

【関連質問への回答】
新規制基準適合性審査申請
自然現象等
<(1)地震:基準地震動>
(No.45関連)

平成30年6月1日

東北電力株式会社



本日の説明内容

第13回検討会等における基準地震動に関する質問事項について説明。

1. 基準地震動の年超過確率の参照について

- ・地震の発生頻度に関して、ハザード曲線の算定方法を詳細に説明してほしい。
- ・基準地震動よりも影響が大きい地震が起こる可能性について、例えば何年に1回など、定量的な示し方はできないか。

2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて

- ・3.11型地震について、断層の破壊の仕方(破壊開始点)の違いについて、影響がないか確認してほしい。

3. 基準地震動Ss-D1の模擬地震波の継続時間について

- ・基準地震動(Ss-D1)の模擬地震波の継続時間の考え方について、保守性も踏まえ適切なのか説明してほしい。



目次

1. 基準地震動の年超過確率の参照について	3
2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて	22
3. 基準地震動Ss-D1の模擬地震波の継続時間について	30
[参考]基準地震動の年超過確率	37
参考文献	53



1. 基準地震動の年超過確率の参照について

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(1/18)

基本事項①

- 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」では、基準地震動の策定について以下のフローで審査が行われている。
- 第13回検討会(前回)は、「基準地震動の策定」を説明。
- 第14回検討会(今回)では、「超過確率の参照」(地震ハザード評価)についてご説明する。
- なお、地震ハザードは、地震PRA(確率的リスク評価)における建屋・機器の耐性評価に用いており、地震PRAの結果も踏まえ、想定すべき重大事故を特定し、重大事故対策の有効性を確認する。(現在審査中)

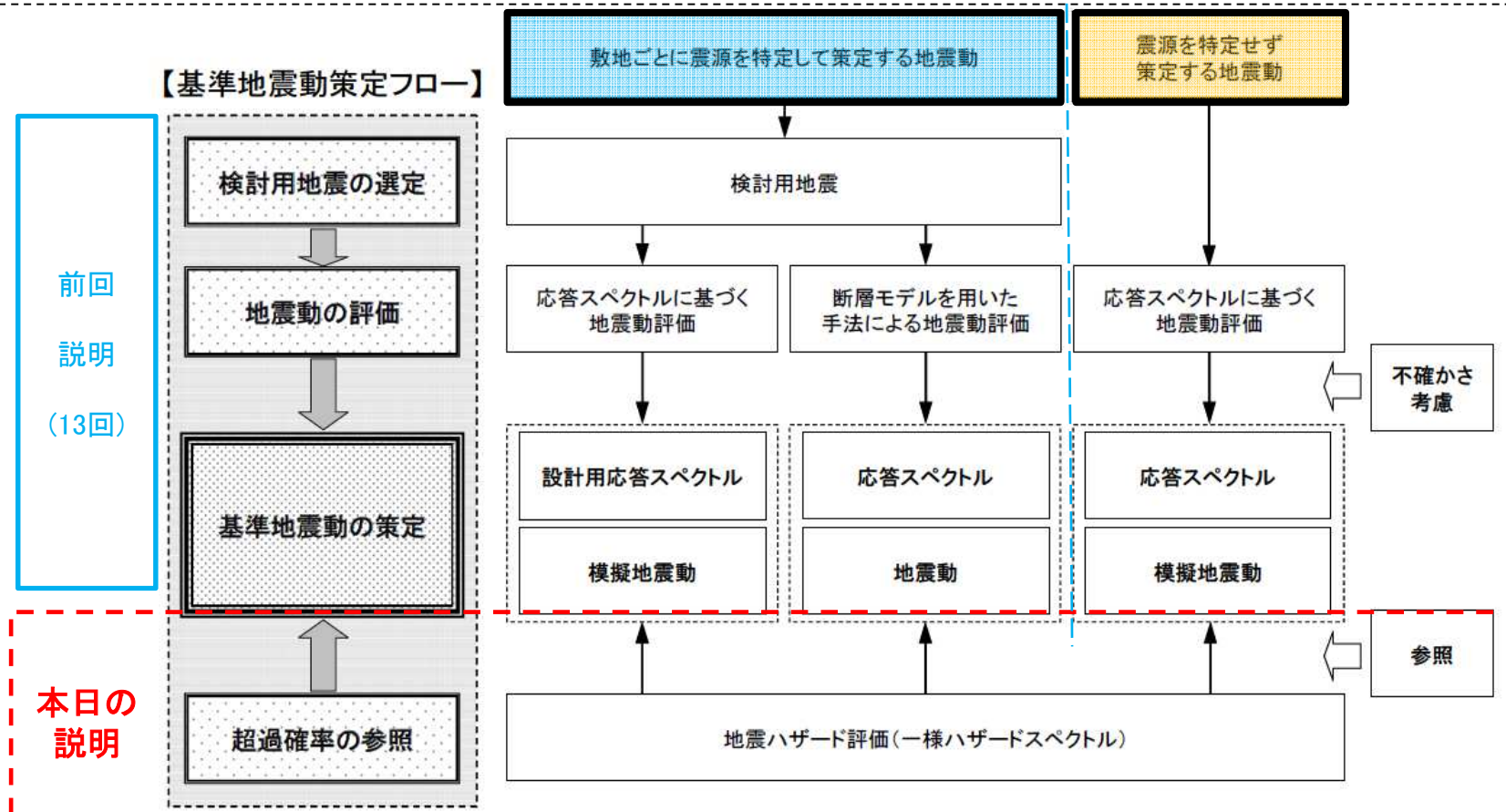


図-1 基準地震動の策定に係る審査フロー

基本事項②

○新規制基準※1・・・「基準地震動の策定方針」

・「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」については、それぞれが対応する超過確率を参照し、それぞれ策定された地震動の応答スペクトルがどの程度の超過確率に相当するかを把握すること。

※1:「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

○審査ガイド※2

6.2.6 基準地震動の超過確率の参照

- (1) 策定された基準地震動の応答スペクトルと地震ハザード解析による一様ハザードスペクトルを比較し、地震動の超過確率を適切に参照していることを確認する。参照にあたっては、地震動の超過確率のレベルを確認すると共に、地震ハザードに大きな影響を及ぼす地震と検討用地震との対応も確認する。
- (2) 基準地震動の超過確率と検討用地震との対応において、地震ハザード曲線の地震別内訳に検討用地震が明示されているかを分析し、その超過確率が示されていることを確認する。

※2:「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(3/18)

基本事項③

■地震ハザードとは (図1)

- ある任意地点において将来の一定期間中に襲来するであろう任意の地震動強さと、その強さを超過する頻度または確率との関係。

■一様ハザードスペクトルとは (図2)

- 地震ハザードの1つであり、応答スペクトルを地震動強さの指標とし、応答スペクトルの距離減衰式等によって求めた周期毎の地震ハザード曲線を用いて、任意の超過頻度または超過確率に対する応答スペクトル値を連ねて表わしたもの。

■地震ハザード評価の特徴 (図3)

- 敷地に影響を与えるすべての震源(歴史地震, 活断層等)を考慮。
- 地震動評価に用いられる理論や解析モデルに含まれる不確定性をシステムティックに取り込むことが可能。

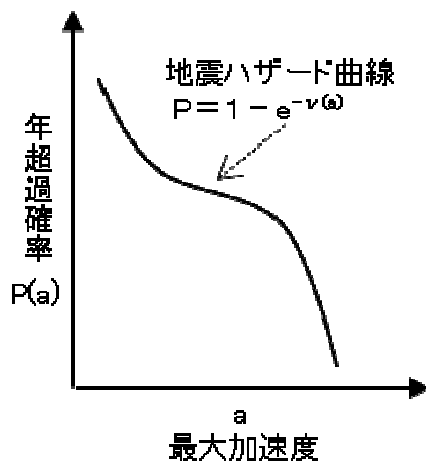


図1敷地で $A > a$ となる年超過確率 (地震ハザード曲線)

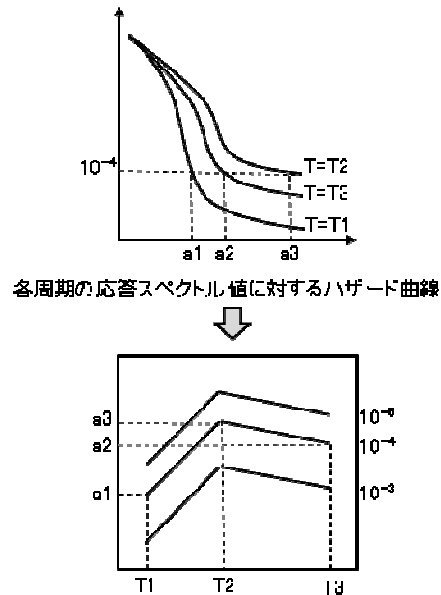


図2 各超過確率に対する一様ハザードスペクトル

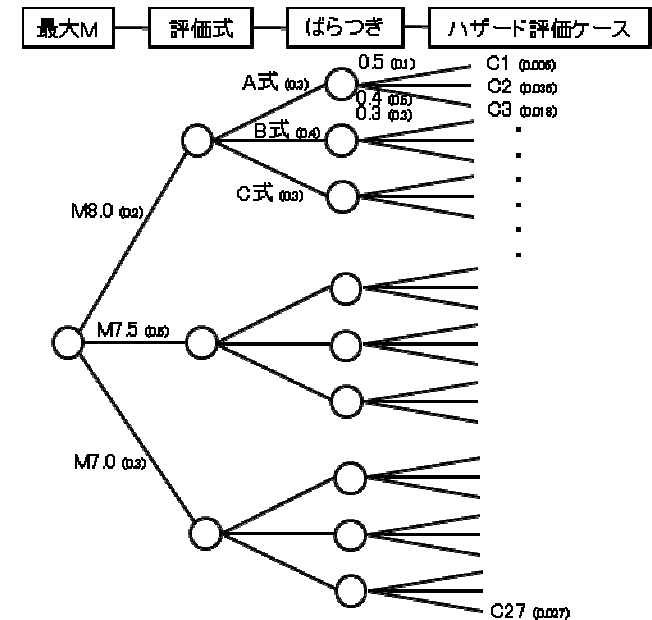


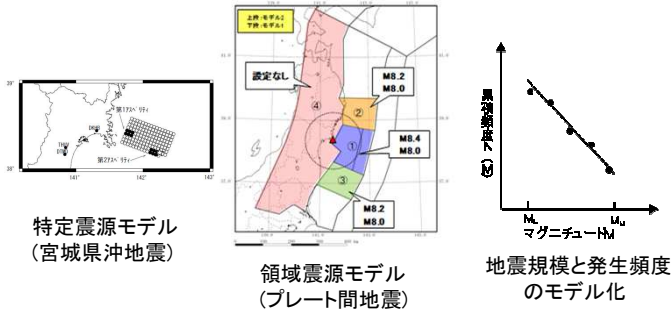
図3ロジックツリーの導入(概念)

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(4/18)

地震ハザードの評価フロー

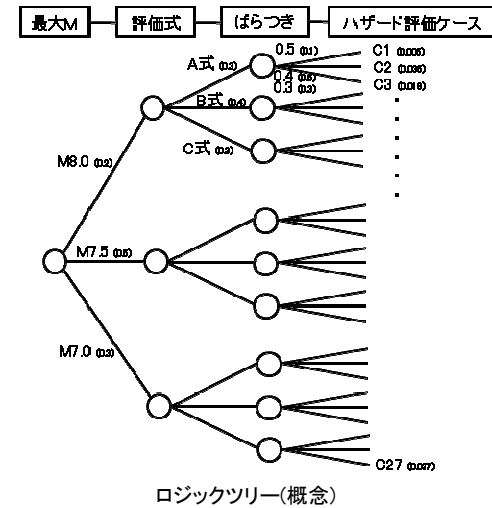
① 評価対象とする地震の抽出, 震源モデルの設定

- ・地震発生様式毎に分類。
- ・特定震源モデル, 領域震源モデルでモデル化。



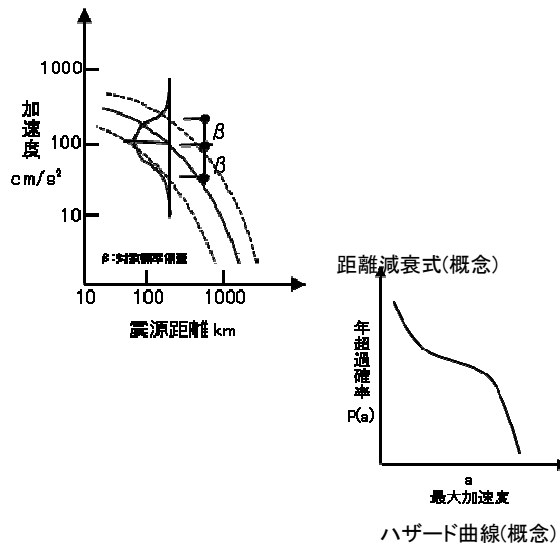
④ ロジックツリーの作成

- ・判断が分かれる項目, 評価方法が複数存在する項目等について分岐を設定し, ロジックツリーを作成。



② 地震動伝播モデルの設定

- ・距離減衰式, 断層モデル手法の設定。
- ※観測記録を用いた補正等を含む
- ・予測誤差(ばらつき)を確率分布として考慮。

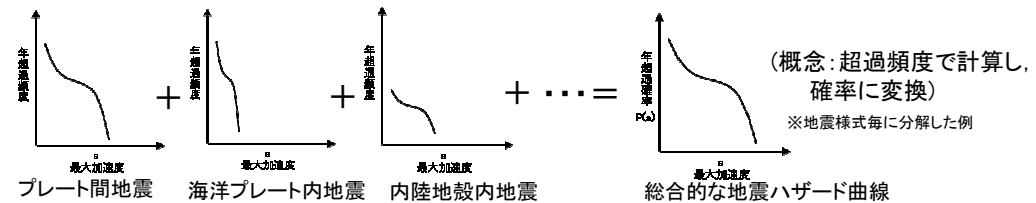


③ 個々の地震ハザード曲線の算出

- ・①, ②に基づき, 個々の地震毎のハザード曲線を算出。

⑤ 総合的な地震ハザード曲線の算出

- ・③の地震ハザード曲線, ④のロジックツリーから, 総合的な地震ハザード曲線を算出。



⑥ 年超過確率の参照

- ・⑤から一様ハザードスペクトルを求め, 基準地震動と比較。

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(5/18)

評価方針

■ 基本方針

一般社団法人日本原子力学会「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」に基づき、地震ハザード評価を実施し、基準地震動の応答スペクトルがどの程度の年超過確率に相当するかを確認する。

■ 震源モデルの設定

特定震源モデルと領域震源モデルを設定する。モデルの設定に際しては、地震調査研究推進本部の知見「確率論的地震動予測地図」及び各種調査結果等を参考にする。

■ 地震動伝播モデルの設定

- 東北地方太平洋沖型地震については、Noda et al.(2002)による距離減衰式及び断層モデル手法による評価を分岐として設定する。
- その他の震源については、Noda et al.(2002)による距離減衰式を用いる。
- Noda et al.(2002)による距離減衰式に対しては、観測記録に基づいた補正または、Noda et al.(2002)の手法に基づいた補正を考慮する。

■ ロジックツリーの作成

震源モデル及び地震動伝播モデルにおいて、地震ハザード評価に大きな影響を及ぼす認識論的不確実さを選定し、ロジックツリーを作成する。

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(6/18)

震源モデルの設定(特定震源)

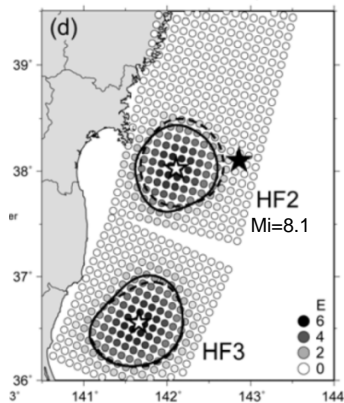
① 評価対象とする地震の抽出, 震源モデルの設定

- ・地震発生様式毎に分類。
- ・特定震源モデル, 領域震源モデルでモデル化。

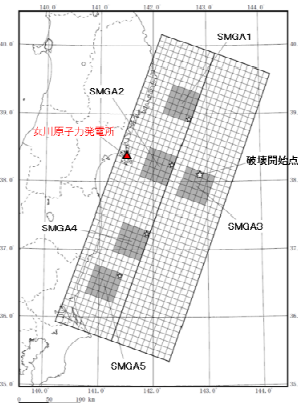
特定震源モデル

震源	地震の位置, 規模, 頻度の設定	
プレート間地震	東北地方太平洋沖地震	<ul style="list-style-type: none"> ・神田ほか(2012), 諸井ほか(2013)に基づき地震規模, 位置を設定 ・頻度は地震本部(2013)に基づき, 平均発生間隔600年とし更新過程を設定
	宮城県沖地震	<ul style="list-style-type: none"> ・地震本部(2005)に基づき, 地震規模, 位置を設定 ・頻度は地震本部(2013)に基づき, 平均発生間隔38年としポアソン過程を設定
活断層による地震	<ul style="list-style-type: none"> ・地質調査結果, [新編]日本の活断層, 地震本部(2009), (2013)等に基づき, 地震規模, 位置, 平均発生間隔を設定 ・「単独での活動」と「単独と連動での活動」をロジックツリーの分岐として設定 	

■東北地方太平洋沖地震

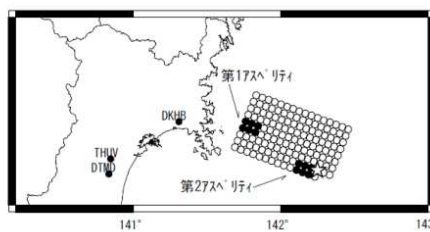


震度インバージョンによる短周期地震波の発生域 [神田ほか(2012)]

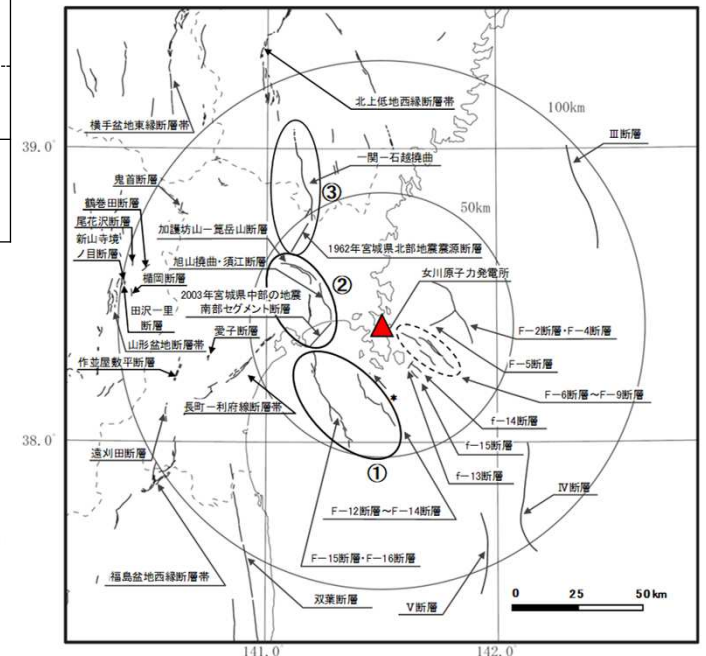


諸井ほか(2013)に基づき設定した確定論評価における3.11型地震の基本ケース

■宮城県沖地震



1978年宮城県沖地震(M7.4)の観測記録を踏まえた想定宮城県沖地震の断層モデル(A1断層) [地震本部(2005)]



*: 網地島南西沖で1測線のみで認められる断層
①: 仙台湾の断層群による地震, ②: 石巻平野周辺の断層群による地震, ③: 岩手・宮城県境の断層群による地震

敷地周辺の活断層分布図

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(7/18)

震源モデルの設定(領域震源)

① 評価対象とする地震の抽出, 震源モデルの設定

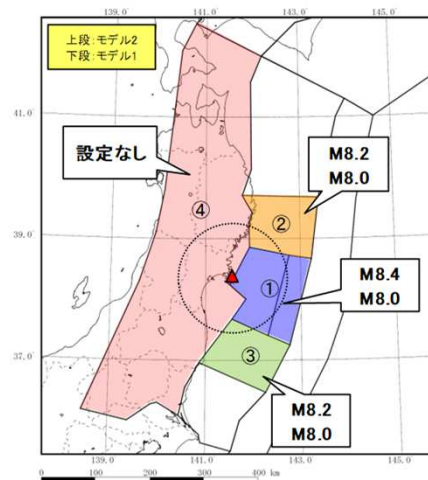
- ・地震発生様式毎に分類。
- ・特定震源モデル, 領域震源モデルでモデル化。

領域震源モデル(敷地から100km程度の範囲をモデル化)

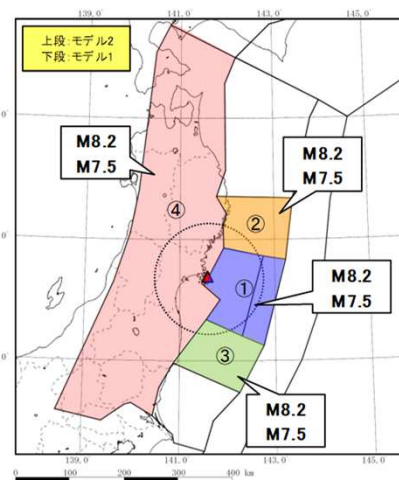
領域震源 ・プレート間地震 ・海洋プレート内地震 ・内陸地殻内地震	領域区分	地震本部(2013)に基づき設定
	最大マグニチュード	地震本部(2013)に基づき設定。モデル1, モデル2※1の最大Mを分岐として設定する。重み付けは過去の地震の発生状況等を踏まえて設定する。
	発生頻度	気象庁カタログのデータを用いたG-R式※2より算定
	その他	プレート境界地震の発生後には, 本震の発生領域の周囲で余効滑りが起きることが知られており, 3.11後にも太平洋プレートの上面で余効滑りが観測されている[加藤(2012)]ことから, ①領域において「余効滑り」の分岐を設定する。

※1:地震本部(2013)では, 2つの震源モデルが考慮されている。
 モデル1:長期評価結果に基づくモデル
 モデル2:領域震源に考慮する地震規模を大きくしたモデル

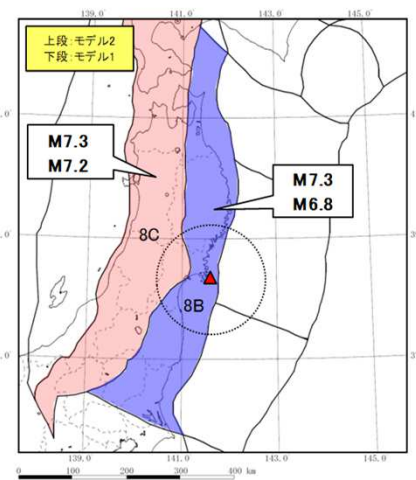
※2:ゲーテンベルグ・リヒター則により, マグニチュードMに対する地震の頻度N(回/年)の関係式を策定。
 $\log_{10} N = a - b M$



プレート間地震



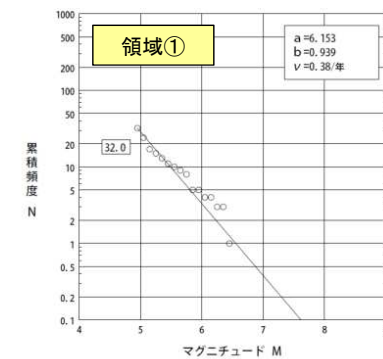
海洋プレート内地震



内陸地殻内地震

①宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り, ②三陸沖中部, ③福島県沖, ④東北陸域太平洋プレート内

地震本部(2013)に基づく領域区分



1. 基準地震動の年超過確率の参照について(8/18)

地震動伝播モデルの設定

② 地震動伝播モデルの設定

- ・距離減衰式, 断層モデル手法の設定。 ※観測記録を用いた補正等を含む
- ・予測誤差(ばらつき)を確率分布として考慮。

■地震動伝播モデルの設定

- 東北地方太平洋沖型地震については, Noda et al.(2002)による距離減衰式及び断層モデル手法による評価を分岐として設定する。
- その他の震源については, Noda et al.(2002)による距離減衰式用いる。
- Noda et al.(2002)による距離減衰式に対しては, 観測記録に基づいた補正または, Noda et al.(2002)の手法に基づいた補正を考慮する。
- ばらつきについては, 既往の文献を参照し, 必要に応じて分岐を設定する。また, ばらつきの打ち切りも設定する。

考慮する震源		評価手法	補正係数	ばらつき※1	ばらつきの打ち切り	
特定震源	プレート間地震	宮城県沖地震	Noda et al.(2002)	敷地における観測記録とNoda et al.(2002)の比に短周期レベルを考慮した補正係数	0.35※2	東北地方太平洋沖型地震を上限として2σに設定
		東北地方太平洋沖型地震	Noda et al.(2002)	敷地における観測記録とNoda et al.(2002)の比に短周期レベルを考慮した補正係数	0.35※2	3σ
	断層モデル手法		-			
	活断層による地震	Noda et al.(2002)	Noda et al.(2002)の内陸補正	0.45※3 0.40※3	3σ	
領域震源	プレート間地震	①宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り	Noda et al.(2002)	敷地における観測記録とNoda et al.(2002)の比に短周期レベルを考慮した補正係数	0.35※2	3σ
		②三陸沖中部	Noda et al.(2002)	敷地における観測記録とNoda et al.(2002)の比に短周期レベルを考慮した補正係数	0.35※2 0.40※3	3σ
		③福島県沖	Noda et al.(2002)	敷地における観測記録とNoda et al.(2002)との比に基づく補正係数	0.45※3 0.40※3	3σ
	補正なし		0.50			
	海洋プレート内地震	Noda et al.(2002)	敷地における観測記録とNoda et al.(2002)との比に基づく補正係数	0.45※3 0.40※3	3σ	
	内陸地殻内地震	Noda et al.(2002)	Noda et al.(2002)の内陸補正	0.45※3 0.40※3	3σ	

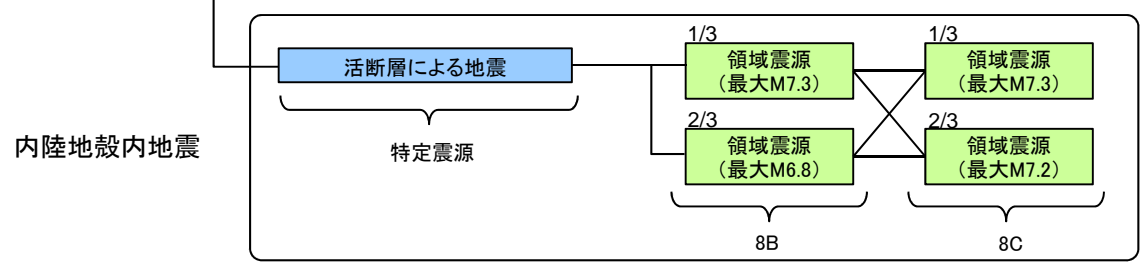
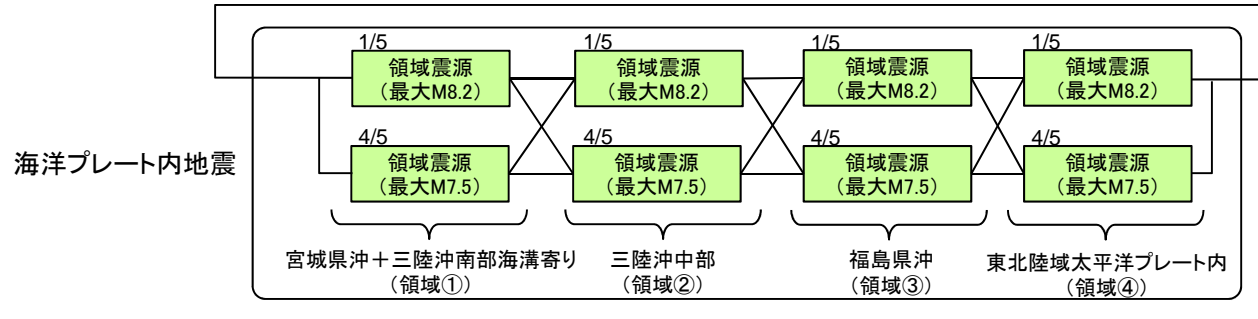
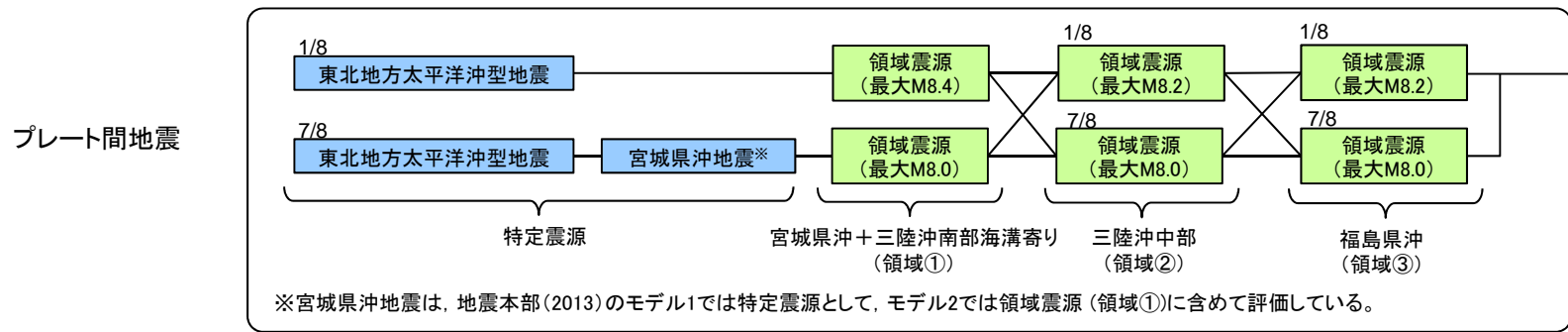
※1: ばらつきは, 自然対数標準偏差で標記 ※2: 森川ほか(2006)に基づき設定 ※3: 池浦・野田(2005)に基づき設定

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(9/18)

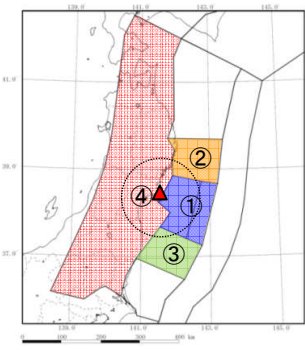
ロジックツリーの作成(全体概要)

④ロジックツリーの作成

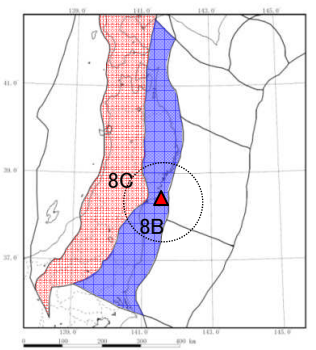
・判断が分かれる項目, 評価方法が複数存在する項目等について分岐を設定し, ロジックツリーを作成。



ロジックツリーの上段は地震本部(2013)のモデル2, 下段はモデル1に基づく設定。



海溝型地震の評価で考慮する領域 (領域震源モデル)



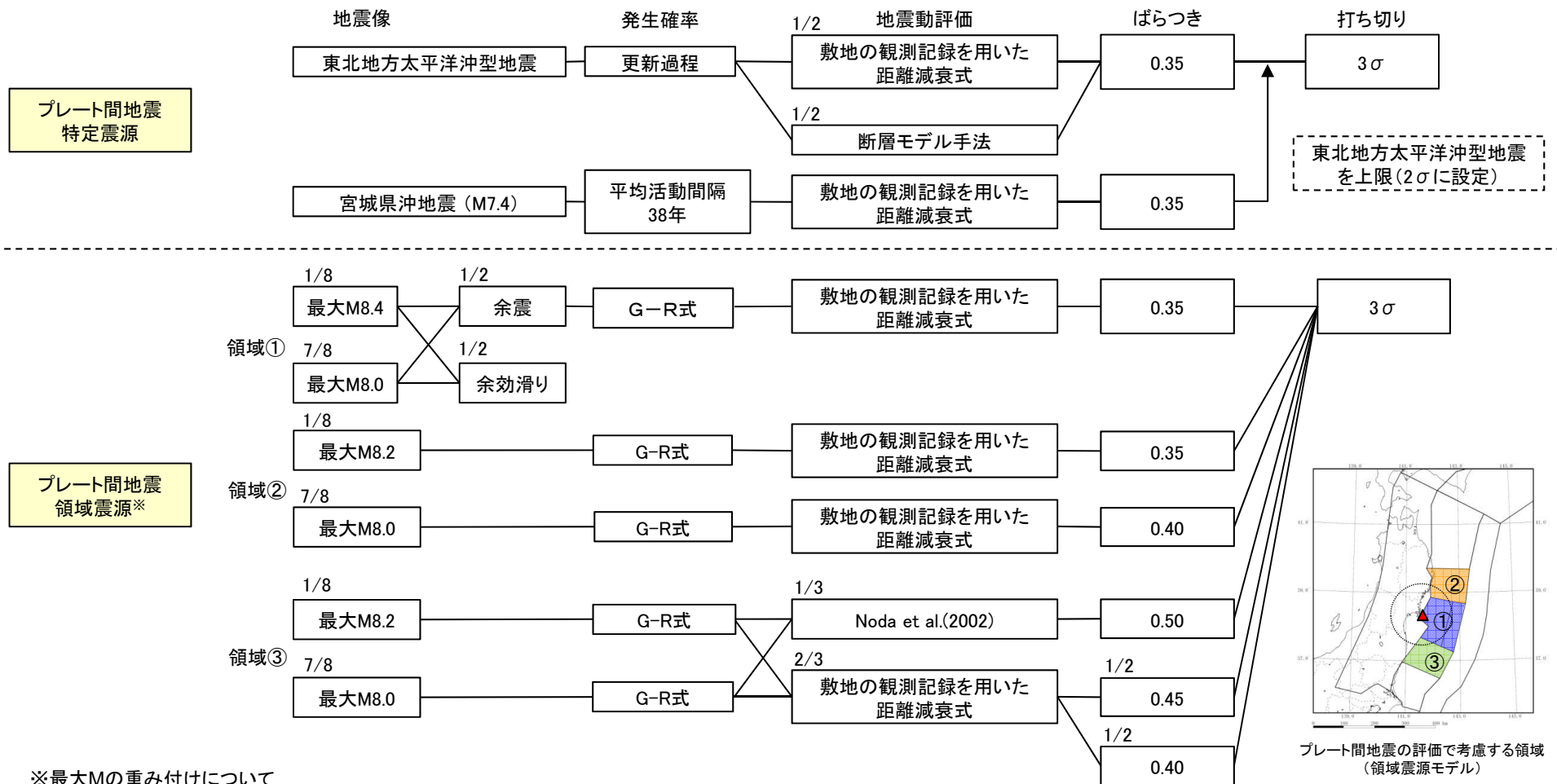
内陸地殻内地震の評価で考慮する領域 (領域震源モデル)

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(10/18)

ロジックツリーの作成(プレート間地震の特定震源, 領域震源)

④ロジックツリーの作成

・判断が分かれる項目, 評価方法が複数存在する項目等について分岐を設定し, ロジックツリーを作成。



※最大Mの重み付けについて

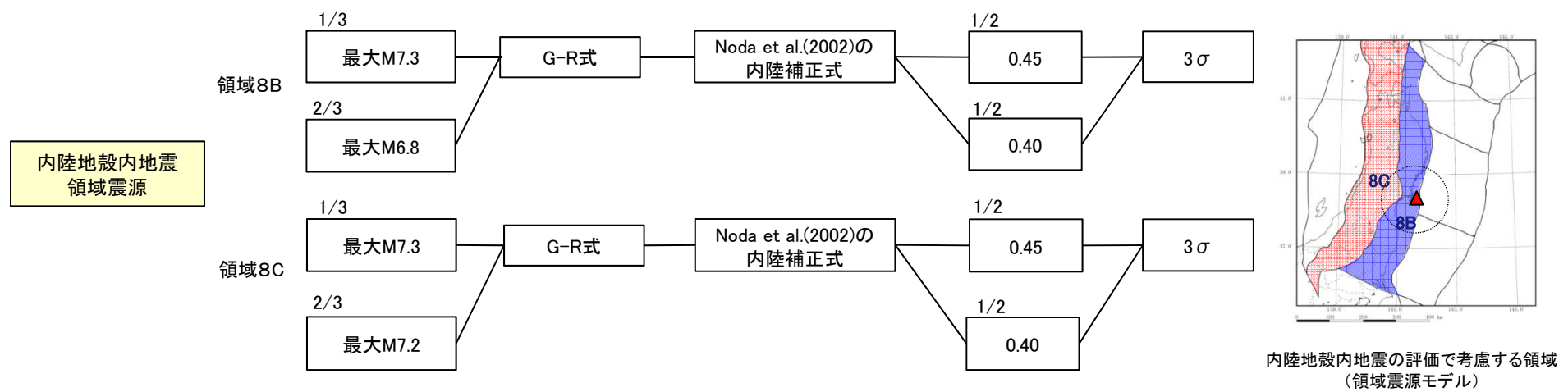
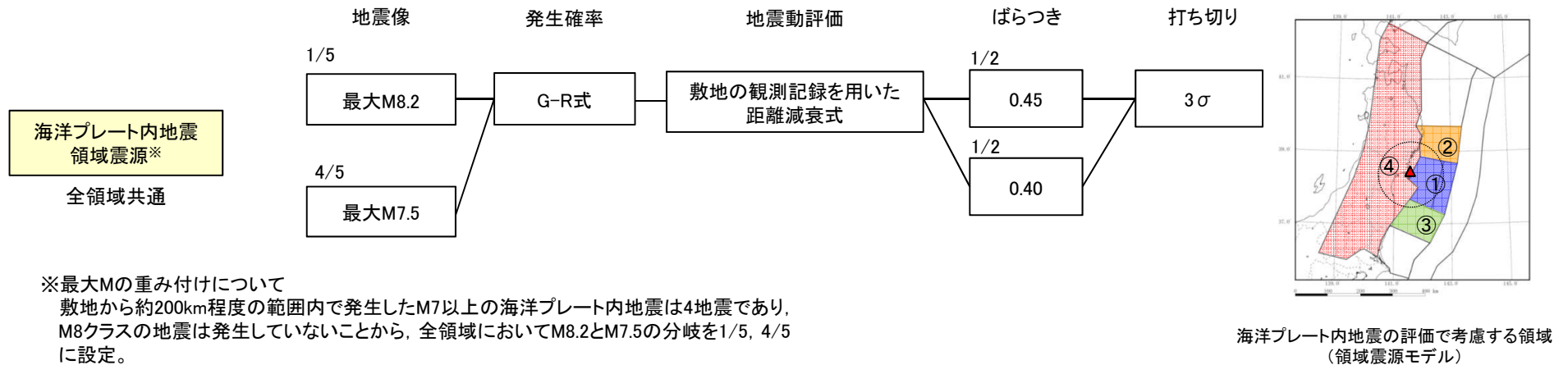
地震本部(2012)に示されている①領域「宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り」で過去に発生した地震の規模を参照して, 最大マグニチュードの重み付けを設定。具体的には, M8を超えるものをモデル2のM8.4, M7クラスをモデル1のM8.0に置き換え, 分岐を1/8と7/8に設定。②領域「三陸沖中部」と③領域「福島県沖」にも準用。

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(11/18)

ロジックツリーの作成(海洋プレート内地震, 内陸地殻内地震の領域震源)

④ロジックツリーの作成

・判断が分かれる項目, 評価方法が複数存在する項目等について分岐を設定し, ロジックツリーを作成。

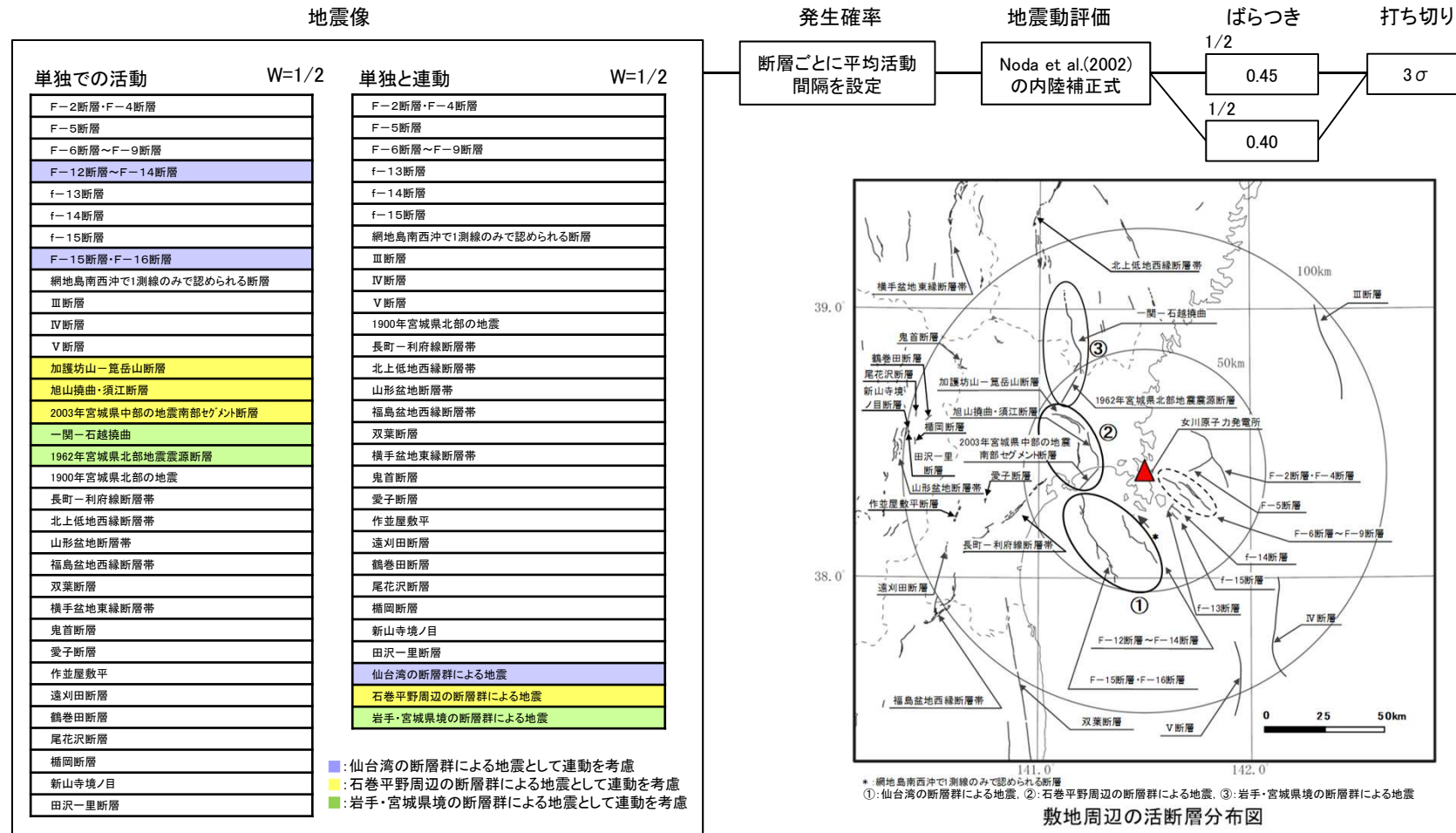


1. 基準地震動の年超過確率の参照について(12/18)

ロジックツリーの作成(内陸地殻内地震の特定震源[活断層])

④ロジックツリーの作成

・判断が分かれる項目, 評価方法が複数存在する項目等について分岐を設定し, ロジックツリーを作成。

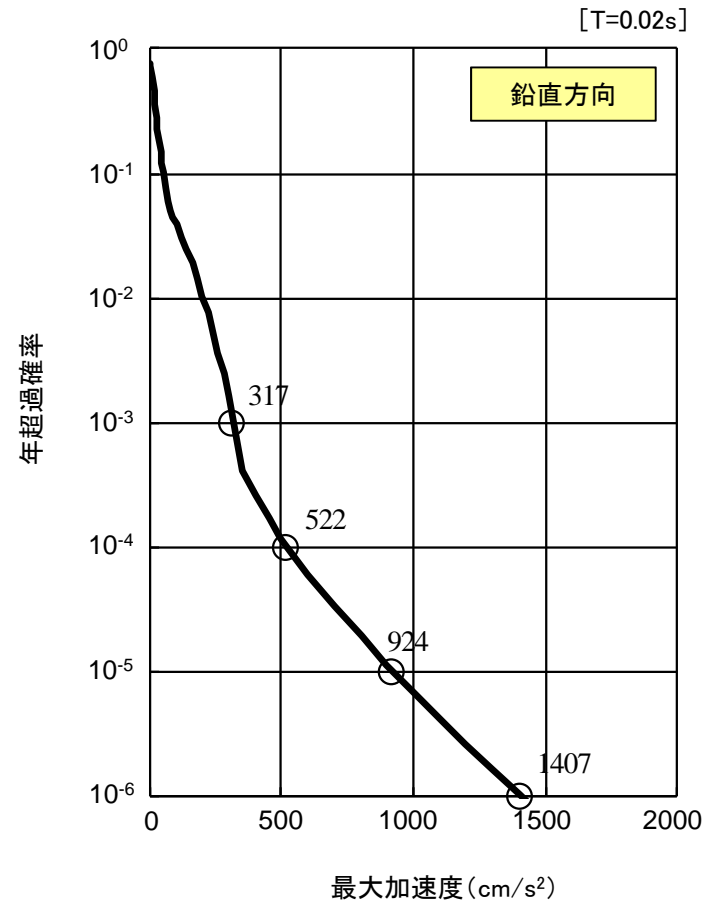
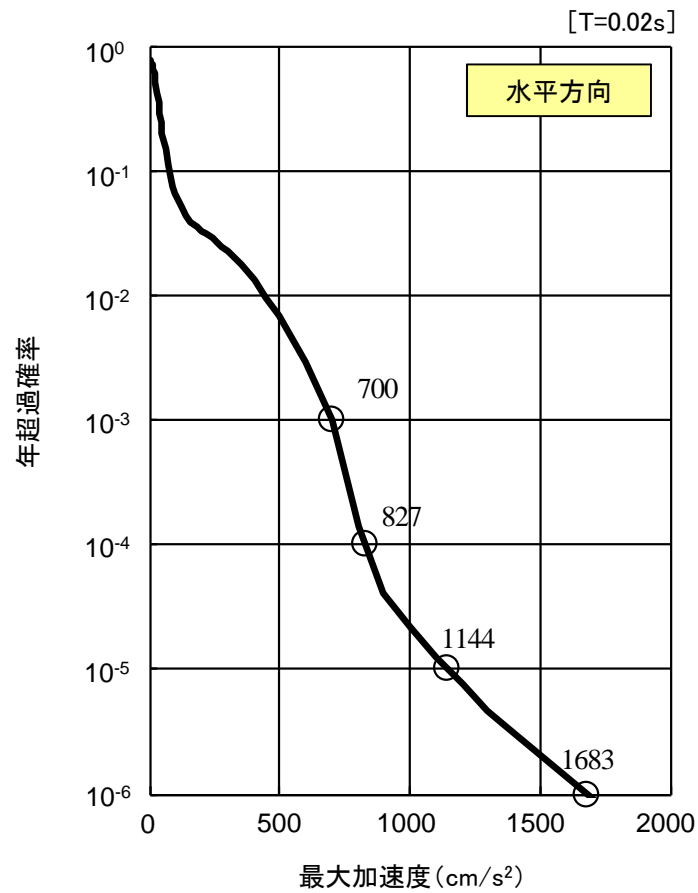


1. 基準地震動の年超過確率の参照について(13/18)

平均ハザード曲線

⑤ 総合的な地震ハザード曲線の算出

・③の地震ハザード曲線, ④のロジックツリーから, 総合的な地震ハザード曲線を算出。

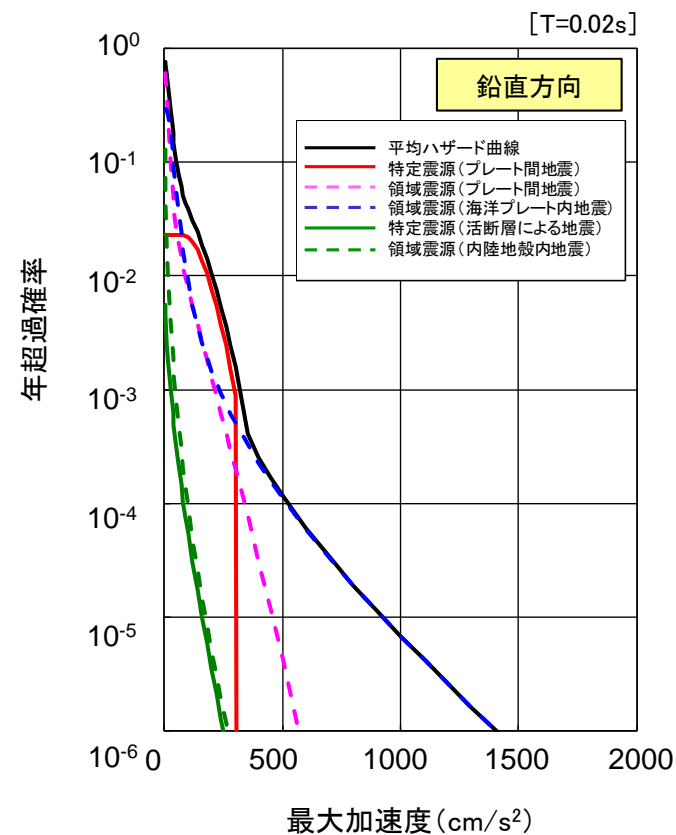
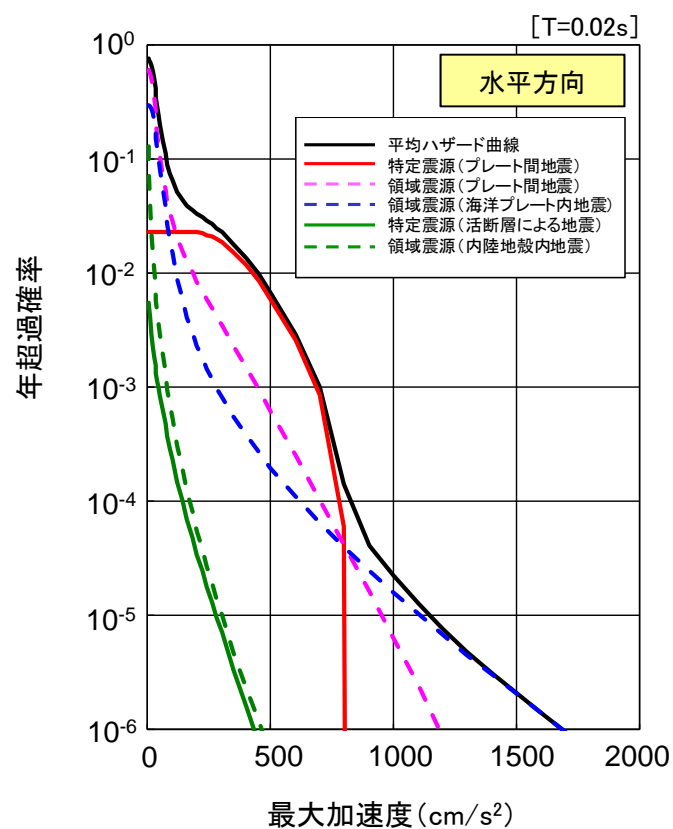


1. 基準地震動の年超過確率の参照について(14/18)

平均ハザード曲線(震源別の寄与の確認)

⑤ 総合的な地震ハザード曲線の算出

・③の地震ハザード曲線, ④のロジックツリーから, 総合的な地震ハザード曲線を算出。



年超過確率 10^{-4} 程度まではプレート間地震の特定震源が支配的であり, 年超過確率が 10^{-5} 程度より低い範囲では海洋プレート内地震の領域震源が支配的である。

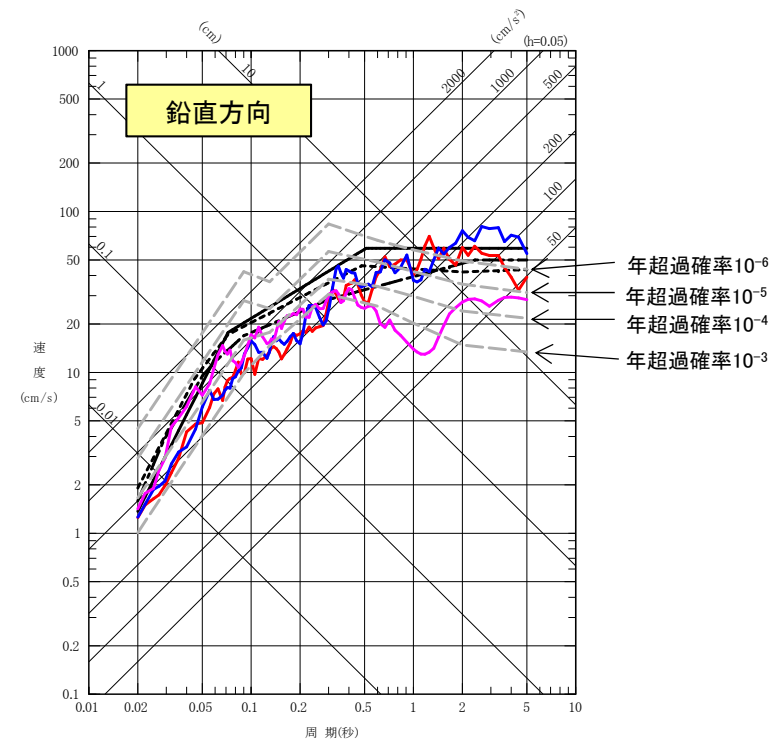
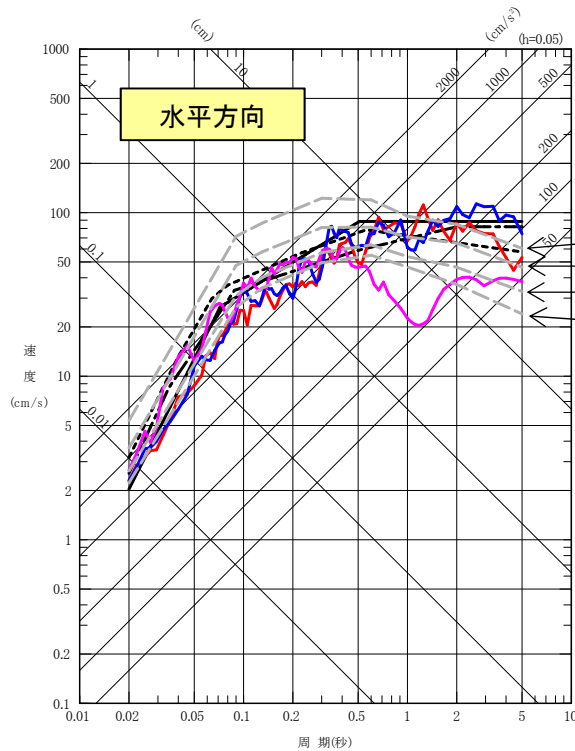
1. 基準地震動の年超過確率の参照について(15/18)

一様ハザードスペクトルと基準地震動S_sの比較

⑥ 年超過確率の参照

・⑤から一様ハザードスペクトルを求め、基準地震動と比較。

- 基準地震動S_s-D1 [プレート間地震の応答スペクトル手法による基準地震動]
- - - 基準地震動S_s-D2 [海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の応答スペクトル手法による基準地震動]
- · - 基準地震動S_s-D3 [海洋プレート内地震(SMGA地殻内)の応答スペクトル手法による基準地震動]
- 基準地震動S_s-F1 [プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動(応力降下量(短周期レベル)の不確かさ)]
- 基準地震動S_s-F2 [プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動(SMGA位置と応力降下量(短周期レベル)の不確かさの重畳)]
- 基準地震動S_s-F3 [海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の断層モデル手法による基準地震動(SMGAマントル内集約)]



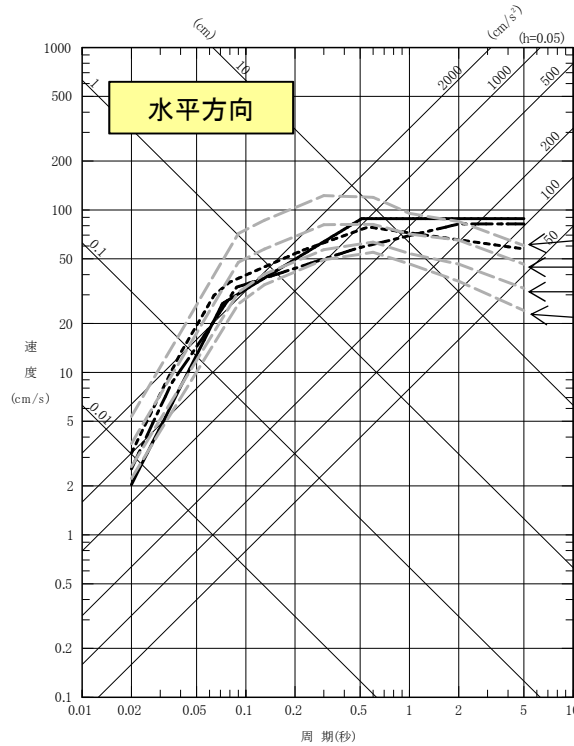
1. 基準地震動の年超過確率の参照について(16/18)

一様ハザードスペクトルと基準地震動S_sの比較(応答スペクトル手法)

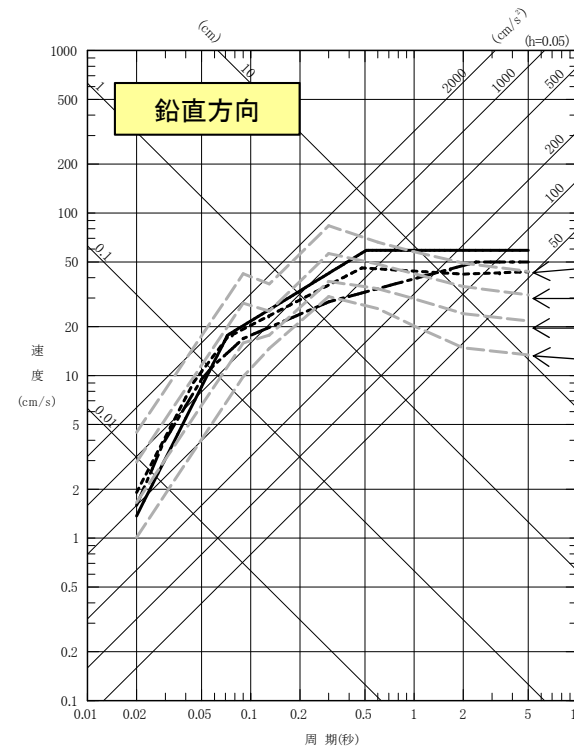
⑥ 年超過確率の参照

・⑤から一様ハザードスペクトルを求め, 基準地震動と比較。

- 基準地震動S_s-D1 [プレート間地震の応答スペクトル手法による基準地震動]
- - - 基準地震動S_s-D2 [海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の応答スペクトル手法による基準地震動]
- · - 基準地震動S_s-D3 [海洋プレート内地震(SMGA地殻内)の応答スペクトル手法による基準地震動]



年超過確率 10^{-6}
 年超過確率 10^{-5}
 年超過確率 10^{-4}
 年超過確率 10^{-3}



年超過確率 10^{-6}
 年超過確率 10^{-5}
 年超過確率 10^{-4}
 年超過確率 10^{-3}

短周期側で最も大きい基準地震動S_s-D2の応答スペクトルは短周期側で $10^{-4} \sim 10^{-6}$ の一様ハザードスペクトル程度であり, 長周期側で最も大きい基準地震動S_s-D1の応答スペクトルは周期1秒より長周期では 10^{-6} の一様ハザードスペクトルを超えている。

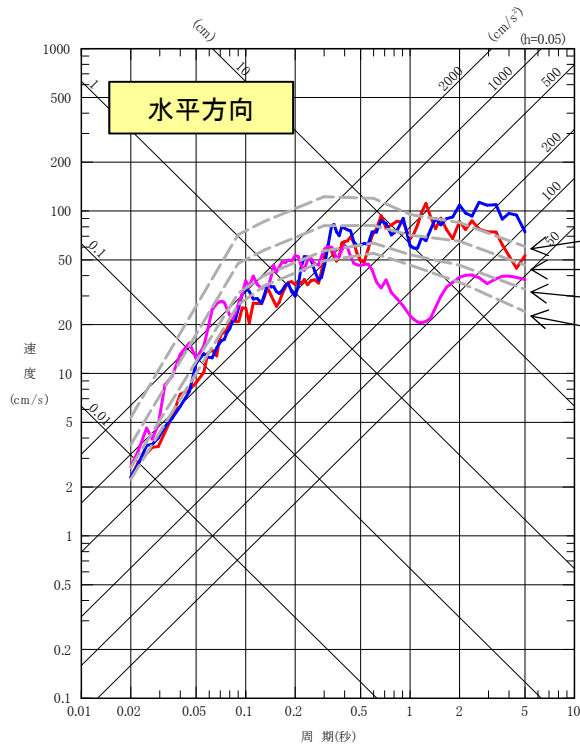
1. 基準地震動の年超過確率の参照について(17/18)

一様ハザードスペクトルと基準地震動S_sの比較(断層モデル手法)

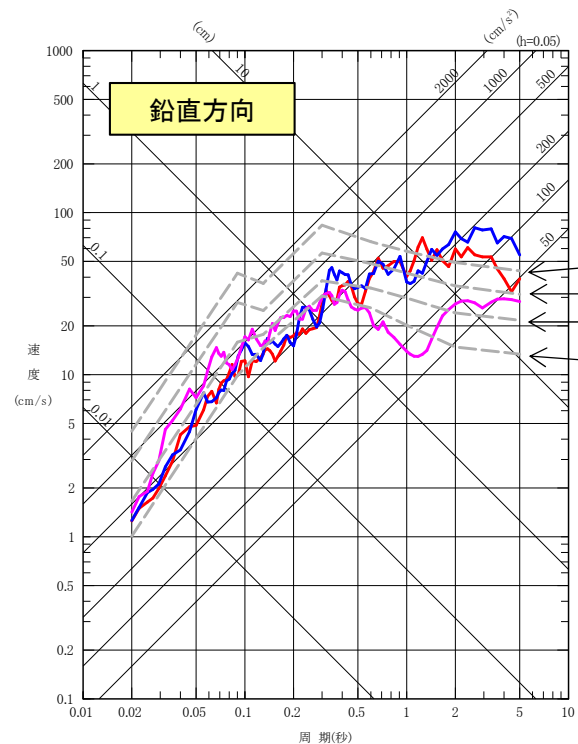
⑥ 年超過確率の参照

・⑤から一様ハザードスペクトルを求め、基準地震動と比較。

- 基準地震動S_s-F1 [プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動(応力降下量(短周期レベル)の不確かさ)]
- 基準地震動S_s-F2 [プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動(SMGA位置と応力降下量(短周期レベル)の不確かさの重量)]
- 基準地震動S_s-F3 [海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の断層モデル手法による基準地震動(SMGAマントル内集約)]



年超過確率10⁻⁶
 年超過確率10⁻⁵
 年超過確率10⁻⁴
 年超過確率10⁻³



年超過確率10⁻⁶
 年超過確率10⁻⁵
 年超過確率10⁻⁴
 年超過確率10⁻³

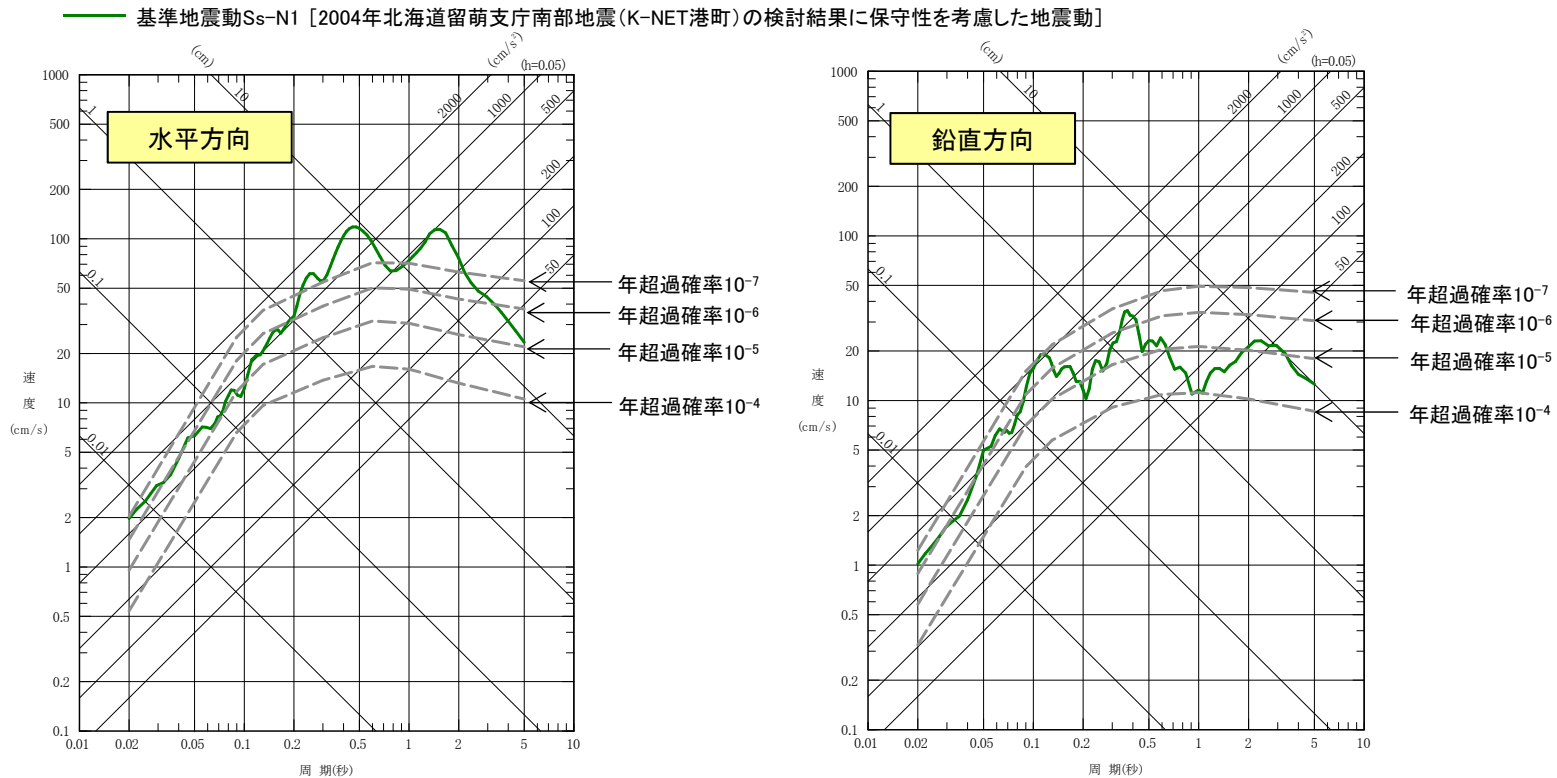
基準地震動S_s-F1, F2は、基準地震動S_s-D1を超過する帯域において10⁻⁶の一様ハザードスペクトルを超えている。また、基準地震動S_s-F3は基準地震動S_s-D2に包絡されており、短周期側では概ね10⁻⁴の一様ハザードスペクトル程度である。

1. 基準地震動の年超過確率の参照について(18/18)

一様ハザードスペクトルと基準地震動S_sの比較(震源を特定せず)

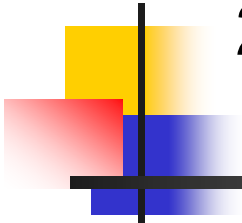
⑥ 年超過確率の参照

・⑤から一様ハザードスペクトルを求め, 基準地震動と比較。



※一様ハザードスペクトルは, 内陸地殻内地震の領域震源モデル(8B, 8C)による

内陸地殻内地震の領域震源モデルによる一様ハザードスペクトルとの比較によれば, 基準地震動S_s-N1の応答スペクトルは, 水平方向の周期0.2~2秒付近では 10^{-7} の一様ハザードスペクトルを超え, その他の周期帯では 10^{-5} ~ 10^{-7} の一様ハザードスペクトル程度である。また, 鉛直方向では全周期帯で 10^{-4} ~ 10^{-7} の一様ハザードスペクトル程度である。



2. 3.11型地震の断層の 破壊の仕方の違いについて

2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて (1/7)

○質問

3.11型地震について、断層の破壊の仕方(破壊開始点)の違いについて、影響がないか確認してほしい。

■破壊開始点の違いによる影響の確認

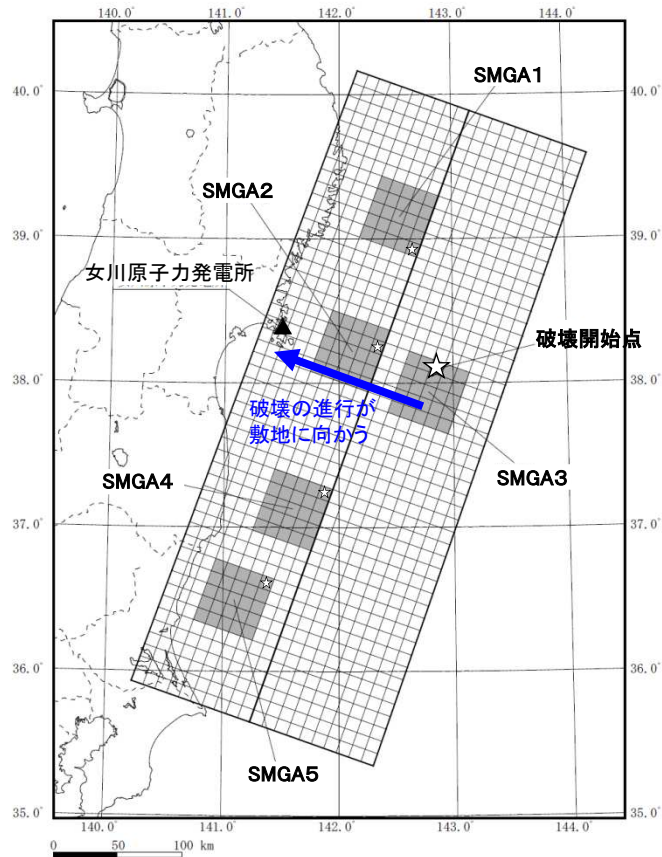
- 3.11型地震の断層モデルについては、3.11地震の破壊開始点としている。これは、破壊の伝播方向が敷地に向かう配置であり、保守的な設定となっている。
- また、敷地への影響が最も支配的なのはSMGA2だが、その破壊について最も厳しい位置となっていることから、破壊開始点を変更しても大きな影響は無いと考えられるが、以下のケースを想定することにより、その検証を行う。

〔検討ケース〕

- ①破壊開始点を、北端(三陸沖)、南端(茨城県沖)にしたケース
- ②過去の地震(1978年宮城県沖地震)から破壊するケース
- ③SMGA2とSMGA3が同じタイミングで破壊するケース
- ④SMGA2の破壊開始点を北端・南端へ変更したケース

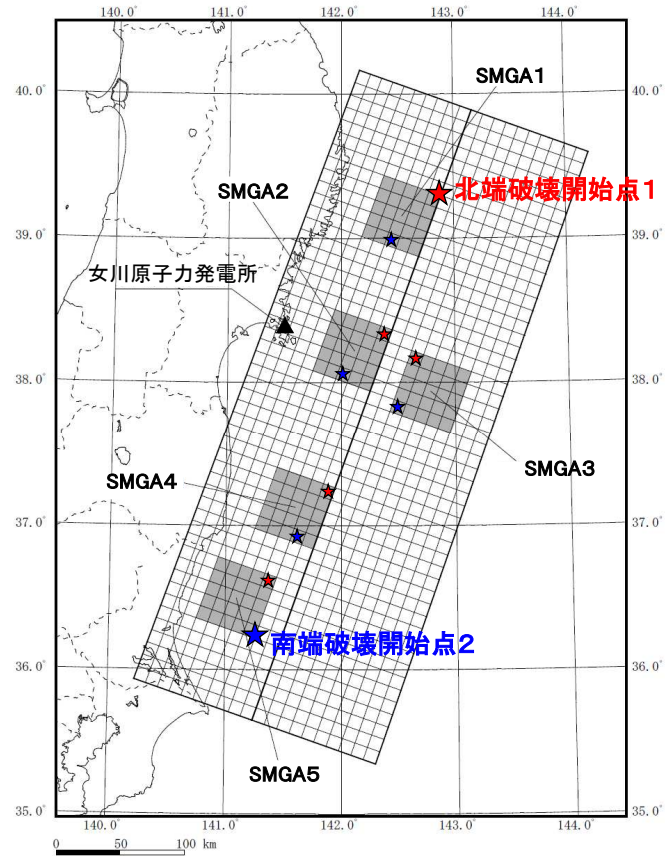
2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて (2/7)

➤ 基本ケースと検討ケース①



○基本ケースの断層モデル

- : 強震動生成域 (SMGA)
- ☆ : 破壊開始点

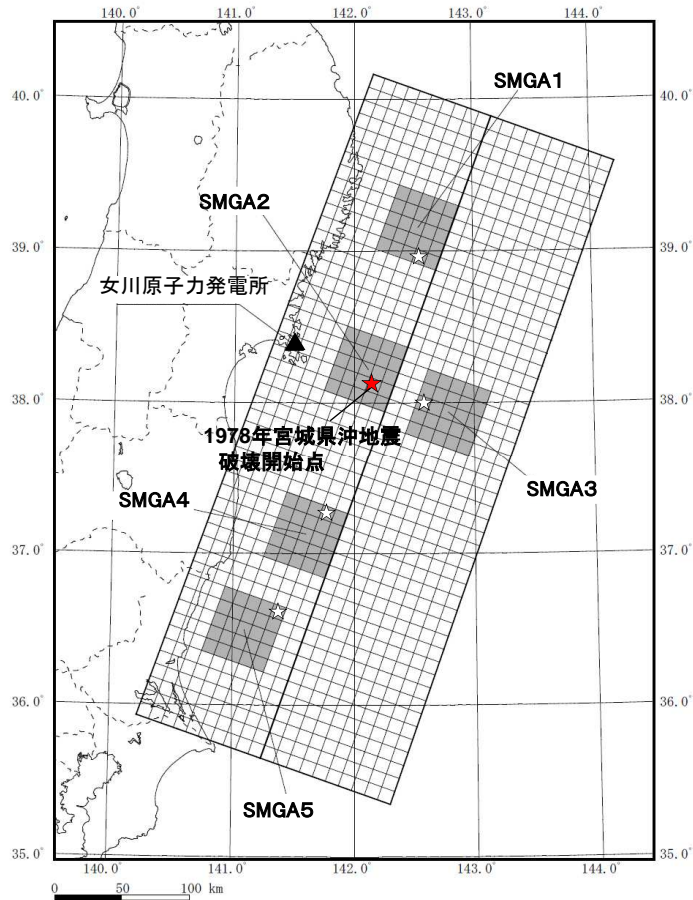


①破壊開始点を、北端(三陸沖)、南端(茨城県沖)にしたケース

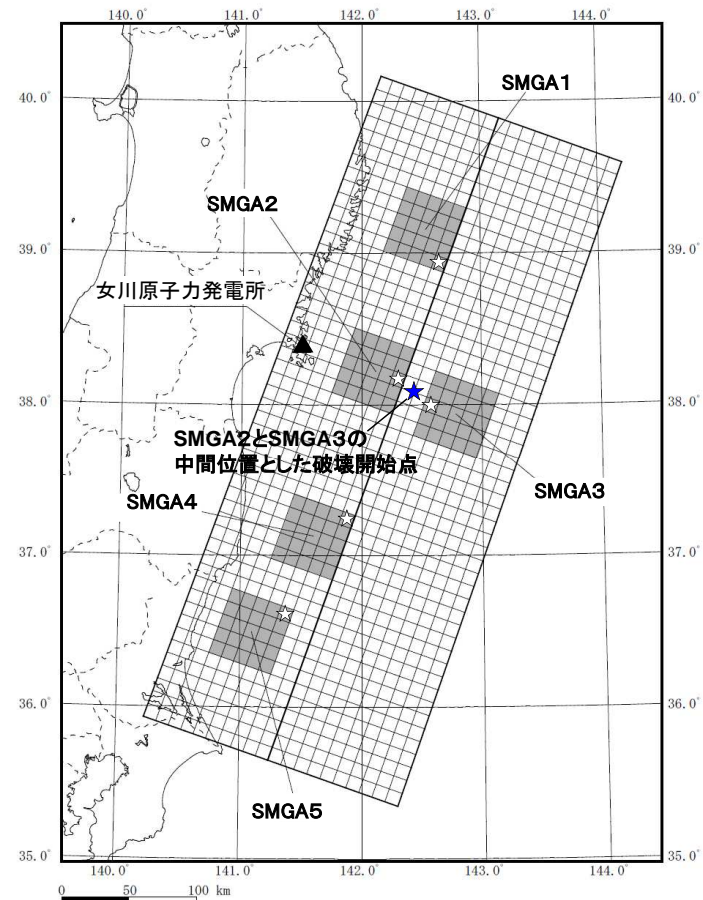
- : 強震動生成域 (SMGA)
- ☆ : 破壊開始点 (赤は破壊開始点1, 青は破壊開始点2に対応)

2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて (3/7)

➤ 検討ケース②, 検討ケース③



②1978年宮城県沖地震の破壊開始点を考慮した場合

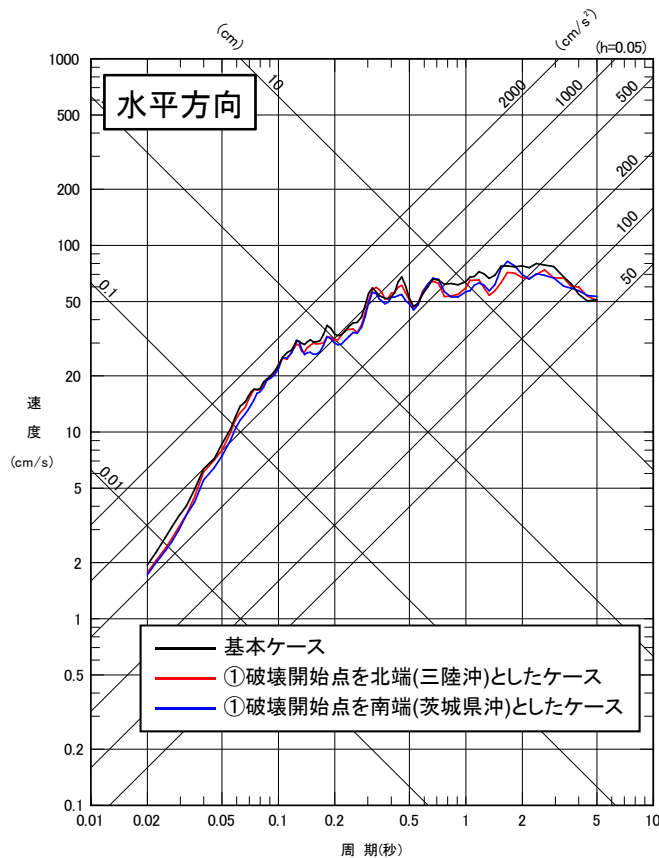


③SMGA2とSMGA3の中間位置を破壊開始点とした場合 (2つのSMGAが同じタイミングで破壊した場合の影響)

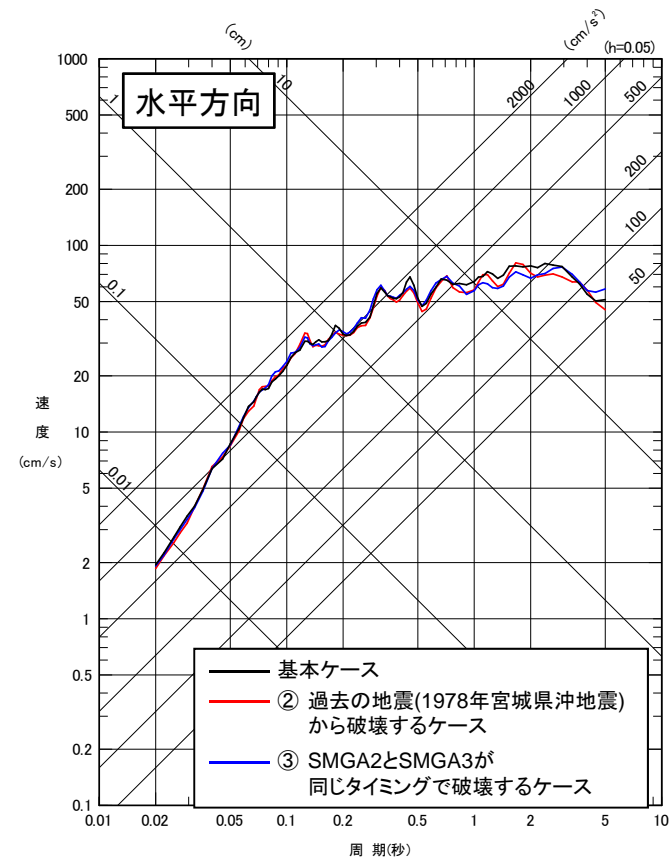
■ : 強震動生成域 (SMGA), ☆ : 破壊開始点

2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて (4/7)

- 破壊開始点を北端(三陸沖), 南端(茨城県沖), 過去の地震, SMGA2と3の同時破壊において, 違いが小さいことを確認した。



ケース①破壊開始点を, 北端(三陸沖),
南端(茨城県沖)としたケース



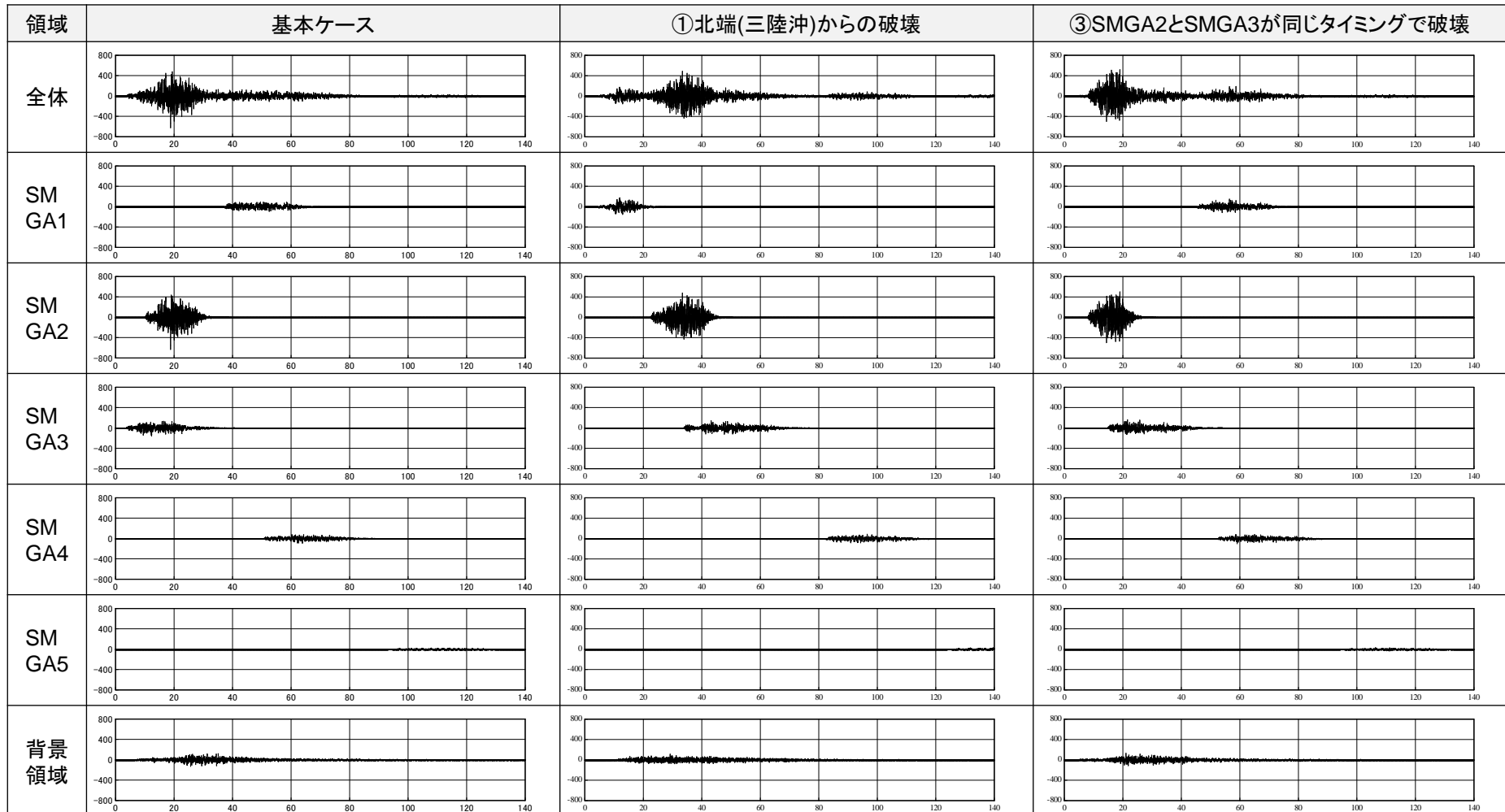
ケース②・③の過去の地震などを参考に
破壊開始点を変更したケース

平均応答スペクトルの比較

2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて (5/7)

➤ SMGA2の影響が支配的であるため、各領域の波形の重なりの影響が小さいことを確認した。

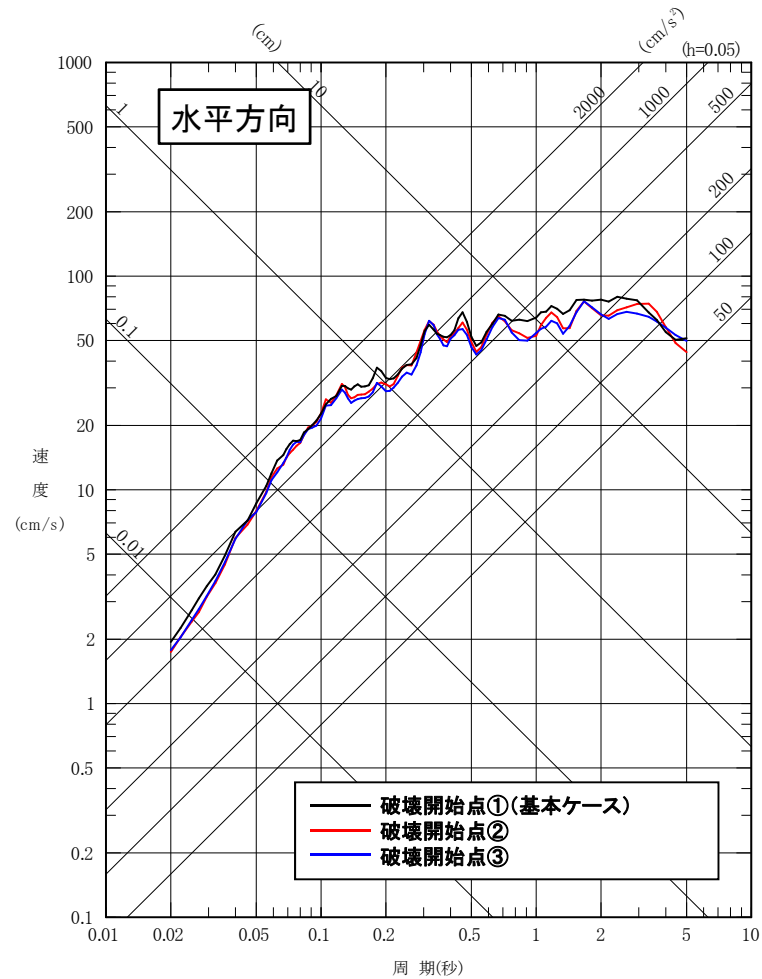
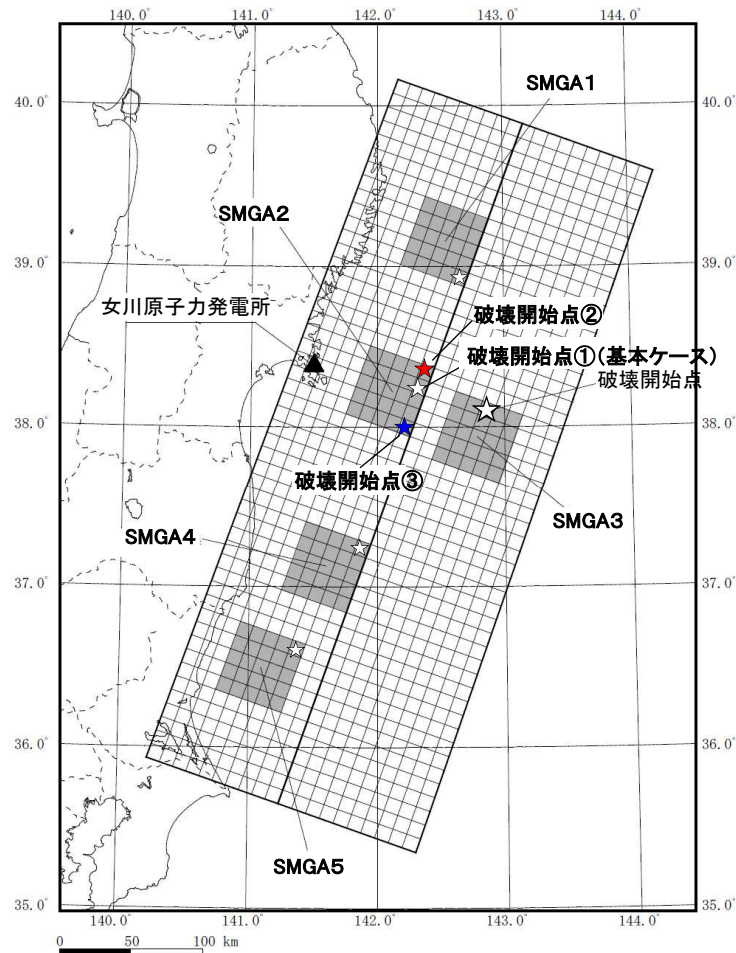
■各領域別の加速度時刻歴波形の例(水平方向)



2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて (6/7)

➤ 検討ケース④

SMGA2の影響が支配的であることから、SMGA2の破壊開始点を北端・南端へ変更したケースについて確認したが、その影響は小さい。



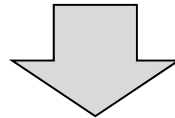
破壊開始点の違いによる基本ケースとの比較
(平均応答スペクトル)

ケース④SMGA2の破壊開始点を北端・南端へ変更したケース

2. 3.11型地震の断層の破壊の仕方の違いについて (7/7)

○破壊開始点のまとめ

- ・基本ケースの断層モデルを用いて破壊開始点の位置の違いによる影響の検討を行った結果、破壊が敷地に向かう位置に設定した基本ケースは、他ケースと比較して大きな違いがないことを確認した。



破壊開始点の位置については、破壊が敷地に向かう位置となっていることから、基本ケースにあらかじめ不確かさが考慮されている。



3. 基準地震動Ss-D1の模擬地震波の 継続時間について

3.基準地震動Ss-D1の模擬地震波の継続時間について (1/6)

○質 問

基準地震動(Ss-D1)の模擬地震波の継続時間の考え方について、保守性も踏まえ適切なものか説明してほしい。

■ Ss-D1(3.11型地震)の模擬地震波の作成内容について

- 設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波の経時特性は、距離減衰式^{※1}であるNoda et al.(2002)の方法に基づき、地震規模(M)、等価震源距離(Xeq)^{※2}をパラメータとして設定。
- 地震規模は、内閣府(2012)の距離減衰式から求められる3.11地震の地震規模などを参考に保守的に設定。
- 等価震源距離は、3.11型地震の断層モデル(500km×200km)に基づき設定。

※1 距離減衰式:地震の規模と震源からの距離との関係により、想定される地震による揺れの最大加速度や応答スペクトルを経験的に求める手法。

※2 等価震源距離:拡がりを持つ震源断層面からの地震波エネルギーと同じエネルギーを持つ点震源までの距離。

■ Noda et al.(2002)における経時特性の設定について

- Noda et al.(2002)の設定根拠について、その基となる奈良岡ほか(1999)によれば、実際の観測記録を基に保守的な方法^{※3}により定めている。

※3 多数の観測記録(155地震)の平均的経時特性を調査し、強震部はMに、減衰部はMとXeqに大きく依存していることを確認。強震部の設定は、理論的な背景を踏まえ、回帰分析による平均値+標準偏差を考慮した設定としている。

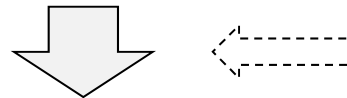
3.基準地震動Ss-D1の模擬地震波の継続時間について (2/6)

■基準地震動Ss-D1の振幅包絡線の設定に用いるマグニチュード(M)

- ・基準地震動Ss-D1の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波作成に関し、Noda et al.(2002)の方法に基づく振幅包絡線の設定に必要なマグニチュード(M)と等価震源距離(X_{eq})については、より継続時間が長くなるように検討用地震である3.11型地震を考慮し設定する。

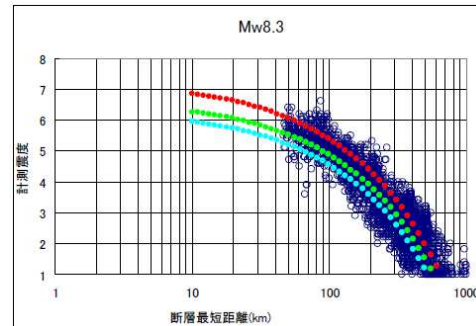
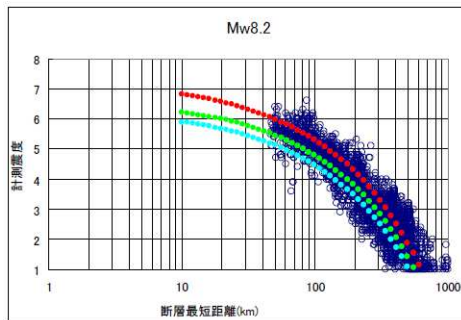
【Mの設定】

- ・内閣府(2012)では、3.11地震において、距離減衰式から求められる地震規模 M_w は「8.2~8.3程度」であり、すべり量や応力降下量など断層運動から求められる地震規模 $M_w 9.0$ と比べると相当小さい値となっているとしている。
- ・司ほか(2016)では、断層最短距離を用いる場合、 $M_w 9$ クラスの3.11地震による地震動最大値の平均的強さは $M_w 8$ クラスのそれと同程度であるとしている。

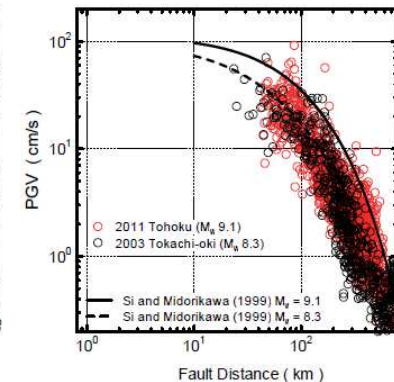
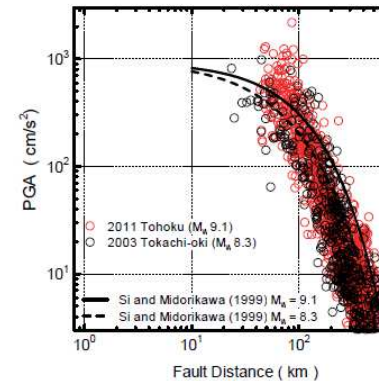


神田ほか(2012)では、3.11地震の本震波形記録全体を用いた震度インバージョン解析では $M_i=8.3$ であった。

$M_w=M$ とみなし、 $M 8.3$ を考慮する。



- 東北地方太平洋沖地震の観測震度
- 距離減衰(AVS150m/s)
- 距離減衰(AVS400m/s)
- 距離減衰(AVS700m/s)



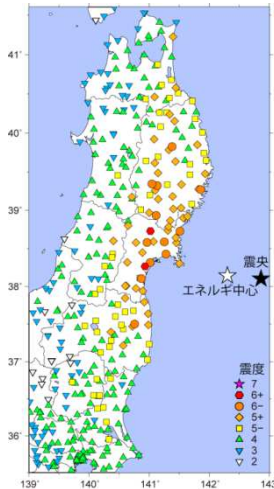
3.11地震と2003年十勝沖地震のPGA, PGVの距離減衰の比較(司ほか(2016))

3.11地震の震度の距離減衰(内閣府(2012))

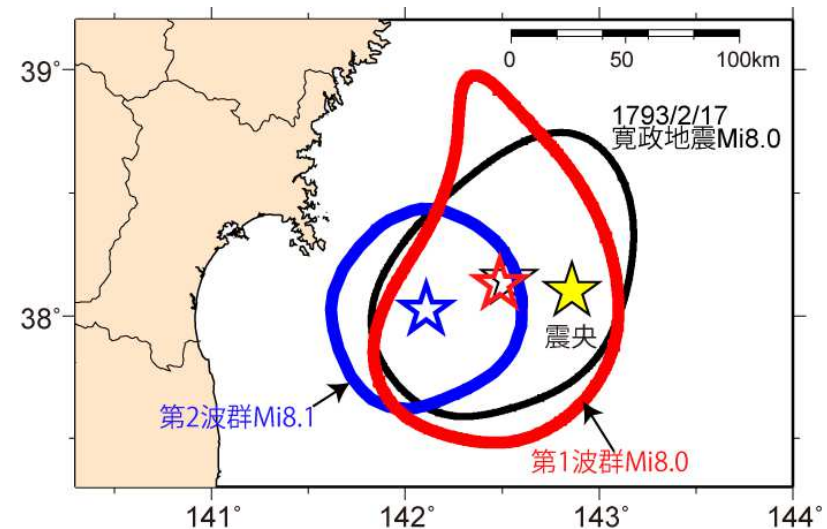
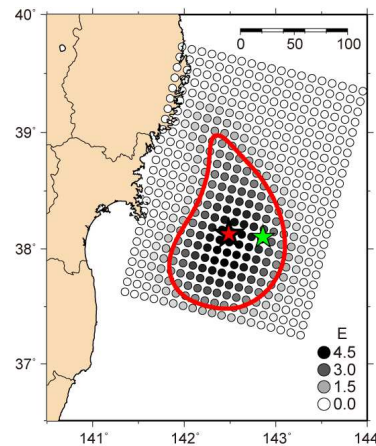
3.基準地震動Ss-D1の模擬地震波の継続時間について (3/6)

■3.11地震の震度インバージョン

- ・神田ほか(2012)では, 2つの波群についてそれぞれの波群を分離し, 震度インバージョンを実施している。
- ・結果としては, 第1波群 $M_i=8.0$, 第2波群 $M_i=8.1$ となり, それぞれの波群のマグニチュードはM8前半であった。

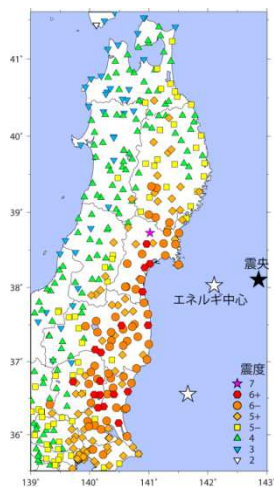


第1波群の震度分布と短周期エネルギー放出分布

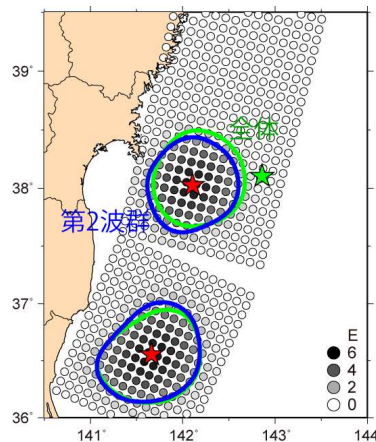


第1波群, 第2波群ともM8前半

※波群を分離せず, 波形全体を用いた場合には, $M_i=8.3$ となる。



第2波群の震度分布と短周期エネルギー放出分布



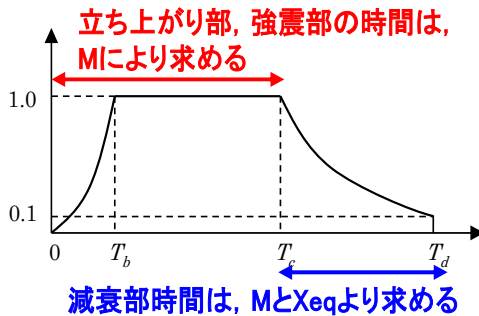
3. 基準地震動Ss-D1の模擬地震波の継続時間について (4/6)

■ 模擬地震波の作成: 振幅包絡線の経時的変化

- 基準地震動Ss-D1の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波は、乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって作成するものとし、振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al.(2002)の方法(下左図)に基づき、下記に示す形状とする。
- Mは内閣府(2012)等を保守的に参照し、等価震源距離はプレート間地震(基本ケース)の断層モデル(下中図)に基づき設定した。
- なお、参考に基準地震動Ss-D1と3.11地震の観測記録(NS方向)の比較を下右図に示す。

模擬地震波	最大加速度 (cm/s ²)	マグニチュード M	等価震源距離 Xeq(km)	振幅包絡線の経時的変化(s)		
				Tb	Tc	Td(継続時間)
Ss-D1H	640	8.3	132	16.6	47.5	137.9

○ 振幅包絡線の設定

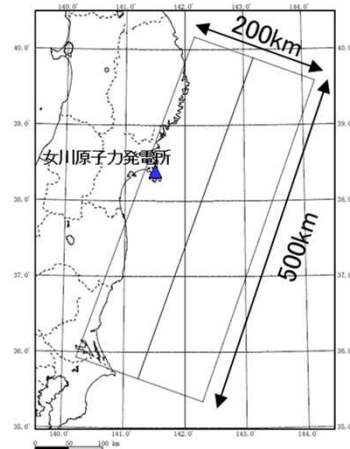


$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

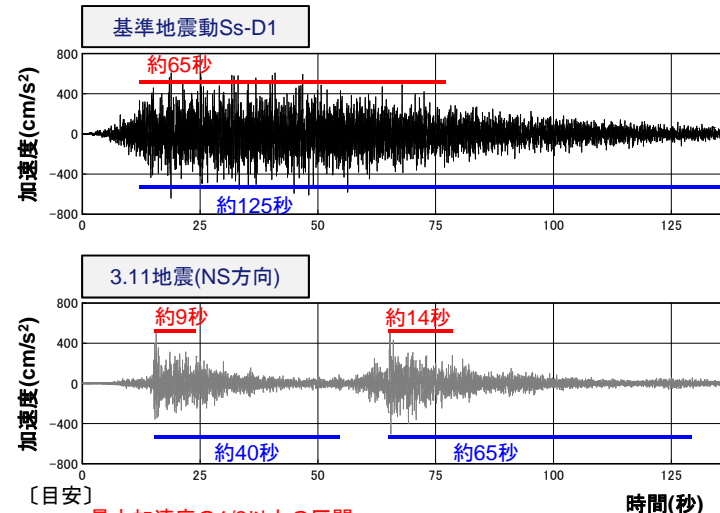
○ 等価震源距離(Xeq)の設定



プレート間地震(基本ケース)の断層モデル(巨視的)

○ [参考] 加速度時刻歴波形の比較

基準地震動Ss-D1が3.11地震の観測記録と比較して、十分な継続時間であることがわかる。



[目安]

— 最大加速度の1/2以上の区間

— 最大加速度の1/10になるまでの区間

3. 基準地震動Ss-D1の模擬地震波の継続時間について (5/6)

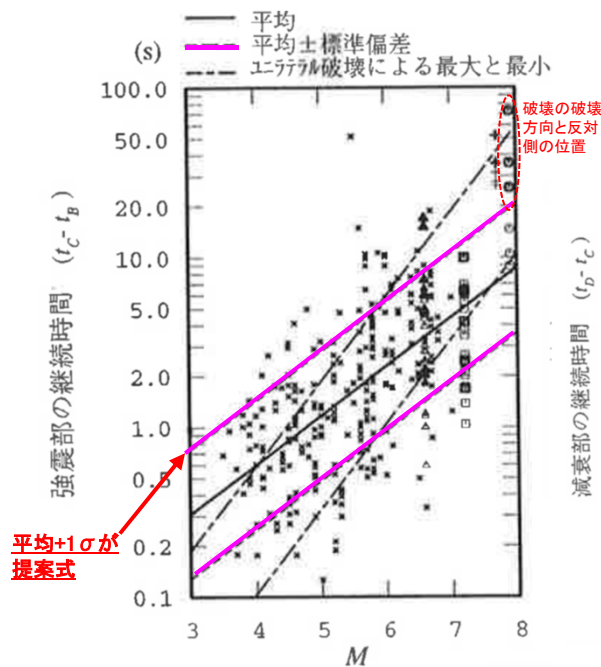
■ Noda et al.(2002)の経時特性について

➤ 奈良岡ほか(1999)によれば、本方法の経時特性は、地盤構造の明確な国内の多数の観測記録(155地震)を用いた平均的な経時特性を調べている。なお、各種強震記録(1979年Imperial Valley地震, 1968年十勝沖地震, 1983年日本海中部地震等)も参考としている。

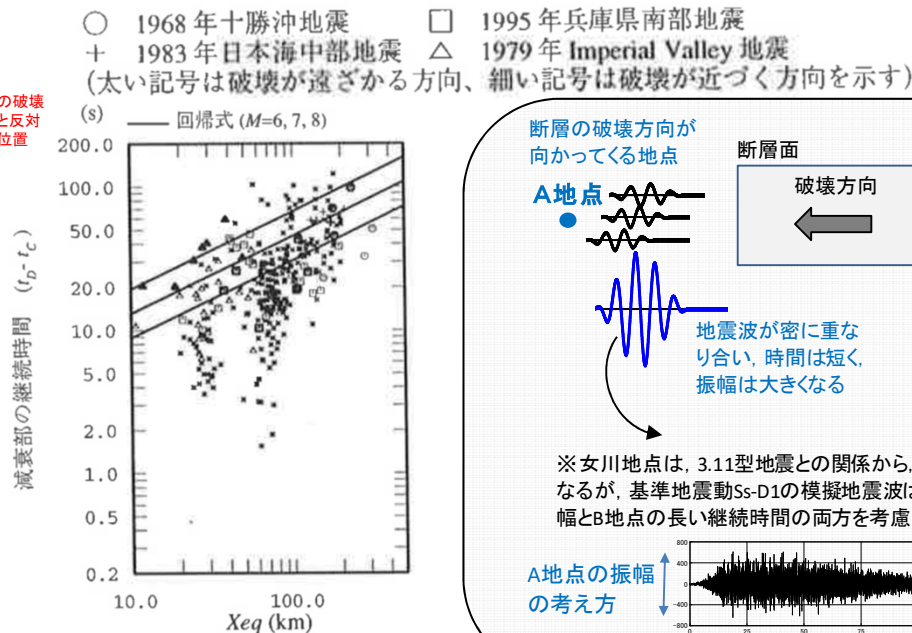
① 強震部の継続時間はMに大きく依存している。また、Mに対するばらつきが比較的大きいが、これは、断層の破壊方向と破壊開始点に対する観測点の位置関係などが考えられるとし、回帰分析による標準偏差と断層破壊の方向のばらつきの幅が概ね対応している。

② 減衰部の継続時間は、Mと等価震源距離に大きく依存している。

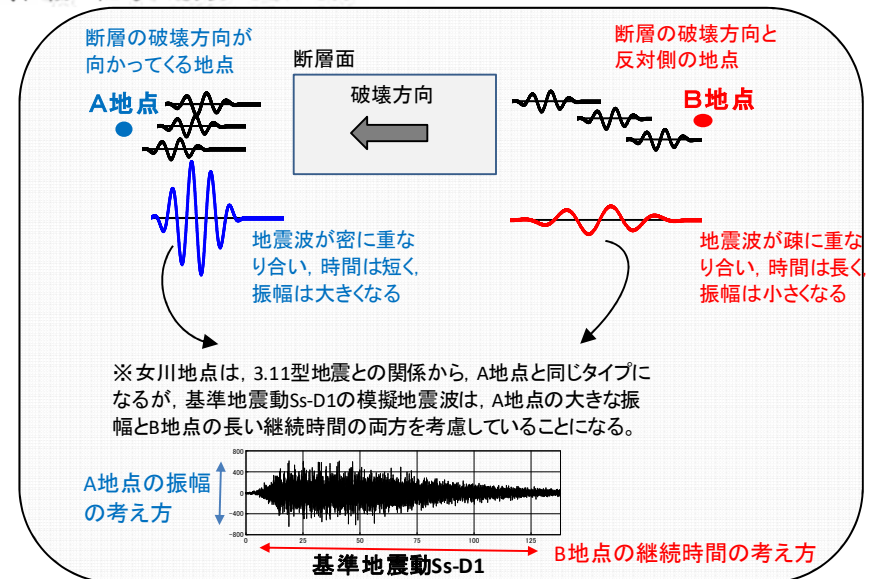
➤ Noda et al.(2002)は、継続時間が長くなるケース(断層の破壊方向と反対側の位置)を考慮した式であるが、3.11型地震において、女川地点は、断層の破壊方向が向かってくる位置にあることから、振幅が大きくかつ継続時間が短くなること、基準地震動Ss-D1は、振幅をそのままに継続時間を長く設定していることとなる(右下のイメージ図、次項の補足を参照)。



強震部の継続時間とマグニチュードとの関係



減衰部の継続時間と等価震源距離との関係
(奈良岡ほか(1999)に一部加筆)

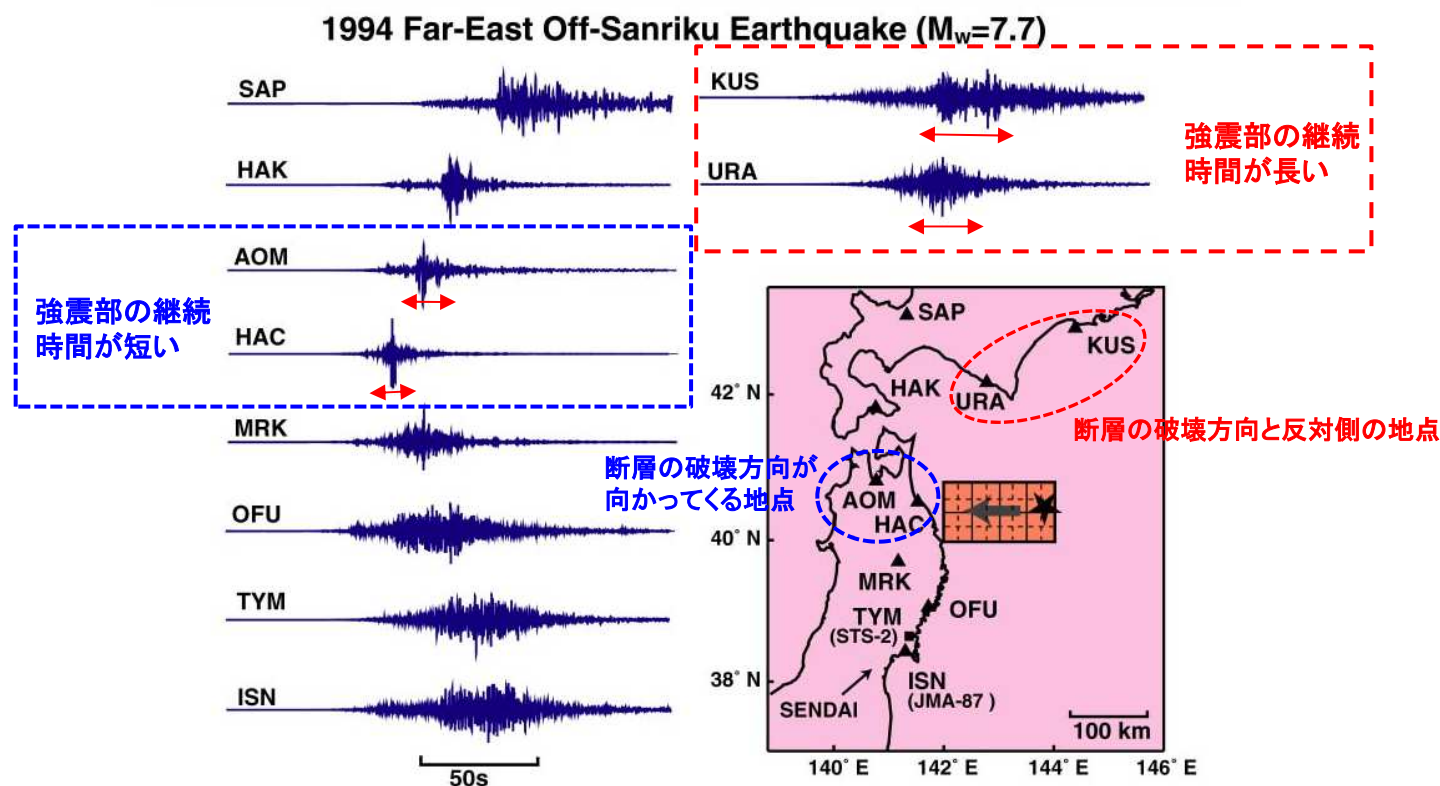


[イメージ図] 断層の破壊する方向と継続時間の関係

[補 足]時刻歴波形 断層の破壊方向と観測地点との関係(6/6)

■強震動の基礎 (防災科学研究所, ウェブテキスト2000版)

- 1994年三陸はるか沖地震の概要について述べられている。
- 破壊進行の正面に当たる八戸では、最大604galという加速度を記録したと、報告されている。
- なお、各地点の時刻歴波形をみると、断層の破壊方向が向かってくる地点は継続時間が短く、断層の破壊方向と反対側の地点は長い。



Directivity in EW-component Velocity Seismograms (>1Hz) Max 604gal at HAC

1994年12月28日三陸はるか沖地震の速度波形記録
 (東西動で、1Hzより高周波数成分、最大振幅で規格化して表示) (一部、加筆)

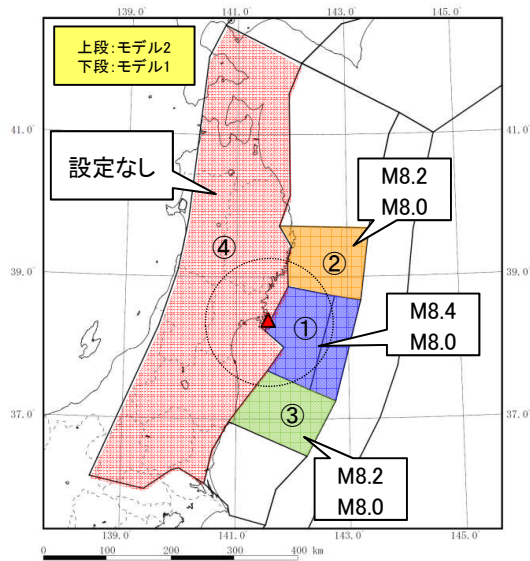


〔参 考〕 基準地震動の年超過確率

[参考]最大マグニチュードの重み付け(プレート間地震)

【最大マグニチュードの重み付け】

- 地震本部(2013)のモデル1では、東北地方太平洋沖地震後の影響としてM8.0までの余震の発生を考慮している。また、モデル2では各領域面積から最大マグニチュードを設定している。
- 地震本部(2012)に示されている①領域「宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り」で過去に発生した地震の規模を参照して、最大マグニチュードの重み付けを設定。
⇒M8を超えるものをモデル2のM8.4, M7クラスをモデル1のM8.0に置き換え、分岐を1/8と7/8に設定。※②領域「三陸沖中部」と③領域「福島県沖」にも準用。



領域	最大M	分岐	備考
①宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り	8.4	1/8	余震・余効滑りについて1/2の分岐も考慮
	8.0	7/8	
②三陸沖中部	8.2	1/8	①領域の分岐を準用
③福島県沖	8.0	7/8	

敷地から半径100km以内の領域において考慮する最大マグニチュード

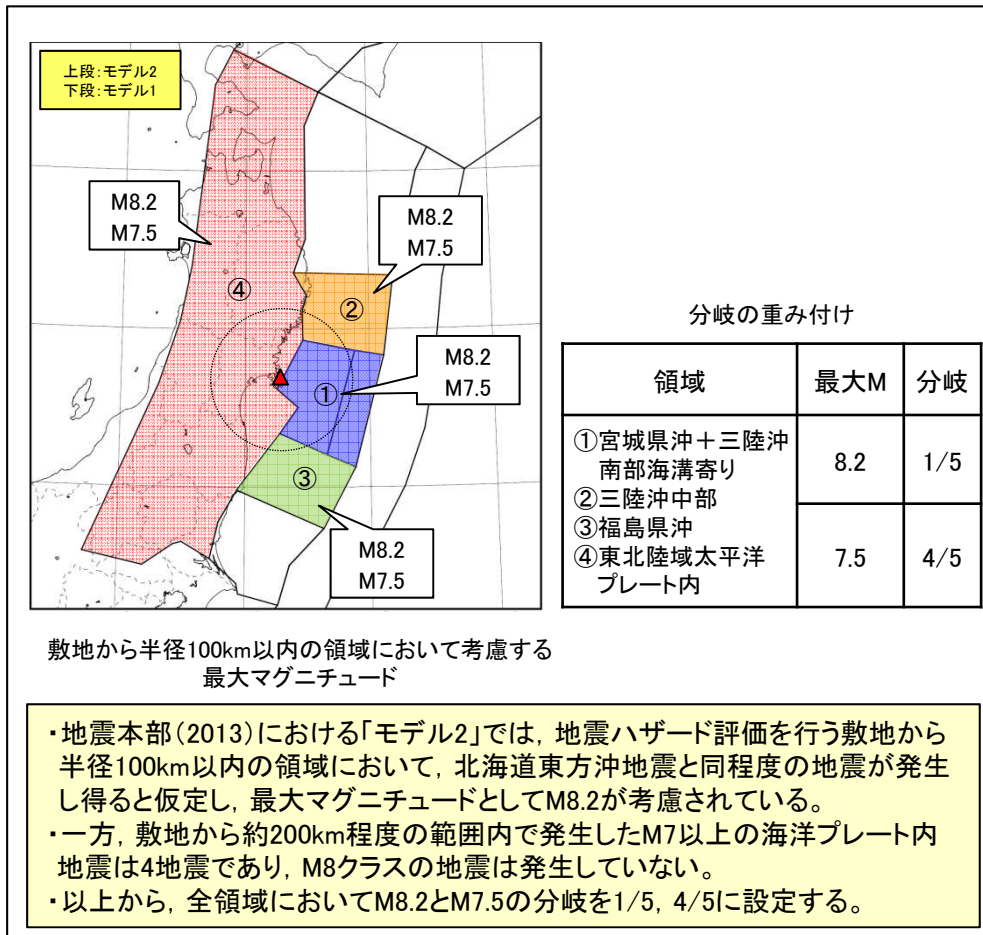
発生年月日	地震名(通称)	宮城県沖 繰り返し	宮城県沖 繰り返し 以外	三陸沖 南部 海溝寄り 繰り返し	三陸沖 南部 海溝寄り 繰り返し 以外	福島県沖	M
2011/3/11 14:46	東北地方 太平洋沖地震	○	○	○	○	○	9.0
869/7/13	貞観地震	○	○	○	○	○	8.3
1897/2/20		○	①				7.4
1933/6/19		○					7.1
1936/11/3		○	②				7.4
1937/7/27		○					7.1
1978/6/12	1978年 宮城県沖地震	○	③				7.4
2005/8/16		○	④				7.2
1898/4/23			○	⑤			7.2
2003/5/26			○				7.1
2011/4/7			○				7.2
1793/2/17		△	△	○	△	①	7.9※
1897/8/5				○		⑥	7.7
1915/11/1					○	⑦	7.5
2011/3/9					○		7.3
1938/11/5	福島県 東方沖地震					○	7.5
1938/11/5						○	7.3
1938/11/6							○

※1793年の地震は三陸沖南部海溝寄りと宮城県沖で連動した可能性があり、連動した場合の地震規模はM8.2程度とされている。

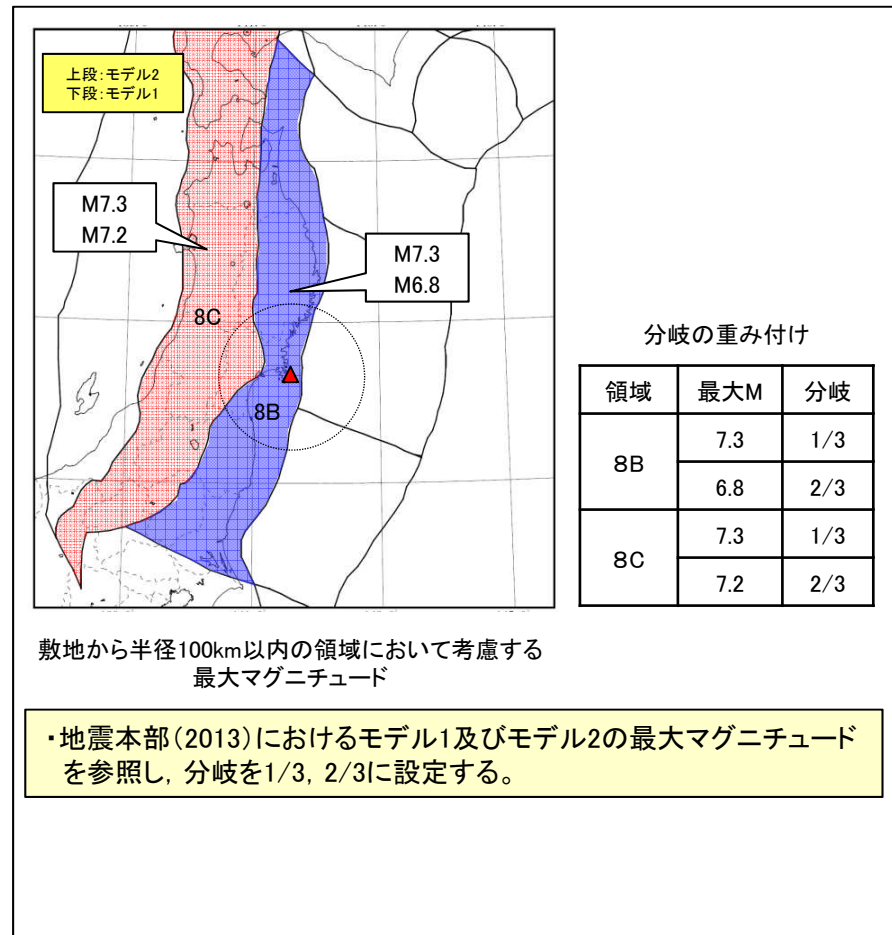
主な地震の発生領域の目安[地震本部(2012)に一部加筆]

[参考]最大マグニチュードの重み付け(海洋プレート内地震, 内陸地殻内地震)

■海洋プレート内地震



■内陸地殻内地震



[参考]Noda et al.(2002)の評価に用いる補正係数(1)

■プレート間地震: 特定震源(東北地方太平洋沖型地震, 宮城県沖地震), 領域震源(①宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り, ②三陸沖中部)

壇ほか(2001)による経験式($A \propto M_0^{1/3}$)を参考に, 観測記録とNoda et al.(2002)の応答スペクトル比を相対的短周期レベル(RSPL: Relative Short Period Level)をパラメータとして表す補正係数を採用した[Hirofumi et al.(2013)]。

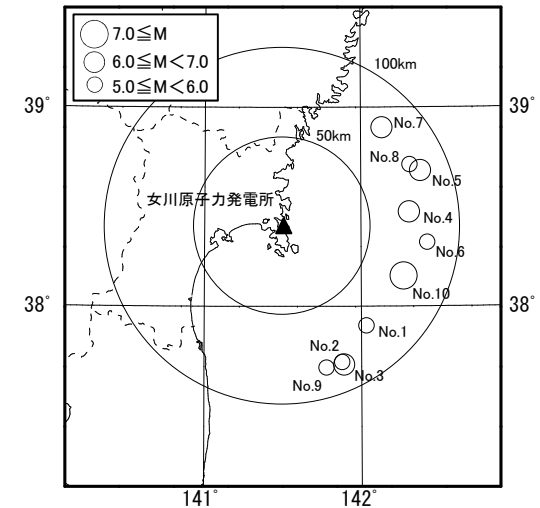
$$RSPL = A / M_0^{1/3}, \quad S(T) = S_T(T) \times R(T)$$

$$\ln R(T) = a(T) \cdot \ln(RSPL) + C(T)$$

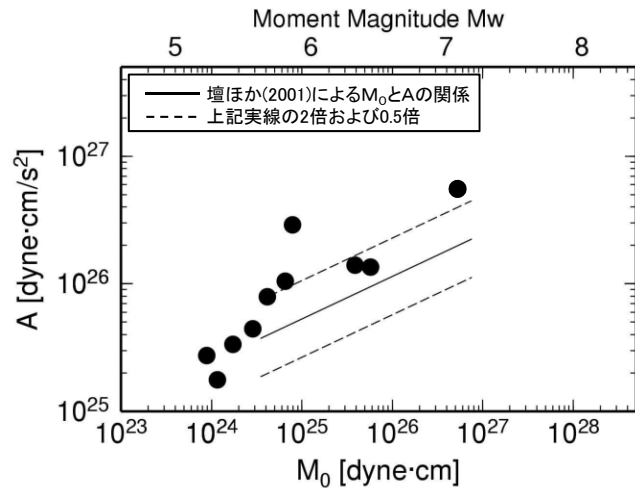
- A : 短周期レベル
- M_0 : 地震モーメント
- $S(T)$: 解放基盤表面の応答スペクトル
- $S_T(T)$: Noda et al.(2002)による地震基盤の応答スペクトル
- $R(T)$: 補正係数
- $a(T)$: 回帰より求めたRSPLに関する係数
- $C_H(T)$: 回帰より求めた水平成分に関する係数
- $C_V(T)$: 回帰より求めた鉛直成分に関する係数

補正係数の策定に用いた地震の諸元

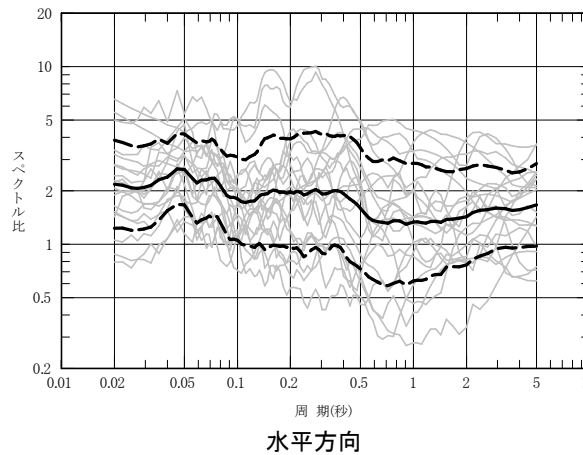
No.	発生日	M	震央距離 (km)	RSPL ($N^{2/3} \cdot m^{2/3} / s^2$)
1	1983年 5月24日	5.8	73	2.80E+17
2	1984年10月27日	5.4	83	1.68E+17
3	1985年 8月12日	6.4	84	3.50E+17
4	1986年 3月 2日	6.0	71	5.61E+17
5	1994年 8月14日	6.0	83	1.46E+18
6	1999年11月15日	5.7	82	3.12E+17
7	2002年11月 3日	6.3	78	4.17E+17
8	2002年12月 5日	5.3	79	2.84E+17
9	2003年 3月 3日	5.9	83	4.90E+17
10	2005年 8月16日	7.2	73	6.40E+17



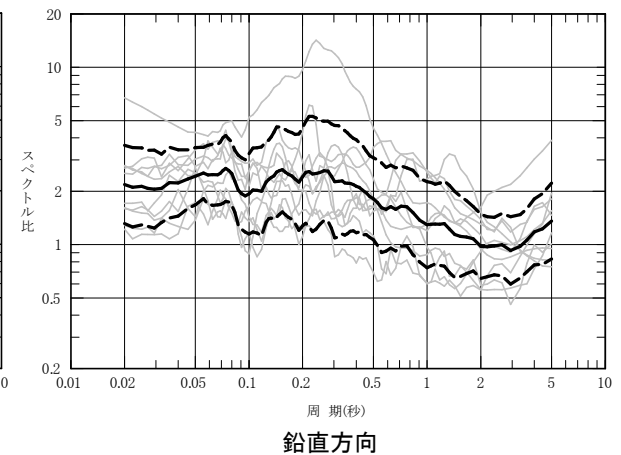
補正係数の策定に用いた地震の震央分布図



補正係数の策定に用いた地震の M_0 -Aの関係



水平方向



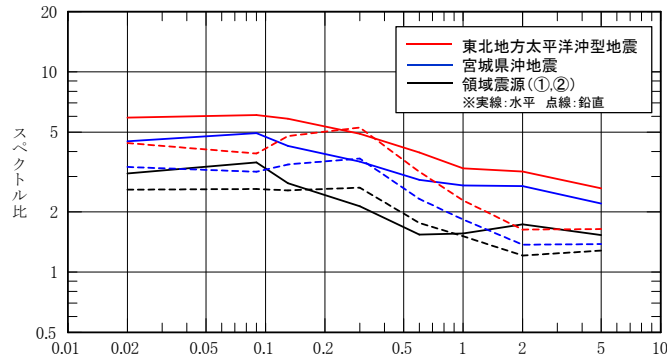
鉛直方向

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

[参考]Noda et al.(2002)の評価に用いる補正係数(2)

対象地震毎の補正係数の策定

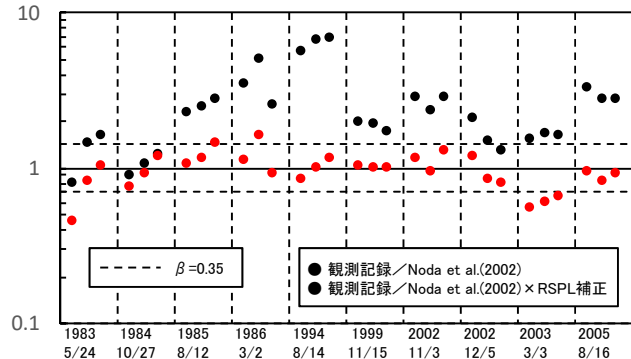
対象地震	採用したRSPL ($N^{2/3} \cdot m^{2/3} / s^2$)	備考
東北地方太平洋沖型地震	8.08E+17	Asano and Iwata (2012) の M_0 , A
宮城県沖地震	5.76E+17	地震本部(2005)の M_0 , A
プレート間地震の領域①, ②	4.16E+17	用いた10地震の平均値



Noda et al.(2002)に用いる補正係数(地震基底)

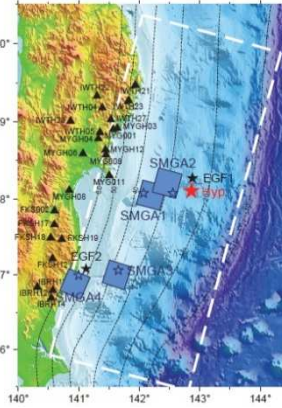
補正前後の比較(最大加速度値)

相対的短周期レベル(RSPL)をパラメータとした補正係数を用いることで、ばらつきが小さくなっていることを確認。



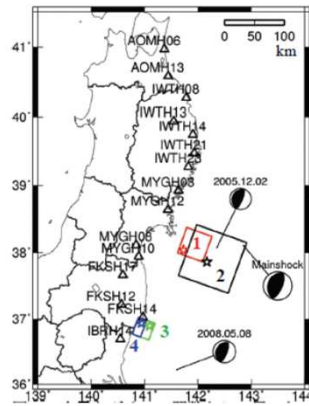
RSPLを用いた補正前後の比較(最大加速度値)
※各地震についてNS,EWおよびUDをプロット

東北地方太平洋沖型地震の評価と3.11地震の観測記録の比較



	L (km)	W (km)	M_0 (Nm)	A ($N \cdot m / s^2$)
SMGA2	36	36	5.33E+20	1.41E+20

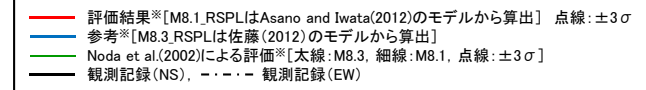
Asano and Iwata (2012)



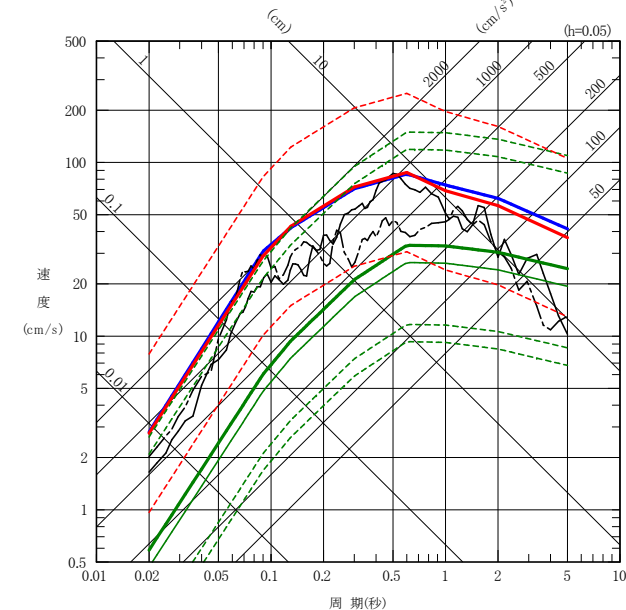
	L (km)	W (km)	M_0 (Nm)	A ($N \cdot m / s^2$)
SMGA2	90	90	7.73E+21	2.64E+20

佐藤 (2012)

- RSPLをパラメータとした補正係数を用いた東北地方太平洋沖型地震の評価と3.11地震の観測記録を比較。
- 地震規模は、神田ほか(2012)における3.11地震の第2波群のマグニチュードを参照し、M8.1を採用。
- RSPLは、各種提案されている3.11地震の断層モデルのうち、第二波群に対応するSMGAのRSPLが最大のAsano and Iwata(2012)を参照して設定。
⇒全周期帯で概ね観測記録を上回る結果となった。
- <参考検討>
- 地震規模を、神田ほか(2012)における本震波形記録全体のマグニチュードを参照したM8.3とし、RSPLをSMGAの M_0 が最大の佐藤(2012)に基づき設定した場合の評価を実施。
⇒M8.1とした場合の結果と同程度であった。



※ X_{eq} は神田ほか(2012)に基づく76.3kmとして算出



3.11地震の評価結果と観測記録との比較(水平)

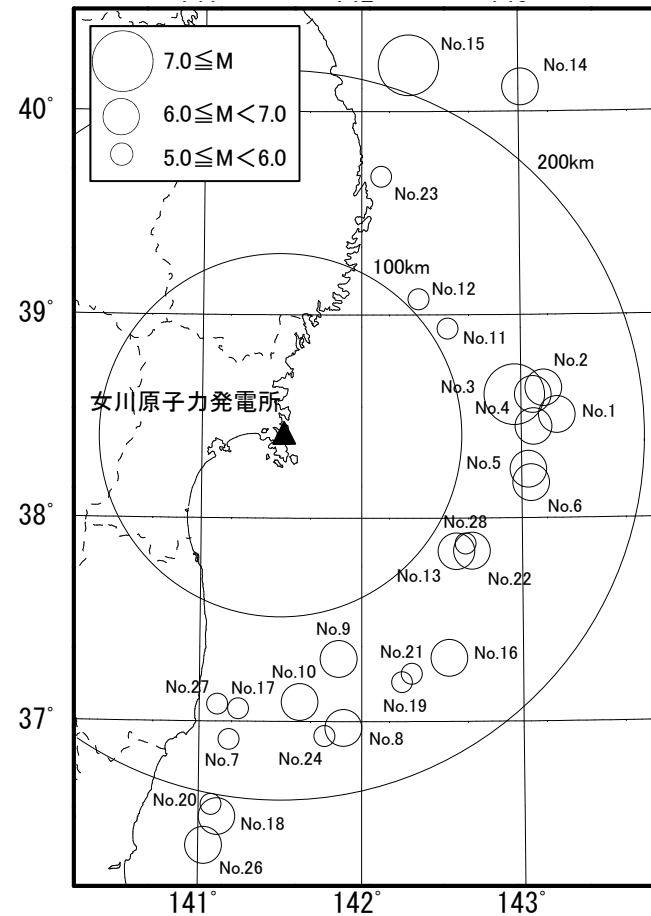
[参考]Noda et al.(2002)の評価に用いる補正係数(3)

■プレート間地震:領域震源(③福島県沖)

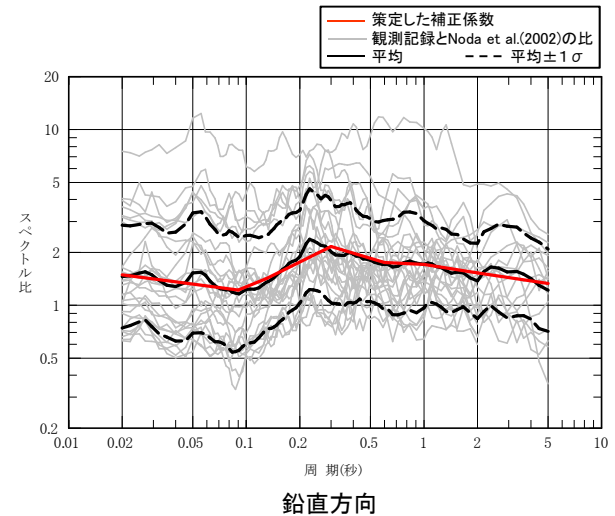
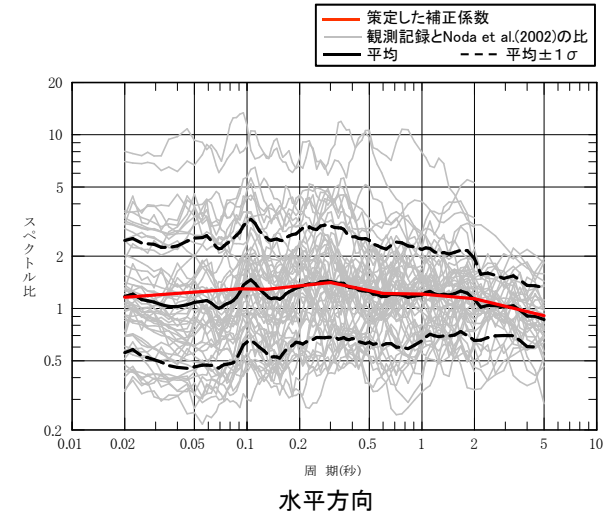
- 敷地で得られた観測記録とNoda et al.(2002)の応答スペクトル比から策定した補正係数を採用する。
- 補正係数の策定に用いる地震は、震央距離が100~200km程度の範囲で発生したM5.5以上のプレート間地震とする。

補正係数の策定に用いた地震の諸元

No.	発生日	M	震央距離 (km)
1	1981年 1月18日	6.1	151
2	1981年 1月19日	6.1	146
3	1981年 1月19日	7.0	130
4	1981年 1月19日	6.0	140
5	1981年 1月23日	6.6	137
6	1981年 1月23日	6.2	139
7	1983年 7月 2日	5.8	168
8	1987年 2月 6日	6.7	164
9	1987年 4月 7日	6.6	127
10	1987年 4月23日	6.5	146
11	1992年12月28日	5.9	108
12	1993年11月11日	5.5	106
13	1994年 8月16日	6.0	115
14	1994年12月29日	6.5	231
15	1995年 1月 7日	7.2	214
16	1996年 2月17日	6.8	153
17	1997年 5月12日	5.6	151
18	2000年 7月21日	6.4	211
19	2001年 2月25日	5.9	150
20	2002年 2月12日	5.5	205
21	2002年 7月24日	5.7	149
22	2003年10月31日	6.8	122
23	2004年 8月10日	5.8	152
24	2004年 9月 1日	5.6	166
25	2005年 8月24日	6.3	138
26	2005年10月19日	6.3	228
27	2005年10月22日	5.6	151
28	2005年12月 5日	5.5	117



補正係数の策定に用いた地震の震央分布図



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および策定した補正係数(地震基盤)

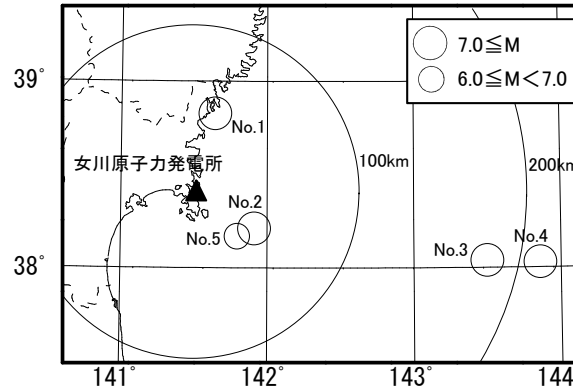
[参考]Noda et al.(2002)の評価に用いる補正係数(4)

■プレート内地震:領域震源

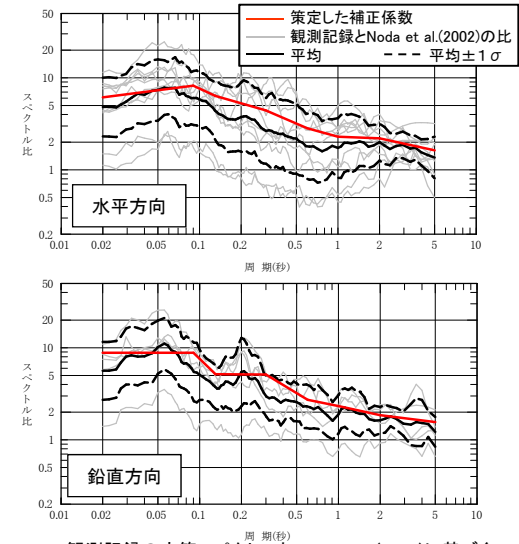
- 敷地で得られた観測記録とNoda et al.(2002)の応答スペクトル比から策定した補正係数を採用する。
- 補正係数の策定には、震央距離が200km程度以内の範囲で発生したM6.0以上のプレート内地震を用いた。

補正係数の策定に用いた地震の諸元

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



補正係数の策定に用いた地震の震央分布図



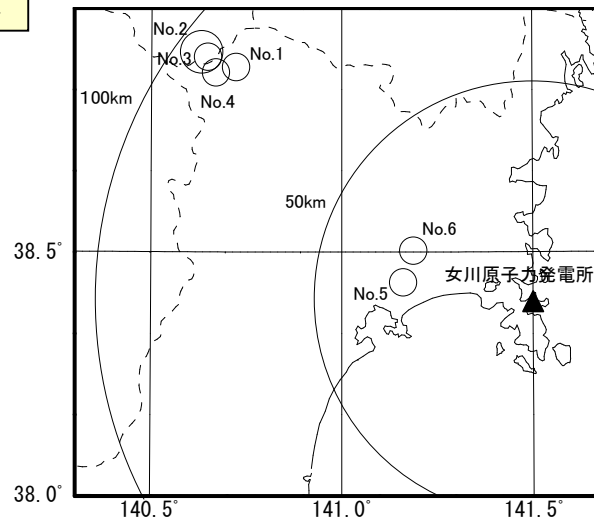
観測記録の応答スペクトルとNoda et al.(2002)に基づく
応答スペクトルの比および策定した補正係数(地震基盤)

■内陸地殻内地震:活断層による地震, 領域震源

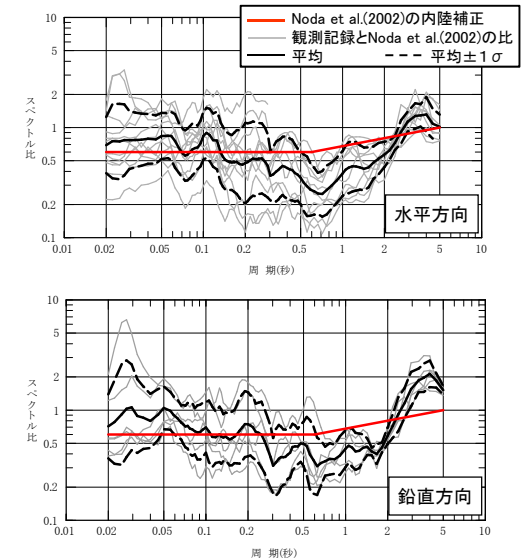
- 敷地で得られた観測記録とNoda et al.(2002)の応答スペクトル比から算定される係数と概ね整合するNoda et al.(2002)の内陸補正を採用。
- 検討には、震央距離が100km程度以内の範囲で発生したM5.0以上の内陸地殻内地震を用いた。

検討に用いた地震の諸元

No.	発生日	M	震央距離(km)
1	1985年3月28日	5.3	85
2	1996年 8月11日	6.0	94
3	1996年 8月11日	5.5	92
4	1996年 8月11日	5.8	88
5	2007年 7月26日	5.6	30
6	2007年 7月26日	5.5	29



検討に用いた地震の震央分布図



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および内陸補正(解放基盤)

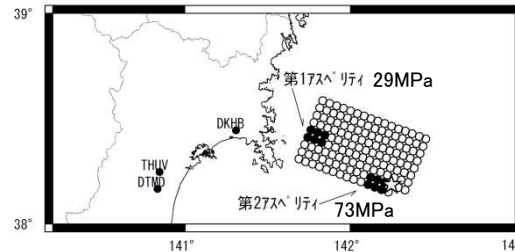
[参考]ばらつきの打ち切りの設定について

■「特定震源 宮城県沖地震」の東北地方太平洋沖型地震との関係を踏まえた打ち切り設定について

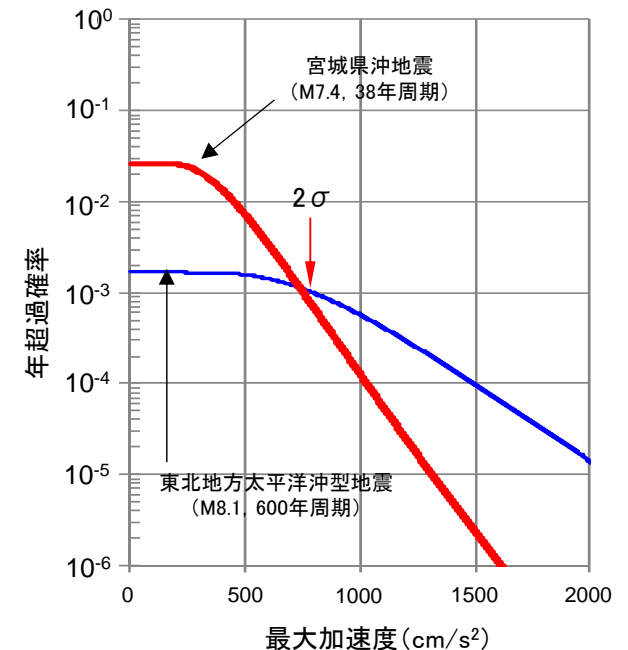
- 特定震源で考慮している宮城県沖地震と東北地方太平洋沖型地震は、基本的には宮城県沖の同じアスペリティによって生じる地震であり、1978年の宮城県沖地震は3.11地震のアスペリティの一部が活動したものと考えられる。
- 「特定震源 宮城県沖地震」の確率評価では、 2σ で約800ガルとなるが、1978年タイプの地震動がこのように大きくなるためには、敷地から宮城県沖のアスペリティまでの距離がほぼ最短であることも考慮すると、以下のいずれかの現象(もしくは組み合わせ)が必要となる。
 - ① アスペリティの面積が変わらなければアスペリティの応力降下量が倍以上になる。
※地震本部(2005)ではA1断層の応力降下量を73MPaに設定 ⇒ 約150MPa
 - ② 応力降下量が変わらない場合、アスペリティ面積が4倍以上になる。
※アスペリティ面積が大きくなると背景領域の面積(断層全体)も大きくなる。

← 東北地方太平洋沖地震に相当

「特定震源 宮城県沖地震」が800ガル相当の地震動を引き起こすには、地震規模が大きく(背景領域およびアスペリティ面積が大きく)なる必要があり、それは実質的には東北地方太平洋沖型地震に地震タイプが移行すると考えられる。



1978年宮城県沖地震(M7.4)の観測記録を踏まえた想定宮城県沖地震の断層モデル(A1断層)
[地震本部(2005)に加筆]



「特定震源 宮城県沖地震(M7.4), 38年ポアソン」と、「東北地方太平洋沖型地震(M8.1), 600年ポアソン」の地震動は概ね 2σ ($A_{\text{max}}=800$ ガル)付近で交差・逆転する。

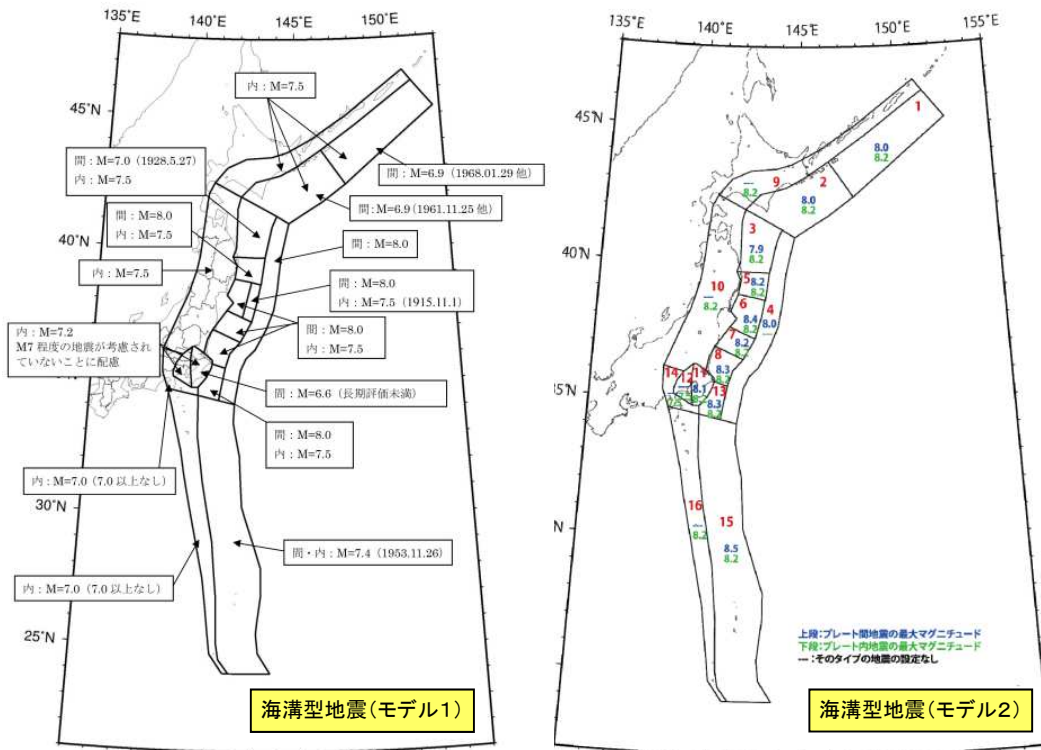
「特定震源 宮城県沖地震」の打ち切りを
 2σ に設定

[参考]地震本部(2013)における震源モデルの設定

■地震本部(2013)における震源モデルの設定

- 各領域における地震の長期評価結果に基づく「モデル1」と、領域震源に考慮する地震規模を大きくした場合の確率論的評価結果に与える影響を確認するための「モデル2」の2つの震源モデルが考慮されている。
- 宮城県沖地震は、モデル1においてはカテゴリⅠ（震源断層を特定できる地震）として扱われているが、モデル2においては、カテゴリⅡ（震源断層をあらかじめ特定しにくい地震）に統合されている。

モデル1: 従来モデル 主要な活断層や海溝型地震の長期評価をベースにしたモデル
 モデル2: 検討モデル 地震活動度の不確実性を大きくしたモデル



地震本部(2013)における各領域における最大地震規模 (海溝型地震)

	2011年・2012年における検討			2013年起点		
	モデル1	モデル2	モデル3	従来モデル (モデル1)	検討モデル (モデル2)	参照モデル (モデル3)
カテゴリⅠ	想定東海	M8.0, P30=88				
	東南海	M8.1, P30=72	同左			
	南海	M8.4, P30=62			M8~9, P30=66.5	同左
	南海トラフ連動	M8.4~8.5				
	大正型関東	M7.9, P30=0.18				
	元禄型関東	なし (P30=0)	同左			
	東北地方太平洋沖型	P30=0	同左			
	三陸沖北部	M8.0, P30=7.3	同左	不特定に統合 (*1)		
	宮城県沖	M7.4, P30=55*	不特定に統合		M7.9~8.6 G-Rモデル	同左
	十勝沖	M8.1, P30=1.4				
カテゴリⅡ	根室沖	M7.9, P30=47				
	十勝沖・根室沖連動	M8.3, 6回に1回	同左			
	色丹島沖	M7.8, P30=54				
	択捉島沖	M8.1, P30=63				
	南海トラフ震源不特定	Mu = -7.4	同左			
	相模トラフM7	M6.7~7.2, P30=72*				
	震源不特定	Mu = 6.6/-	同左			
	三陸沖北部繰り返し以外	M7.1~7.6, P30=88*	同左			
	震源不特定	Mu = 7.0/7.0	同左			
	三陸沖中部震源不特定	Mu = 8.0/7.5	Mu = 8.2/8.2			
宮城県沖繰り返し以外	M7.0~7.3, P30=61*					
震源不特定	Mu = 8.0/7.5	Mu = 8.4/8.2				
三陸沖南部繰り返し以外	M7.2~7.6, P30=51*					
震源不特定	Mu = 8.0/7.5					
三陸房総海溝寄震源不特定	Mu = 8.0/-	同左				
福島県沖震源不特定	Mu = 8.0/7.5	Mu = 8.2/8.2				
茨城県沖繰り返し以外	M6.9~7.6, P30=69*					
震源不特定	Mu = 8.0/7.5	Mu = 8.3/8.2				
房総沖震源不特定	Mu = 8.0/7.5	Mu = 8.3/8.2				
東北陸域太平洋プレート内	Mu = -7.5	Mu = -8.2	同左			

地震本部(2013)における地震活動モデルの概要

[参考]①宮城県沖地震の特徴 ②地震本部(2013)の評価と女川ハザード評価の比較

①女川原子力発電所のハザード評価における宮城県沖地震の特徴

- 宮城県沖地震は、平均発生間隔が非常に短く、女川から震源位置が近いため、ハザード評価の高頻度の領域で支配的となる。また、短周期の卓越という地域性も反映している結果、ハザード曲線も特徴的な形状を示す。【下図参照】
- 宮城県沖の領域は、算定されるG-R式からも比較的地震活動度が高く、領域震源の影響度も大きい。

【地震本部(2013)における宮城県沖の評価】

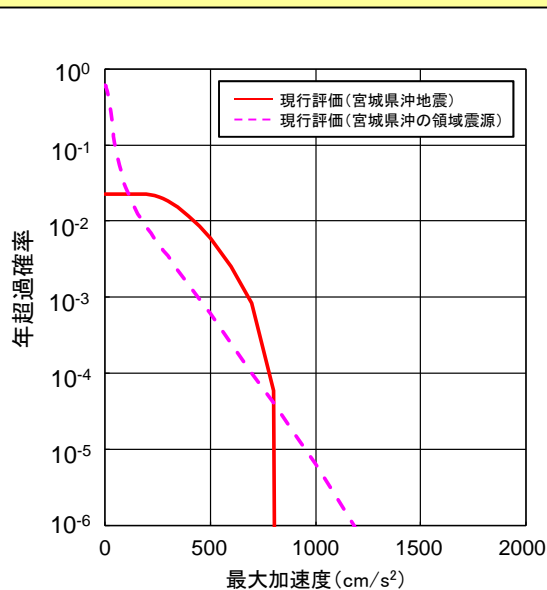
- モデル1では、宮城県沖地震は特定震源として扱われており、領域震源の地震として最大M8.0が設定。
- モデル2では、宮城県沖地震は領域震源に統合されており、宮城県沖の領域として最大M8.4が設定。

【海溝型地震の地震学的特徴】

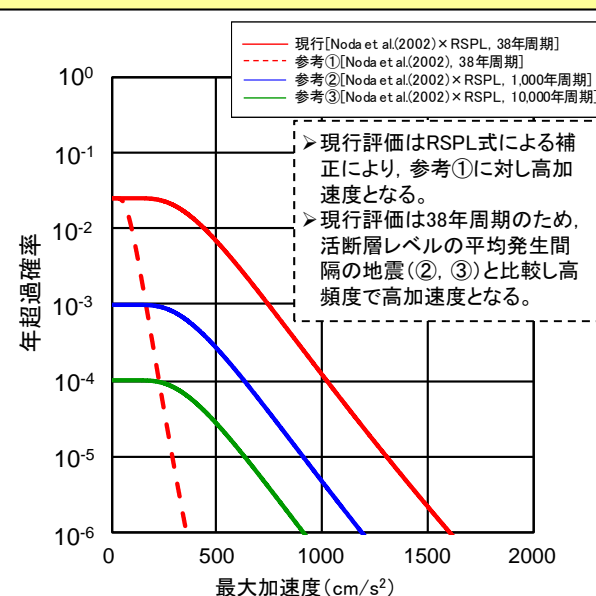
- 「宮城県沖地震(特定震源)によってプレート間の固着域が破壊すること」、「領域震源で設定しているM7クラスの地震によって、宮城県沖地震(特定震源)と同じ固着域が破壊すること」を同時に考慮することは、過大評価になると考えられる。

宮城県沖地震の扱いについては、地震学的特徴も踏まえた「特定震源」と「領域震源」の震源域の重複の評価という課題はあるが、地震本部(2013)のモデル1とモデル2を分岐としてロジックツリーを作成。

宮城県沖地震(特定地震)と宮城県沖の領域震源の評価の比較[水平]

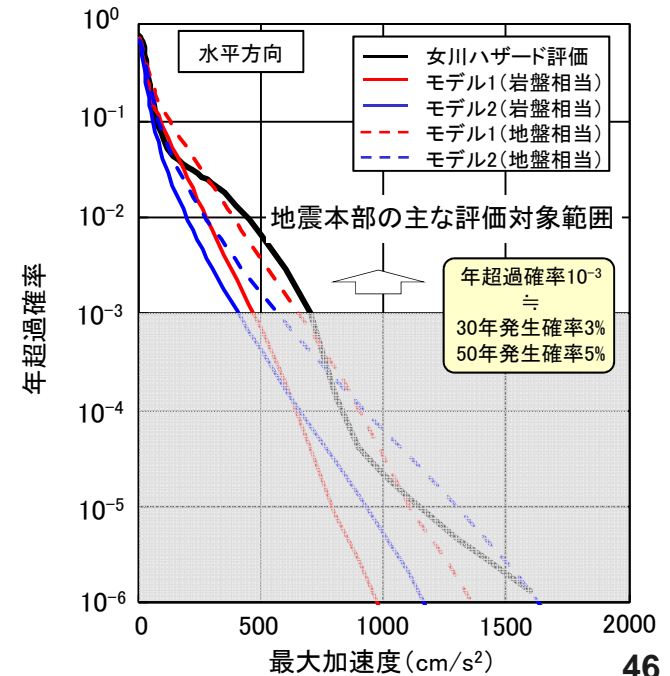


宮城県沖地震の平均発生間隔, 補正係数の感度解析(ポアソン過程, 打ち切り設定せず, 水平)



②地震本部(2013)と女川ハザード評価の比較

- 宮城県沖のプレート間地震について、地震本部(2013)に基づく評価と女川ハザード評価を比較
- 比較対象の範囲は地震本部(2013)の主な評価対象範囲を参考に年超過確率10⁻³以上とする。
- 地震本部(2013)に基づく評価では、地盤条件を発電所の岩盤相当とした場合と一般的な地盤相当とした場合を算出。
- 特定震源として考慮している宮城県沖地震が支配的な10⁻²~10⁻³程度の領域では、敷地の観測記録を用いた距離減衰式を採用している女川ハザード評価が最も大きい評価結果となる。



[参考] 確率論的ハザード評価とは (1/6)

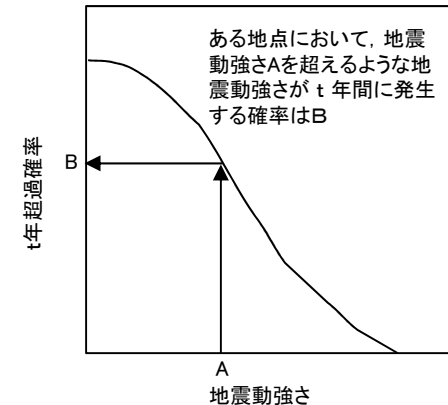
■ 確率論的地震ハザード評価とは

ある地点における『地震動の強さ』と『その確率』の関係を評価したもの。

- 地震動強さ：最大加速度，最大速度，震度，応答スペクトルなど指標は様々ある。
- その確率：「ある地震の発生確率」×「その地震が発生したときのある地点での揺れがある大きさを超える確率」を，全ての地震に対してまとめた「地震動強さの超過確率」で算出される。対象とする期間は様々ある。

【具体例】

- ・地震本部の地震動予測地図は， $t=30$ 年， 50 年として，地震動強さは震度として作成。
評価例：震度6強を超えるような地震動強さが30年間に発生する確率は50%程度
- ・原子力施設を対象とした地震ハザード評価においては， $t=1$ 年として地震動強さは加速度（応答）値とするのが一般的。
評価例：500ガルを超えるような地震動強さが1年間に発生する確率（年超過確率）は $10^{-3}=0.1\%$ 程度



[単純化した条件下でのハザード評価の例]

- ・評価地点を宮城県庁周辺と仮定。
 - ・発生する地震は，宮城県沖地震と長町－利府線断層帯の地震の2つのみと仮定。
 - ・宮城県沖地震が1年以内に発生する確率は40%で，発生した場合の宮城県庁周辺の加速度が100ガル以上となる確率は80%と仮定。
 - ・長町－利府線断層帯の地震が1年以内に発生する確率は5%で，発生した場合の宮城県庁周辺の加速度が100ガル以上となる確率は20%と仮定。
- このとき，宮城県庁周辺で100ガル以上の揺れになる年超過確率は

$$1 - \left((1 - 0.4 \times 0.8) \right) \times \left((1 - 0.05 \times 0.2) \right) = 0.33 \Rightarrow 33\%$$

全体 — [宮城県沖地震で 100ガル未満] かつ [長町－利府線断層帯の地震で 100ガル未満]

実際は・・・

- ・評価対象とすべき地震は多数ある。
- ・将来の活動性（規模，位置，頻度）をある程度予測できる地震と，できない地震が混在する。
- ・ある地震が発生した場合，評価地点での地震動強さは一定ではなく，ばらつきを有する。
- ・評価を行う上で，判断に迷う項目や評価手法が複数ある場合がある。

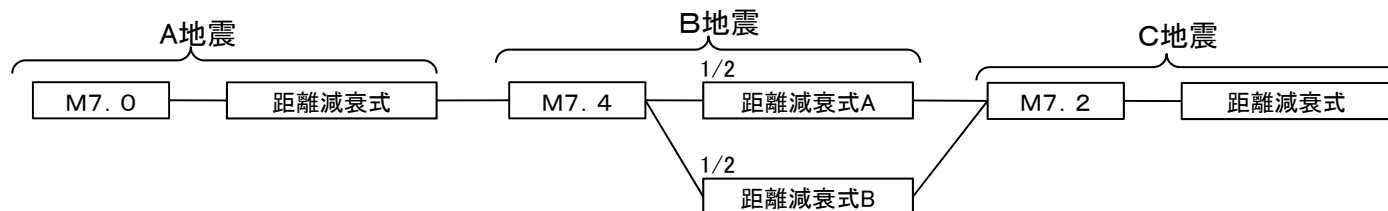
[参考]確率論的ハザード評価とは (2/6)

■地震ハザード評価に必要な情報と手順

- ①対象地点の地震ハザード評価に必要な地震を抽出。
 - ・対象地点の周辺ではどのような地震が発生しているか？または、発生が想定されるか？
- ②それぞれの地震について、発生確率(発生頻度), 規模, 位置を設定。
 - ・地震の発生頻度は？規模や位置は特定できるか？
- ③地震動評価手法を設定。
 - ・距離減衰式で評価可能か？サイト補正は必要か？
- ④地震動評価におけるばらつき, 打ち切りの設定。
 - ・地震動を評価する上で, ばらつきや打ち切りはどのように設定すべきか？

※①～④について, 判断が分かれる, 評価手法が複数ある場合は, ロジックツリーを作成する。

例:A地震(M7.0), C地震(M7.2)を距離減衰式Aで評価し, B地震(M7.4)を距離減衰式AとBで評価

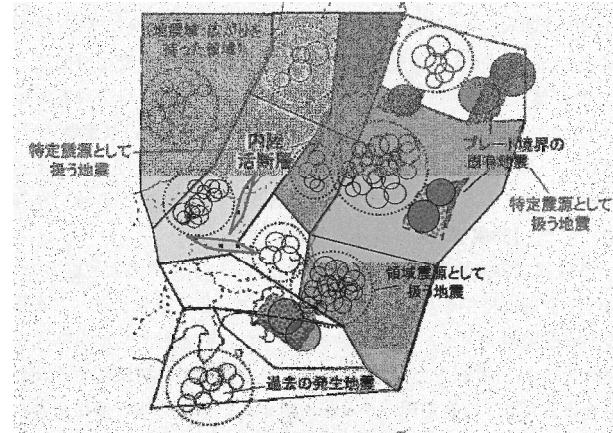


[参考] 確率論的ハザード評価とは (3/6)

■ 地震ハザード評価に必要な地震の抽出と、発生確率(発生頻度)、規模、位置の設定

一般的に・・・

- 規模の大きなプレート間地震や既知の活断層を震源とする内陸地殻内地震は、同一の震源でほぼ同じ規模の地震が繰り返し発生することが知られている。
- 一方、規模の小さいプレート間地震や内陸地殻内地震、海洋プレート内地震については、現在の地震学、地質学などの知見からは、将来発生する一つ一つの地震の位置、規模、頻度を取り扱うことが困難である。



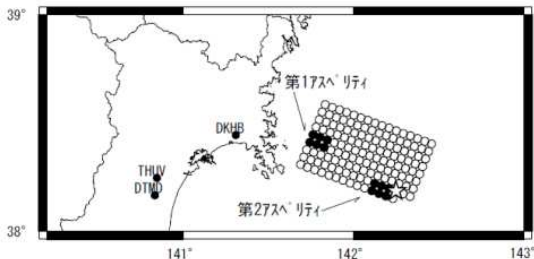
特定震源及び領域震源(模式図)
[日本原子力学会基準(2015)]

同一規模が繰り返し発生する地震 ... 特定震源としてモデル化
 特定震源としてモデル化できない地震 ... 領域震源としてモデル化

特定震源: 規模、位置、頻度を地震毎に設定して評価
 領域震源: 地震活動特性がある程度均質であると考えられる領域内で評価する。最大Mを設定。頻度は領域内の地震発生状況を踏まえて設定。

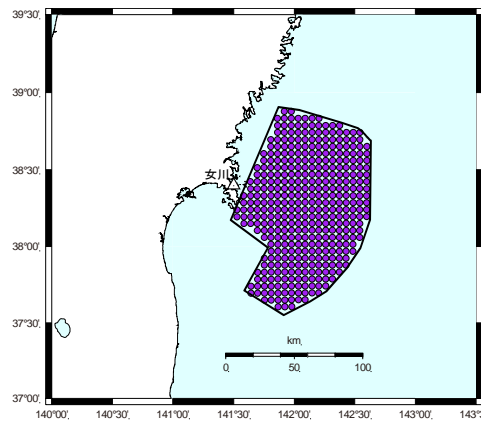
特定震源モデルの設定例 (宮城県沖地震)

- 地震規模は地震本部(2005)よりM7.4
- 発生頻度は平均発生間隔38年から算定
- 震源距離は断層面から算定



宮城県沖地震の特定震源モデルとしての設定

領域震源モデルの設定例 (宮城県沖十三陸沖南部海溝寄り)

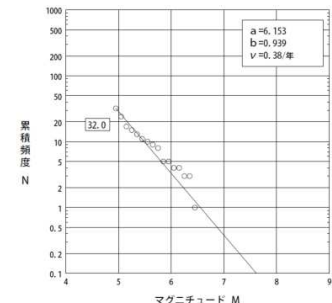


「宮城県沖十三陸沖南部海溝寄り」における領域震源の設定(0.05度刻みのメッシュ割)

- 領域内で発生する地震規模の範囲を設定
 → 地震本部(2013)のモデル1に基づき最大M8.0に設定。下限値はM5.0に設定。
- 発生頻度は、対象領域において過去に発生した地震を調査し、規模と発生頻度の関係式※を算定。さらに、対象領域をメッシュ割りして、発生頻度を等分配に設定。
- 震源距離は、各メッシュごとに算定。

※地震の発生頻度と規模の関係を表す法則としてグーテンベルグ・リヒター則がある。マグニチュードMに対する地震の頻度N(回/年)は以下の関係式となる。
 ここで、パラメーターa、bを当該領域の地震発生状況を調査して設定する。

$$\log_{10} N = a - b M$$



[参考]確率論的ハザード評価とは (4/6)

■ 地震動評価手法の設定と、ばらつきと打ち切りの設定

(距離減衰式で評価可能か？サイト補正は必要か？ばらつきと打ち切りはどう設定するか？)

➤ サイト補正の考慮

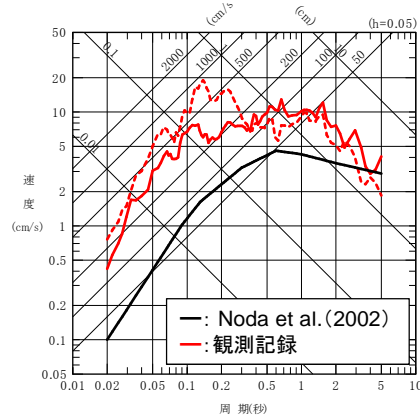
距離減衰式から評価される地震動強さは、全国平均的な値であるため、必要に応じてサイト補正を行う。

過去に起きた多数の
地震観測記録

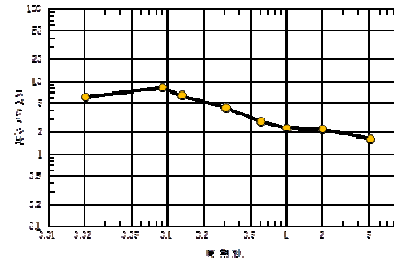
- 地震規模
- 震源距離
- 地震動の大きさ

統計処理

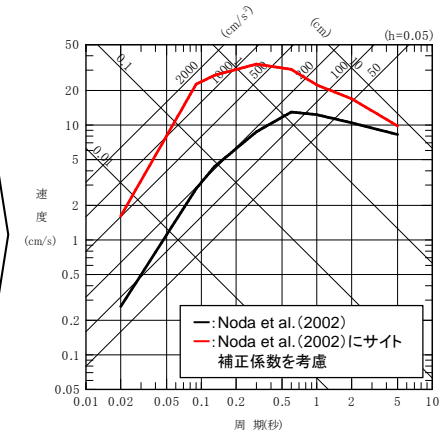
「地震規模・震源距離」と
「地震動の大きさ」の経験式



Noda et al. (2002)と観測記録の差の例



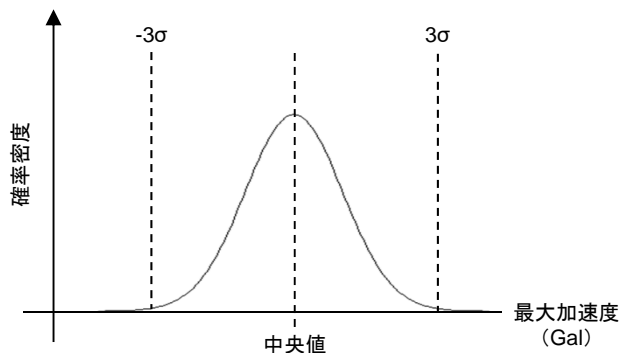
Noda et al. (2002)と観測記録の
差を基に策定した補正係数



補正係数を考慮した耐専スペクトルによる評価

➤ ばらつきと打ち切りの設定

距離減衰式により与えられるのは中央値であり、現実の観測点における地震動には不確実性が存在する。



【ばらつきの設定】

- ばらつきは β で与える。
- Noda et al. (2002)では $\beta = 0.53$ となっている。
- 一般的に、サイト補正を考慮すると、ばらつきを小さく設定することができる。

例えば・・・

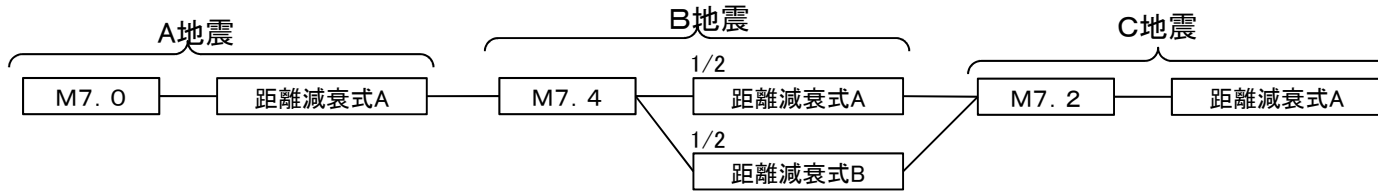
- 中央値300Gal, $\sigma = 0.53$ の場合・・・ $3\sigma = 1,500$ Gal
- 中央値300Gal, $\sigma = 0.35$ の場合・・・ $3\sigma = 860$ Gal

【打ち切りの設定】

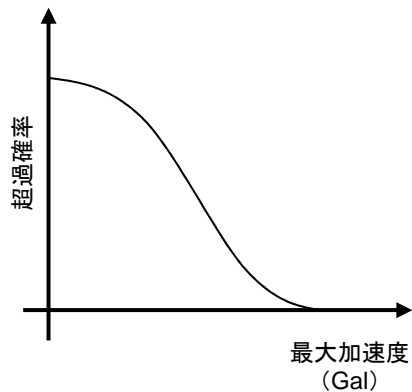
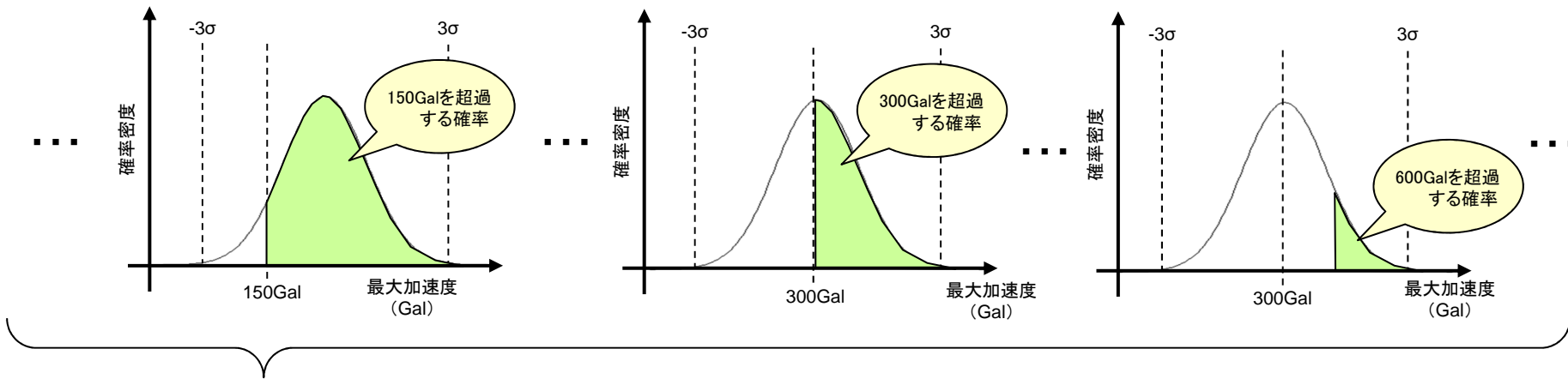
- 地震動強さが現象的に有限であることを踏まえた打ち切り範囲を設定。
- 一般的には $\pm 3\sigma$ として設定。

[参考] 確率論的ハザード評価とは (5/6)

■ 地震ハザード曲線の算定手順のイメージ

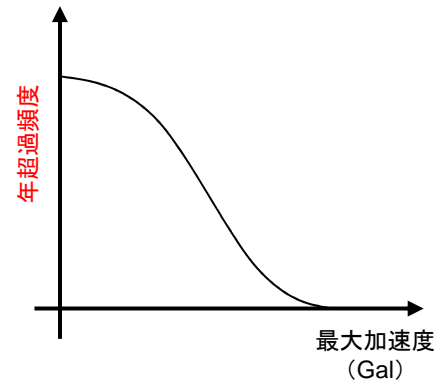
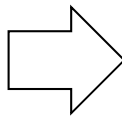


A地震による年超過頻度を算出



左図は地震が発生した場合の確率なので、地震そのものの年発生頻度を反映する。

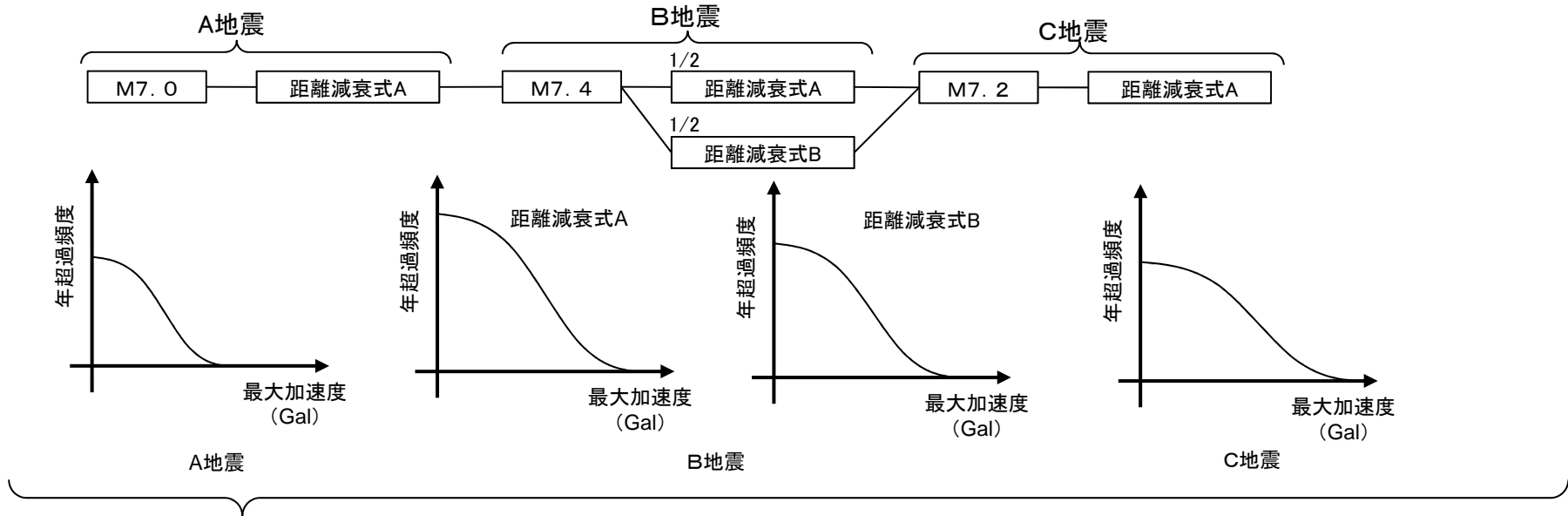
A地震の平均発生間隔100年とすると
1/100



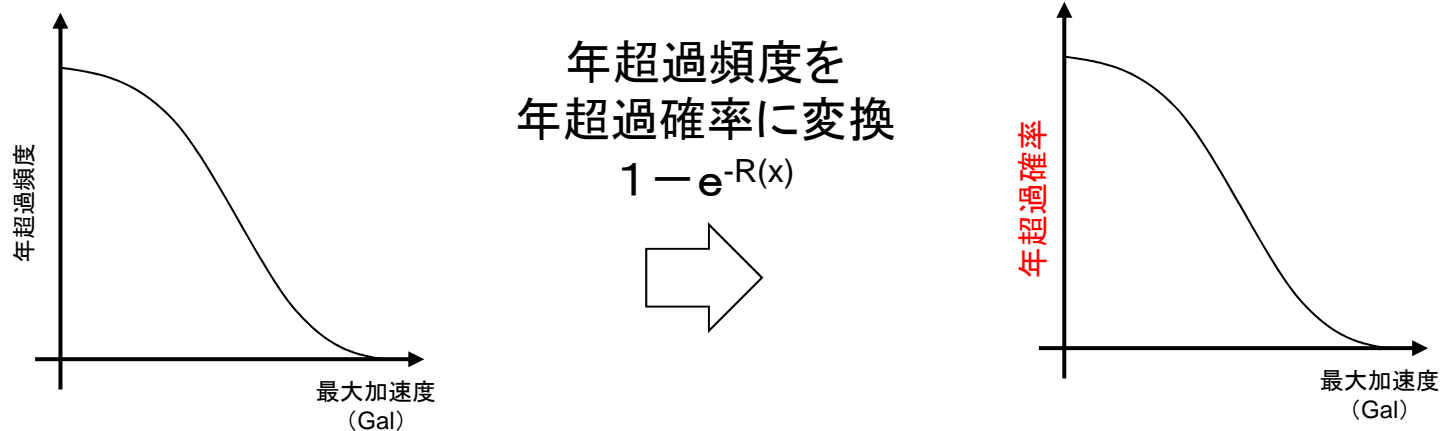
B地震, C地震による年超過頻度も同様に算出する。

[参考] 確率論的ハザード評価とは (6/6)

■ 地震ハザード曲線の算定手順のイメージ



全ての評価対象の地震の年超過頻度を、ロジックツリーに基づく重み付けを考慮して足し合わせる。



参考文献

1. 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド, 原子力規制委員会, <http://www.nsr.go.jp/data/000069160.pdf>
2. 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置, 構造及び設備の基準に関する規則の解釈, 原子力規制委員会, <http://www.nsr.go.jp/data/000187185.pdf>
3. 日本原子力学会(2015): 日本原子力学会標準, 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準
4. 神田克久, 武村雅之, 広谷浄, 石川和也(2012): 震度分布に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の短周期地震波発生域, 地震 第2輯, 第65巻
5. 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
6. 諸井孝文, 広谷浄, 石川和也, 水谷浩之, 引間和人, 川里健, 生玉真也, 釜田正毅(2013): 標準的な強震動予測レシピに基づく東北地方太平洋沖巨大地震の強震動の再現, 日本地震工学会第10回年次大会梗概集
7. 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～
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. 地震調査研究推進本部(2009): 全国地震動予測地図
10. 活断層研究会編(1991): [新編]日本の活断層, 東京大学出版会
11. 加藤愛太郎(2012): 2011年東北地方太平洋沖地震の特徴について, 地球科学第46巻, 87-98
12. 森川信之, 神野達夫, 成田章, 藤原広行, 奥村俊彦, 福島美彦(2006): 震源域と観測点を特定した地震動強さのばらつき - 観測記録に基づく検討 -, 第12回日本地震工学シンポジウム
13. 池浦友則, 野田静男(2005): 同一地点における地震動応答スペクトルのばらつき - 地震規模と震源距離がそれぞれ等しい強震記録ペアの分析 -, 日本地震工学会論文集, 第5巻, 第3号, 12-30
14. 奈良岡浩二, 宮腰淳一, 渡辺孝英, 八代和彦(1999): 岩盤上における観測記録の経時特性のマグニチュード・等価震源距離依存性, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), 21090
15. Kiyoshi Hirotsu, Yoshihiro Ogata, Hiroshi Sawabe, Toru Sasaki(2013): A comparison between seismic hazard and The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Transactions, SMiRT-22, San Francisco, California, USA, Aug.18-23, 2013
16. Asano, K. and T. Iwata(2012): Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1-10Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth Planets Space, Vol. 64(No. 12), pp. 1111-1123
17. 佐藤智美(2012): 経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル - プレート境界地震の短周期レベルに着目して -, 日本建築学会構造系論文集, 675, 695-704
18. 内閣府(2012b): 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)強震断層モデル編 - 強震断層モデルと震度分布について -
19. 司宏俊, 瀬戸一, 三宅弘恵(2016): プレート境界巨大地震の地震動距離減衰特性 - 伝播特性に着目した検討 -, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第1号(特集号)