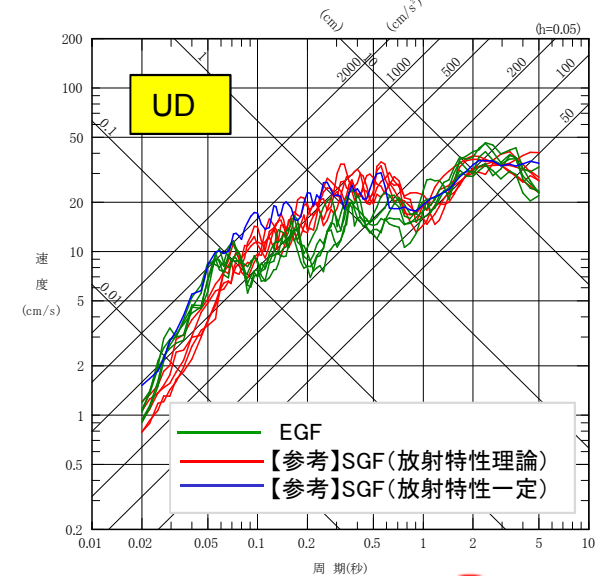
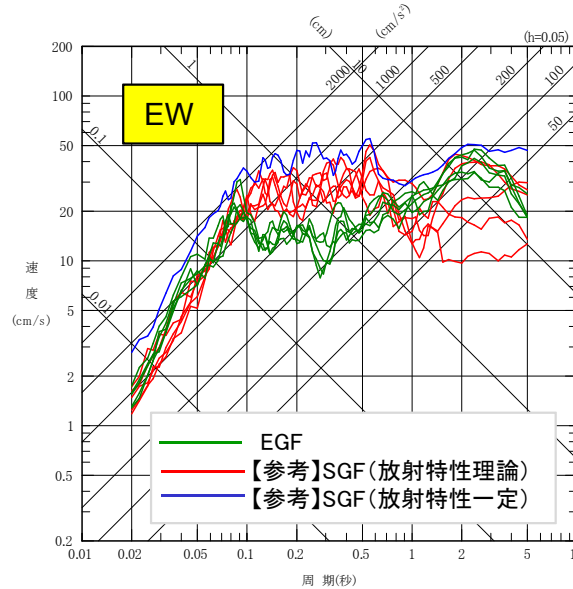
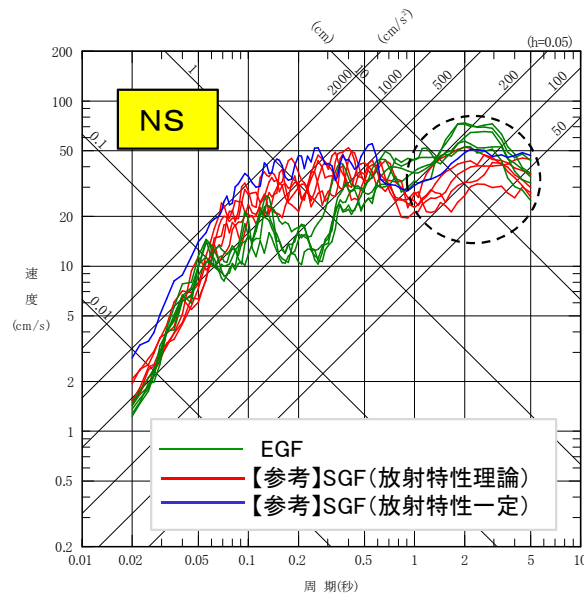
地震タイプ	評価手法	採用理由	参考検討
SMGAマントル内	統計的グリーン関数法 (放射特性一定)	同じマントル内にSMGAを持つ4.7地震のシミュレーション解析と同じ手法を採用	経験的グリーン関数法でも概ね同様の結果が得られることを確認(第309回審査会合 資料1 pp.158~160)
SMGA地殻内	経験的グリーン関数法	SMGA地殻内地震は、SMGAマントル内の地震に対し応力降下量が小さく、一方敷地からSMGAまでの距離が近いこと、より長周期が卓越する傾向にある。要素地震の特徴も踏まえ、長周期がより保守的に評価される手法を採用(p.66参照)。	統計的グリーン関数法(放射特性理論*)でも、短周期や長周期は概ね整合していることを確認(第367回審査会合 資料1-1 pp.189~196)。

※放射特性理論: Aki and Richards(1980)等

■不確かさケース2 (SMGA地殻内集約)の統計的グリーン関数法(放射特性一定)による地震動評価

○不確かさケース2において、参考検討で採用している統計的グリーン関数法に放射特性一定($F=0.62$)を採用した場合の地震動評価結果を示す。

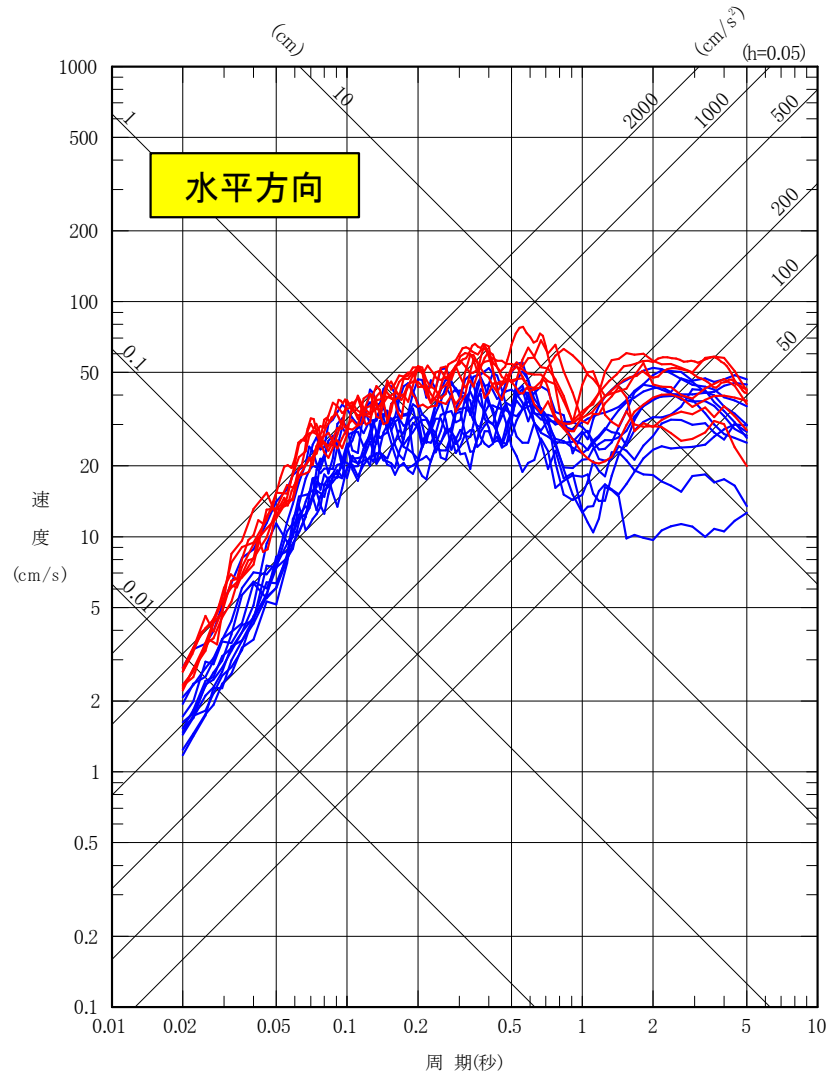
長周期の大きいNS方向では、経験的グリーン関数法に比べ、統計的グリーン関数法は放射特性理論、一定とも小さい結果となっている。



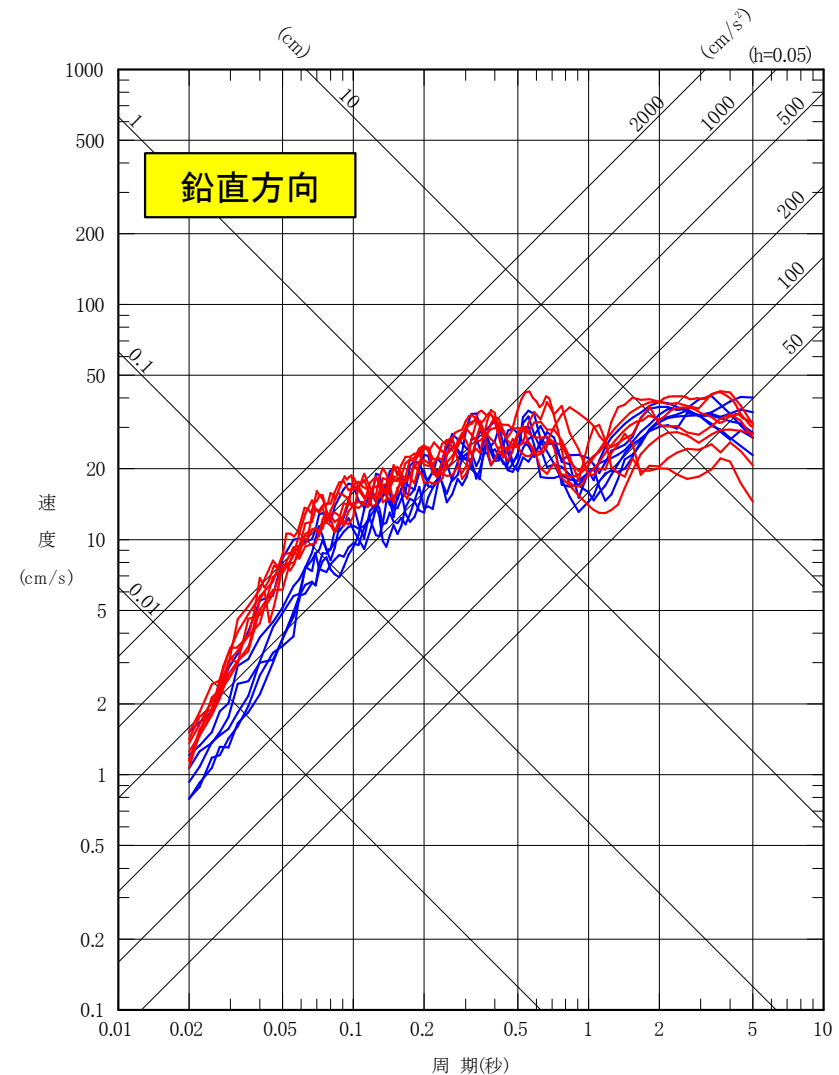
4. 不確かさケース2 統計的グリーン関数法による検討

○また、参考に統計的グリーン関数法による全ての地震動評価結果を下図に示す。

— SMGAマントル内(基本ケース, 不確かさケース1, 3)
 — 【参考】SMGA地殻内(不確かさケース2)の放射特性理論, 一定



— SMGAマントル内(基本ケース, 不確かさケース1, 3)
 — 【参考】SMGA地殻内(不確かさケース2)の放射特性理論, 一定



参考文献

- 1.Saeko Kita and Kei Katsumata(2015) : Stress drops for intermediate–depth intraslab earthquakes beneath Hokkaido, northern Japan: Differences between the subducting oceanic crust and mantle events, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G-Cubed)*, 16, 552–562, 2015.
- 2.Takehi, Y. (2004): Analysis of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake using high–density strong ground motion data: Detailed rupture process of a slab earthquake in a medium with a large velocity contrast, *J. Geophys. Res.*, 109, B08306, 2004
- 3.Miyatake, T., Y. Yagi, and T. Yasuda (2004): The dynamic rupture process of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 31,L12612, 2004
4. Nikolas I. Christensen(1996): Poisson’ s ratio and crustal seismology, *J. Geophys. Res.*, 101(B2), 3139–3156
5. Nikolas I. Christensen and Walter D. Mooney(1995): Seismic velocity and composition of the continental crust ; A global view, *J. Geophys. Res.*,100(B7),9761–9788
- 6.北佐枝子(2016) : 東北日本下におけるスラブ内地震の応力降下量の深さ変化の特徴, 日本地震学会講演予稿集, S08
- 7.地震調査研究推進本部(2012) : 「長周期地震動予測地図」2012年試作版
- 8.地震調査研究推進本部(2005) : 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)
- 9.Nakajima, J., A. Hasegawa, and S. Kita (2011) : Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault in the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku Earthquake, *Geophys.Res. Lett.*, 38, L00G06, doi:10.1029/2011GL048432, 2011.
- 10.三浦誠一, 高橋成実, 仲西理子, 小平秀一, 金田義行(2001) : 日本海溝前弧域(宮城沖)における地震学的探査—KY9905航海—, *JAMSTEC深海研究* 第18号
- 11.Seiichi Miura, Narumi Takahashi, Ayako Nakanishi, Tetsuro Tsuru, Shuichi Kodaira, Yoshiyuki Kaneda(2005): Structural characteristics off Miyagi forearc region, the Japan Trench seismogenic zone, deduced from a wide–angle reflection and refraction study, *Tectonophysics* 407(2005) 165–188
- 12.Yojiro Yamamoto, Ryota Hino, Kensuke Suzuki, Yoshihiro Ito, Tomoaki Yamada, Masanao Shinohara, Toshihiko Kanazawa, Gen Aoki, Masayuki Tanaka, Kenji Uehira, Gou Fujie, Yoshiyuki Kaneda, Tetsuo Takanami, Toshinori Sato(2008): Spatial heterogeneity of the mantle wedge structure and ineterplate coupling in the NE Japan forearc region, *Geophysical Research Letters* Vol.35
- 13.笹谷努, 森川信之, 前田宜浩(2006) : スラブ内地震の震源特性, 北海道大学地球物理学研究報告, No.69
- 14.神田克久, 広谷浄, 石川和也(2013) : 震度分布に基づく太平洋プレート内のスラブ内地震の短周期励起特性, 日本地球惑星科学連合2013年大会
- 15.迫田浩司, 岡田知己, 菅ノ又淳一, 長谷川昭(2004): 2003年5月26日宮城県沖地震(M7.1)と二重深発地震面上面の地震活動—スラブ内大地震震源域における地震活動の特徴抽出—, *地震* 第2輯, 第57巻

参考文献

16. 佐藤智美, 巽誉樹(2002): 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第556号
17. 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子(1997): 経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, B25
18. 気象庁地震カタログ(1923~2016): 地震月報ほか
19. Aki, K., and P. G. Richards(1980): Quantitative Seismology, Theory and Methods, W. H. Freeman and Company, San Francisco, Vol. I and Vol. II
20. 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net, <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>