

東通原子力発電所 基準地震動の策定のうち
海洋プレート内地震の地震動評価について
(コメント回答)

2023年12月22日
東北電力株式会社

審査会合におけるコメント等

1. 海洋プレート内地震の地震動評価に関する前回審査会合(第973回)におけるコメント

No.	コメント時期	コメント内容	今回ご説明資料の掲載箇所
S198	2021年5月14日 第973回審査会合	海洋プレート内地震の「断層位置等の不確かさケース」の位置づけを参考ケースから不確かさケースに見直したことに合わせ、海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いに関する説明を補足説明資料から本編資料に移すこと。	本編資料 p.127

2. 2022年3月16日福島県沖の地震(M7.4)の反映について

No.	時期	内容	今回ご説明資料の掲載箇所
3.16 地震 反映	2022年7月1日 第1057回審査会合	2022年3月16日福島県沖の地震について、東通原子力発電所の審査に反映する。 〔背景と目的〕 海洋プレート内地震の地震動評価は、2021年5月14日(第973回審査会合)において「概ね審査済み」となった。その後、2022年3月16日に発生した福島県沖の地震の地震規模[マグニチュード(M)7.4]が、検討用地震の基本ケースの地震規模(M7.3)を超えたことから地震動評価を見直す。	本編資料 p.3～13, 18, 19, 26, 39, 57～68, 72, 78, 79, 82, 88～90, 92, 93, 121, 123～126, 128, 131, 133, 137～142 補足説明資料 p.10, 15, 20, 28, 31～35, 37～43, 45, 46

基準地震動の策定全体フローと本資料の説明範囲

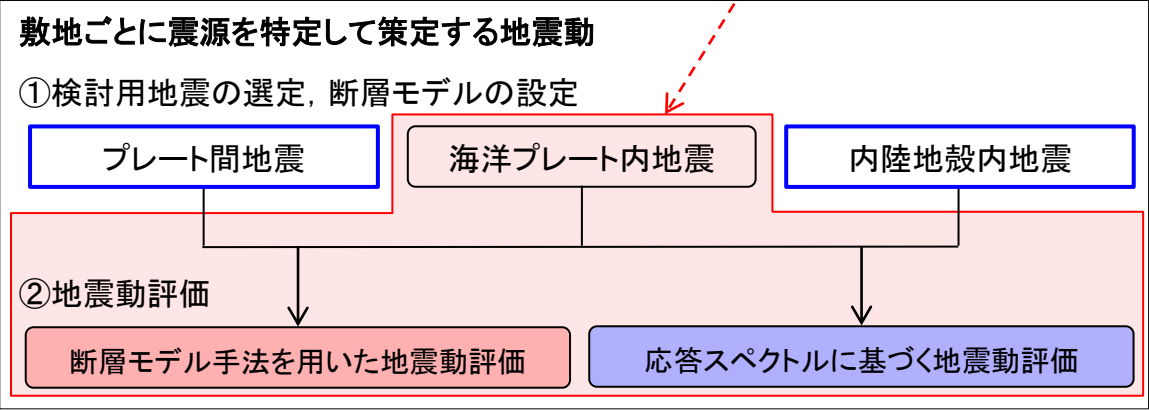
敷地周辺の地震発生状況

- 海洋プレート内地震の被害地震
- 敷地周辺で発生したM5.0以上の地震
- 敷地周辺で発生したM5.0以下の地震

**本資料の
説明範囲**

敷地地盤の振動特性及び地盤モデルの策定

- 地質調査, 観測記録等による敷地地盤の振動特性の検討
- 経験的グリーン関数法に用いる地盤モデル(はぎとり地盤モデル)の設定
- 統計的グリーン関数法に用いる地盤モデルの設定
- 理論的手法に用いる地盤モデルの設定



震源を特定せず策定する地震動

基準地震動の策定

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」の評価結果を踏まえて策定

基準地震動の超過確率の参照

特定震源モデル及び領域震源モデルに基づき地震ハザード評価を実施

※ : 説明済の個所 : 本資料対象範囲外

説明の概要

(1) 検討概要 2022年3月16日福島県沖の地震を踏まえた検討用地震の諸元見直し

3.16地震反映

◆主な諸元(地震規模, 短周期レベル)について

- 2022年3月16日福島県沖の地震(以下、「3.16地震」という。)の地震規模はM7.4であり、東北地方で発生した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)で最大規模であった2021年2月13日福島県沖の地震(以下、「2.13地震」という。M7.3)を上回るため、検討用地震の地震規模を検討した。
 - ・基本ケースは、領域の過去の地震の最大規模とすることからM7.3から**M7.4**に見直す。
 - ・不確かさケースは、2011年4月7日宮城県沖の地震(以下、「4.7地震」という。M7.2)の地球物理学的データ等からM7.5としており、また地震規模の不確かさに加え短周期レベルの不確かさを重畳した保守的な検討としていることを踏まえ、これまでどおりM7.5を考慮する(本編資料p.81, 82参照)。
- 海洋プレート内地震の検討用地震の設定に当たっては、発生位置と地震規模に加え、短周期レベルの設定が重要であることから、3.16地震の短周期レベルの大きさについて各種検討を行った。その結果、相対的な短周期レベルは領域の最大である4.7地震($1.5 \times$ 標準レシピ A_s *)より小さいと評価された。
 - ・基本ケースは、標準レシピに基づき $1.0 \times A_s$ としている。これは東通の観測記録の傾向等から地域的な特徴が特に認められないことを踏まえたものである。
 - ・不確かさケースは、4.7地震を踏まえた $1.5 \times A_s$ としており、3.16地震の相対的な短周期レベルはそれより小さいことから、領域最大の $1.5 \times A_s$ を考慮する。
- 以上を踏まえ、検討用地震について基本ケースの地震規模を見直し、地震動評価を行った**2。

第973回審査会合(2021年5月14日)での説明〈3.16地震 発生前〉

二重深発地震上面の地震(DC型)

主な特徴

- 東北地方の過去の地震
 - ①地震規模
 - ・2.13地震 **M7.3**
 - ②短周期レベル
 - ・4.7地震 **$1.5 \times A_s$**
- 東北地方に想定される最大規模
 - ①地震規模
 - ・低速度域の拡がりを考慮 **M7.5**

検討用地震の諸元**3

- 【基本ケース】
 - ①地震規模 **M7.3**
 - ②短周期レベル $1.0 \times A_s$
- 【不確かさケース】
 - ①地震規模 **M7.5**
 - ②短周期レベル **$1.5 \times A_s$**

本資料での説明〈3.16地震 発生後〉

二重深発地震上面の地震(DC型)

検討用地震の諸元**3

- 【基本ケース】
 - ①地震規模 **M7.4**
 - ②短周期レベル $1.0 \times A_s$
- 【不確かさケース】
 - ①地震規模 **M7.5**
 - ②短周期レベル **$1.5 \times A_s$**

見直し

反映

※1: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシピ)の短周期レベルを標準レシピ A_s とする。

※2: 地震動評価に用いる断層モデルの設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる(本編資料p.131参照)。

※3: 諸元(地震規模, 短周期レベル)の設定の考え方については本編資料p.74~77参照。

【3.16地震の特徴】

- 3.16地震の短周期レベルに関する検討
 - ・各地の観測記録の傾向分析
 - ・強震動シミュレーション解析
 - ・文献調査(強震動評価関係)

- ①地震規模 **M7.4**
- ②短周期レベル
 - ・4.7地震(**$1.5 \times A_s$**)より小さい
(強震動シミュレーションでは **$1.3 \times A_s$**)

説明の概要

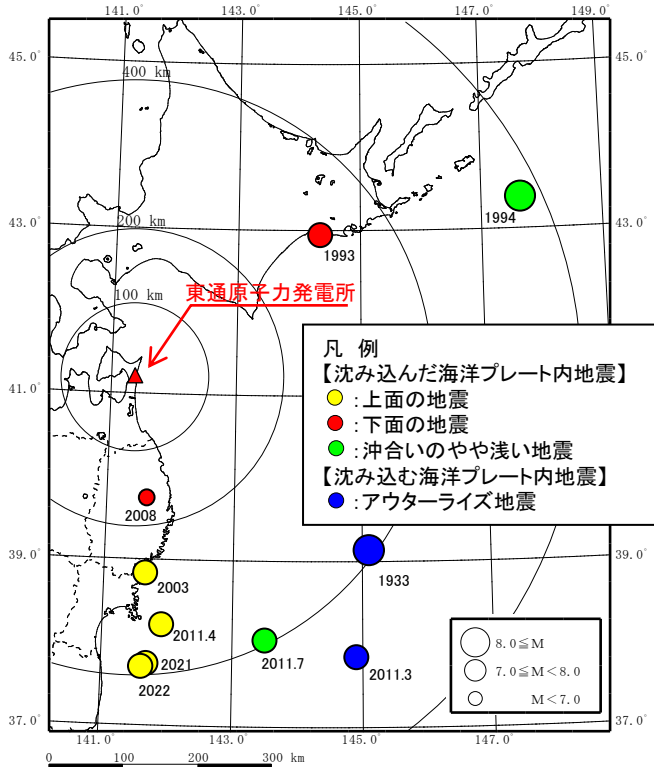
(2) 敷地周辺の主な海洋プレート内地震

3.16地震反映

- 東北地方から北海道では、海溝から陸側に向かって沈み込んだ海洋プレート内で発生する地震は、二重深発地震を形成している。
- 東北地方(東北日本弧)では、下面(DE型)に比べて上面(DC型)の活動が活発で、M7クラスの地震が発生しており、その最大規模は2022年福島県沖の地震(M7.4)(3.16地震)である。一方、下面(DE型)ではM7を超える地震は発生しておらず、その最大規模は2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)である。沖合のやや浅い地震としては2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)が最大である。
- 北海道(千島弧)では上面(DC型)に比べ下面(DE型)の活動が活発で、最大規模としては1993年釧路沖地震(M7.5)がある。また、沖合のやや浅い地震として、1994年北海道東方沖地震(M8.2)がある。
- アウターライズ地震としては、1933年三陸沖の地震(M8.1)が発生している。

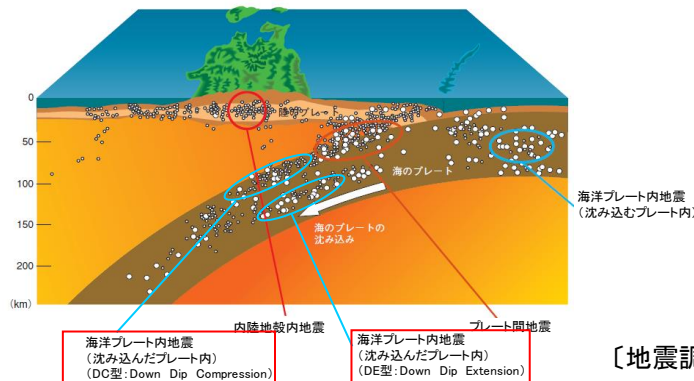
敷地周辺の主な海洋プレート内地震

地震タイプ		東北地方(東北日本弧)	北海道(千島弧)
海洋プレート沈み込んだ地震	二重深発地震 上面の地震(DC型)	2003年宮城県沖の地震(M7.1) 2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2) 2021年福島県沖の地震(M7.3) 2022年福島県沖の地震(M7.4)	(規模の大きな地震は知られていない)
	二重深発地震 下面の地震(DE型)	2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)	1993年釧路沖地震(M7.5)
	沖合いのやや浅い地震	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)
沈み込む海洋プレート内地震 (アウターライズ地震)		1933年三陸沖の地震(M8.1) 2011年3月11日三陸沖の地震(M7.5)	(規模の大きな地震は知られていない)



主な海洋プレート内地震の震央分布

※:地震諸元は気象庁による



地震発生タイプの模式図

[地震調査研究推進本部(2017b)に一部加筆]

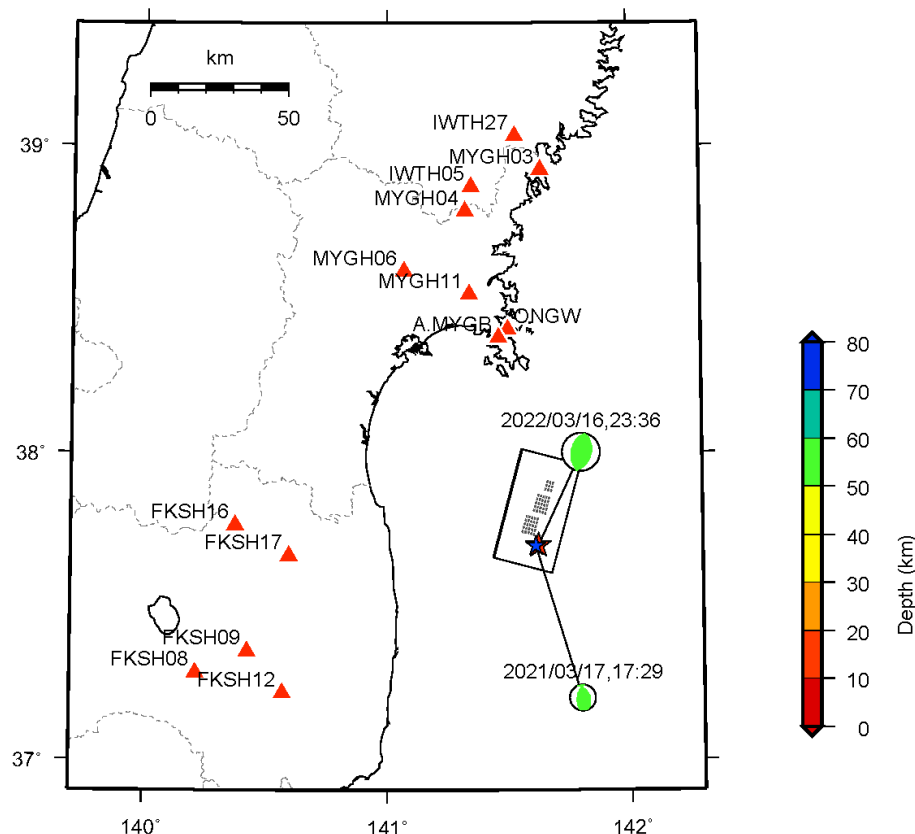
説明の概要

(3) 2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション①

3.16地震反映

- 3.16地震について、経験的グリーン関数法を用いて強震動生成域(SMGA)を推定し、強震動シミュレーションを行った。また、推定された震源モデルから算定される短周期レベルについて既往経験式との比較検討を行った。*
- 強震動シミュレーションの対象とする観測点は、女川原子力発電所のほか震源距離が160km以内でかつVs30が400m/s以上のKiK-net観測点等とした。
- 経験的グリーン関数として使用する小地震は、幾つかの候補の中から特に女川原子力発電所の観測記録(補足説明資料3章参照)との整合性を踏まえ、2021年3月17日17時29分頃に発生した地震(Mw5.0)を選定し、震源パラメータについては吉田ほか(2022)を用いた。

※:本検討については、日本地震工学会・大会(2022)において「2022年3月16日福島県沖の地震の強震動生成域の推定[新井ほか(2022)]」として発表している。

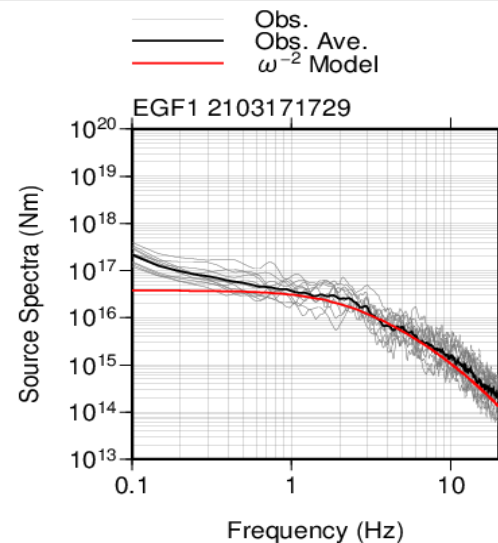


本震及び小地震の震央位置と検討対象観測点分布, SMGAモデル

★:本震震央, ★:小地震震央, ■:SMGA

小地震のパラメータ

パラメータ	単位	設定値	設定根拠
緯度	[°]	37.695	気象庁
経度	[°]	141.613	気象庁
震源深さ	[km]	57.3	気象庁
地震モーメント	[Nm]	3.76E+16	F-net
応力降下量	[MPa]	34.8	吉田・他(2022)
断層面積	[km ²]	1.9	吉田・他(2022)



小地震の観測記録より推定した震源スペクトルと理論スペクトルの比較

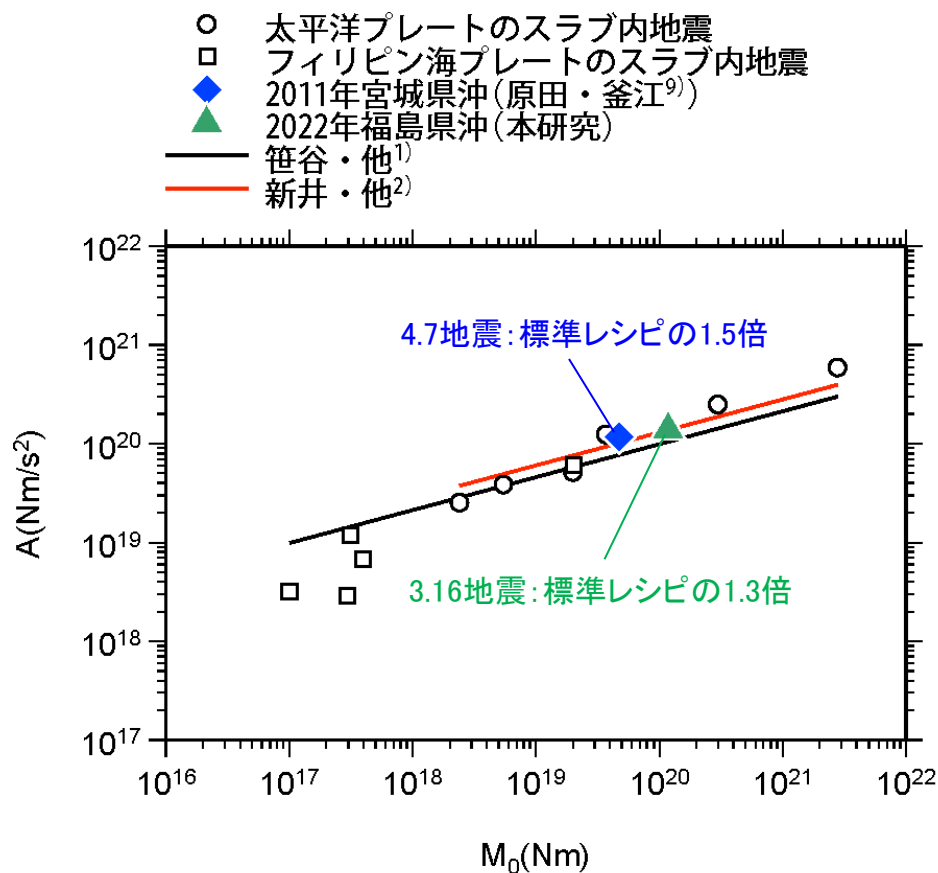
説明の概要

(3) 2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション②

3.16地震反映

- 3.16地震のSMGAモデルの短周期レベルを過去の地震及びスケーリング則と比較した。3.16地震の短周期レベル(図中:2022年福島県沖)は標準レシピ[※]の約1.3倍となり、4.7地震(図中:2011年宮城県沖)の比率(約1.5倍)より小さい。
- 芝(2022)においても3.16地震の短周期レベルが求められており、スケーリング則との比率は4.7地震より小さい(補足説明資料4章参照)。

※: 標準レシピ: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシピ)で参照している笹谷ほか(2006)の短周期レベル



地震モーメント(M₀)と短周期レベル(A)の関係[新井ほか(2022)に一部加筆]

説明の概要

(4) 検討用地震の基本ケースと不確かさケース①

3.16地震反映

◆ 検討用地震(敷地下方DC型地震)の主なパラメータ設定の考え方について

▶ 3.16地震を踏まえた、基本ケース及び不確かさケースの考え方は次の通り。基本ケースの地震規模を見直す。

青文字: 基本ケースにあらかじめ不確かさを考慮
赤文字: 不確かさを考慮

パラメータ	基本ケースでの設定 不確かさケースの設定	不確かさの考慮	3.16地震の反映について
地震規模	M7.4 M7.5	不確かさケースとして考慮 <ul style="list-style-type: none"> 基本ケースは、東北地方で発生した二重深発地震上面の地震の最大規模(3.16地震)であるM7.4とする。 4.7地震では、震源域北部に低速度域の拡がり確認されており、敷地周辺の海洋プレート内には同様の知見は確認されていないものの、保守性も考慮してM7.5を想定。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本ケースの地震規模を、M7.3(2.13地震)からM7.4(3.16地震)に見直し。 不確かさケースのM7.5は4.7地震の知見及び短周期レベルの不確かさ(標準レシピ※1の1.5倍)と重畳した設定としているため、見直しは不要。
断層の位置	敷地至近 海洋性マントル内 敷地至近 海洋地殻	不確かさケースとして考慮 <ul style="list-style-type: none"> 東北地方のDC型地震の4.7地震(M7.2)は、海洋性マントルの低速度域で発生。 敷地周辺では、4.7地震でみられたような海洋プレート内の低速度域は知られていないものの、不確かさを考慮して敷地至近の海洋性マントルの位置に想定。 海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いから、断層面を海洋性マントルに想定することが自然であるが、敷地付近の観測事例が少ないことなどを考慮し、敷地至近の海洋地殻の位置に想定。 	<ul style="list-style-type: none"> あらかじめ、保守的に敷地至近距離に断層を設定していることから見直しは不要。
短周期レベル (応力降下量)	地震調査研究推進本部 (2020)の1.0倍 基本ケースの1.5倍	不確かさケースとして考慮 <ul style="list-style-type: none"> 敷地で得られた観測記録には短周期レベルが特に大きい傾向は確認されないことから、基本ケースは、海洋プレート内地震の平均的な値である地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルに基づき設定。 不確かさとして、東北地方で発生したDC型地震である4.7地震のM_0-A関係を考慮[地震調査研究推進本部(2020)の1.5倍]。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。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本ケースは標準レシピに基づく設定のため見直しは不要。 不確かさケースは、4.7地震に基づき、標準レシピの1.5倍としているが、3.16地震は標準レシピの1.3倍と評価され、それより小さいことから見直しは不要。
SMGA位置	断層上端 同上	基本ケースにあらかじめ不確かさを考慮 <ul style="list-style-type: none"> SMGA位置に関する知見は知られていないことから、敷地に最も近い断層上端に考慮。基本ケース、不確かさケースとも、地震規模が大きいことを踏まえ、地震調査研究推進本部(2020)※2及び3.16地震の知見※3を参考にSMGAを2個想定。 	<ul style="list-style-type: none"> あらかじめ、保守的に敷地至近位置に設定していることから見直しは不要。 なお、地震規模の大きさ、3.16地震の知見からSMGAは2個とした。
破壊開始点	破壊が敷地に向かう位置 同上	基本ケースにあらかじめ不確かさを考慮 <ul style="list-style-type: none"> 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位置)に複数考慮。 	<ul style="list-style-type: none"> あらかじめ、最も影響の大きい破壊開始点位置を考慮しており見直しは不要。

※1: 標準レシピ: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシピ)の短周期レベル

※2: 強震動生成域の個数については、過去の地震に関する分析によるMw6未満で1個、Mw6~7で2個、Mw7~8で3個、Mw8以上で5個[笹谷ほか(2006)]を参考に設定する。

※3: 3.16地震の震源モデルは複数のSMGAが設定されている(補足説明資料4章参照)。なお、SMGAを均等に2個配置し、SMGAからの地震波が敷地で重なるよう保守的に設定している。

説明の概要

(4) 検討用地震の基本ケースと不確かさケース②

3.16地震反映

【前回(見直し前)】 検討用地震の想定〔二重深発地震上面の地震(敷地下方DC型地震)〕

タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベルA※	破壊開始点	備考	
ケース1 (基本ケース)	DC型	M7.3	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 中央	1.0As	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	東北地方で発生した上面の地震の最大規模を考慮
ケース2 (地震規模・短周期レベル)	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.5As	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	・原田・釜江(2011)による4.7地震のM ₀ -Aを考慮 ・4.7地震の知見(低速度域の拡がり)を踏まえ、保守性を考慮しM7.5を想定
ケース3 (断層位置等)	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋地殻)	断層上端 均等	1.2As (0.8×1.5As)	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	・4.7地震の知見(低速度域の拡がり)を踏まえ、保守性を考慮しM7.5を想定 ・断層位置を海洋地殻まで近づけて想定 ・海洋性マントルと海洋地殻の物性の違いを考慮

■ : 考慮する不確かさ □ : あらかじめモデルに織り込む不確かさ

※: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



【今回(見直し後)】 検討用地震の想定〔二重深発地震上面の地震(敷地下方DC型地震)〕

タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベルA※	破壊開始点	備考	
ケース1 (基本ケース)	DC型	M7.4	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.0As	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	東北地方で発生した上面の地震の最大規模を考慮
ケース2 (地震規模・短周期レベル)	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.5As	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	・原田・釜江(2011)による4.7地震のM ₀ -Aを考慮 ・4.7地震の知見(低速度域の拡がり)を踏まえ、保守性を考慮しM7.5を想定
ケース3 (断層位置等)	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋地殻)	断層上端 均等	1.2As (0.8×1.5As)	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	・4.7地震の知見(低速度域の拡がり)を踏まえ、保守性を考慮しM7.5を想定 ・断層位置を海洋地殻まで近づけて想定 ・海洋性マントルと海洋地殻の物性の違いを考慮

■ : 考慮する不確かさ □ : あらかじめモデルに織り込む不確かさ

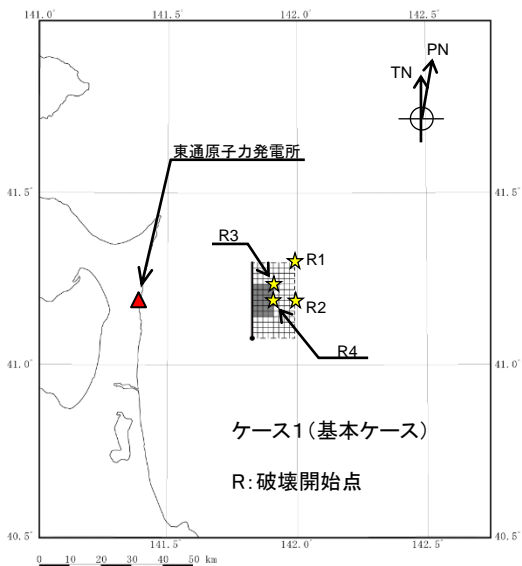
※: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

(5) 検討用地震(敷地下方DC型地震)「ケース1(基本ケース)(M7.4)」と

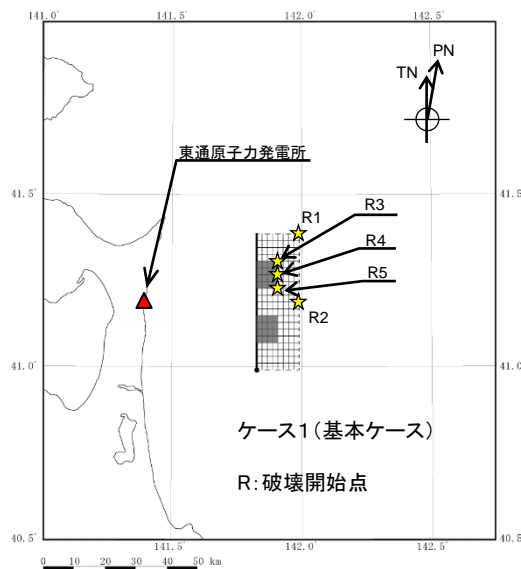
前回提示「ケース1(基本ケース)(M7.3)」の断層モデル手法による評価結果の比較①

3.16地震反映

- 検討用地震(敷地下方DC型地震)について、今回提示した「ケース1(基本ケース)(M7.4)」と前回(第973回審査会合)提示した「ケース1(基本ケース)(M7.3)」の断層モデルを示す。

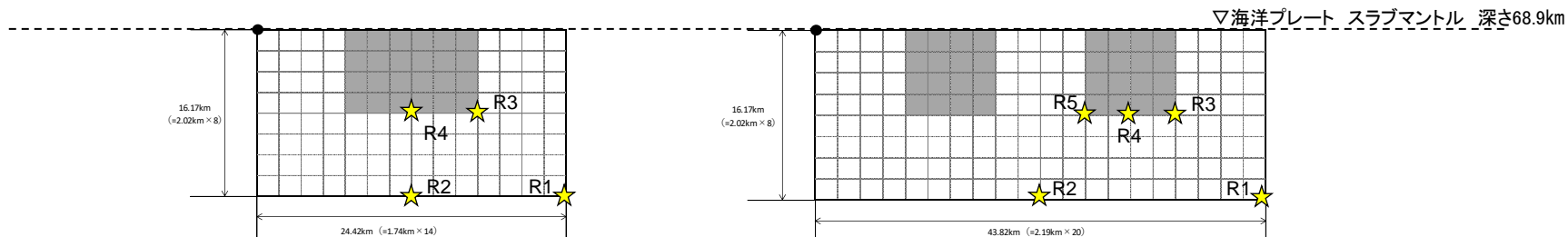


前回提示 ケース1(基本ケース)(M7.3)



今回提示 ケース1(基本ケース)(M7.4)

敷地下方DC型地震 断層配置図



前回提示 ケース1(基本ケース)(M7.3)

今回提示 ケース1(基本ケース)(M7.4)

R:破壊開始点

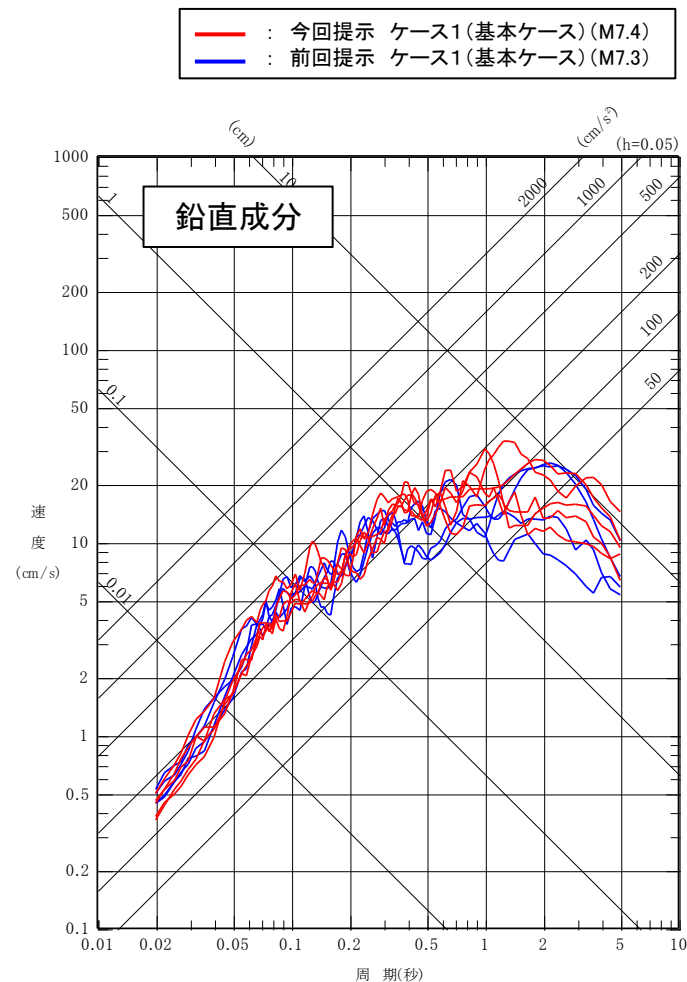
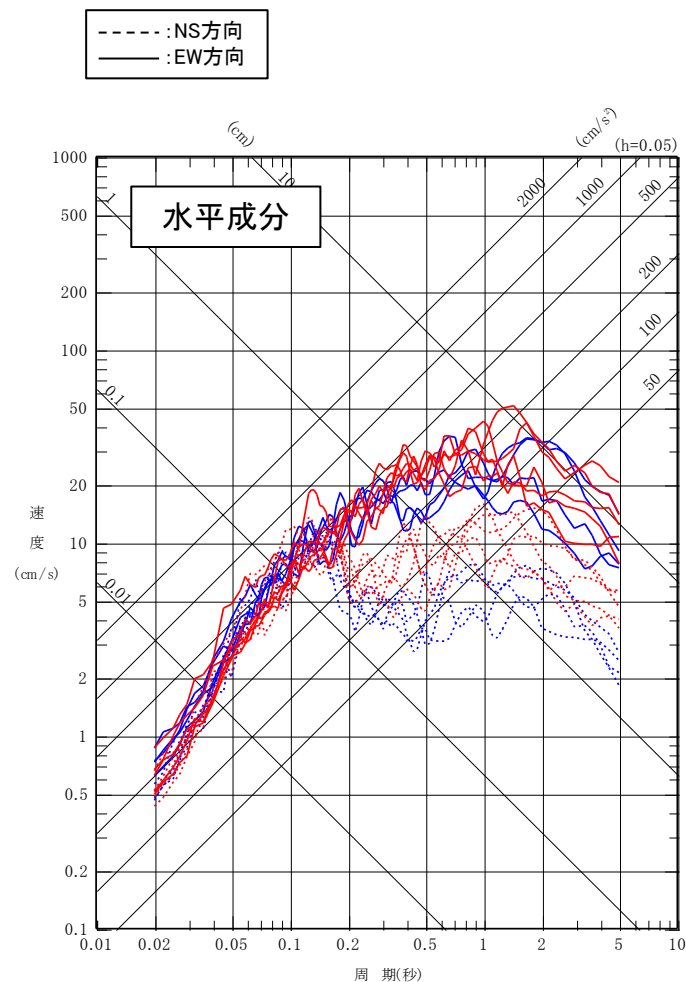
■:強震動生成域(SMGA)

敷地下方DC型地震 展開図

(5) 検討用地震(敷地下方DC型地震)「ケース1(基本ケース)(M7.4)」と
 前回提示「ケース1(基本ケース)(M7.3)」の断層モデル手法による評価結果の比較②

3.16地震反映

- 検討用地震(敷地下方DC型地震)について、今回提示した「ケース1(基本ケース)(M7.4)」と前回(第973回審査会合)提示した「ケース1(基本ケース)(M7.3)」の断層モデル手法による評価結果の比較を示す。



敷地下方DC型地震の断層モデル手法を用いた地震動評価(PN基準)

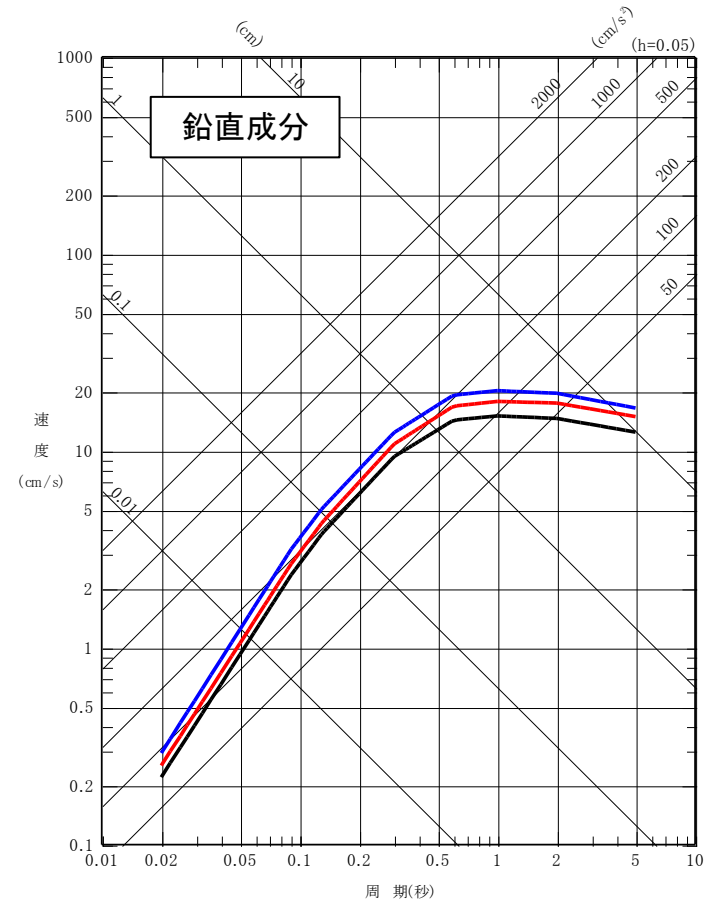
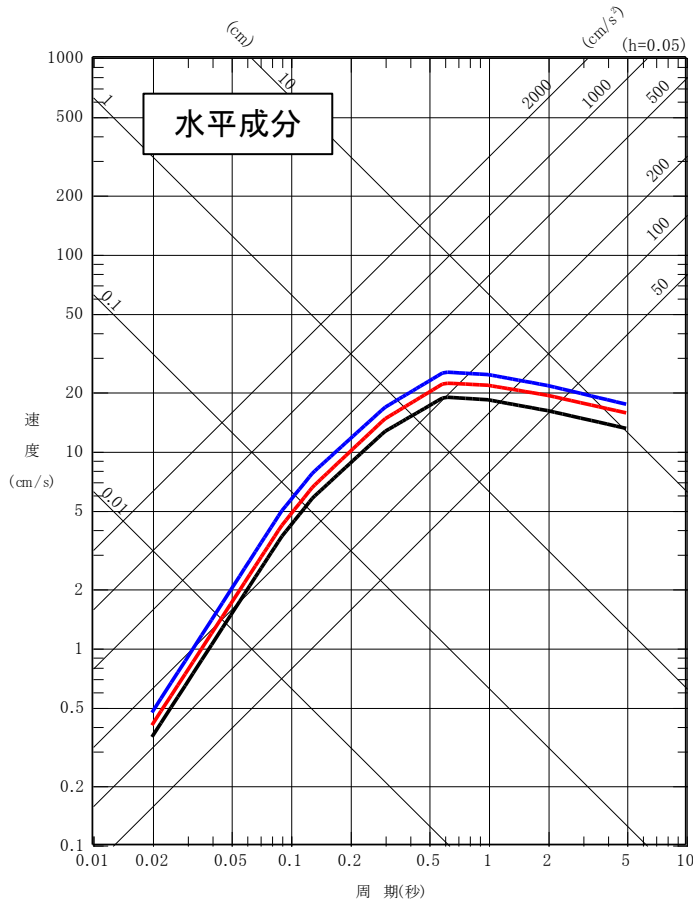
説明の概要

(6) 検討用地震の応答スペクトルに基づく地震動評価

3.16地震反映

➤ Noda et al.(2002)の手法による敷地下方DC型地震の地震動評価を示す。

- : ケース1 (基本ケース) (M7.4, $X_{eq}=83\text{km}$)
- : ケース2 (地震規模・短周期レベル) (M7.5, $X_{eq}=84\text{km}$)
- : ケース3 (断層位置等) (M7.5, $X_{eq}=77\text{km}$)



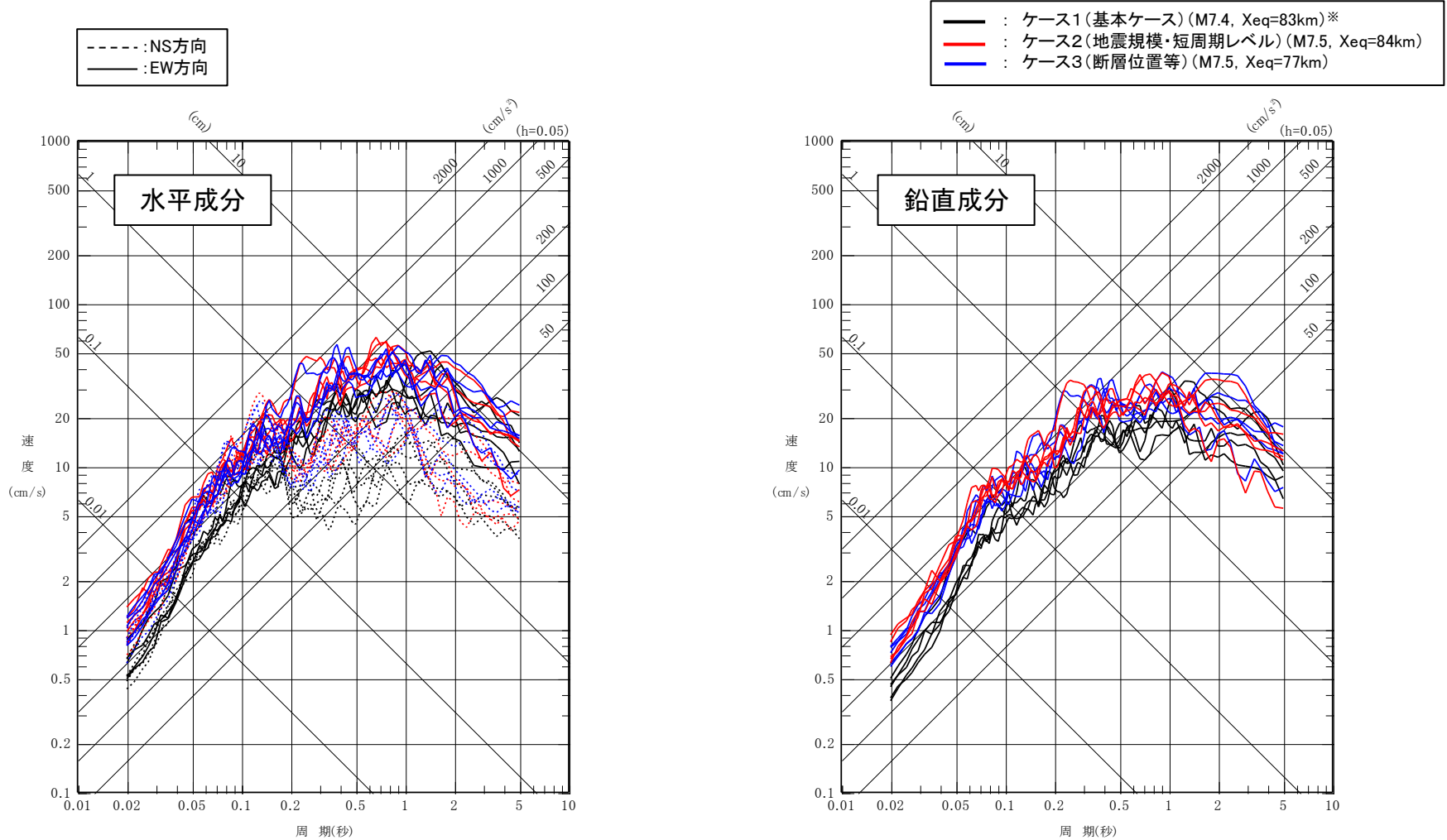
敷地下方DC型地震の応答スペクトルに基づく地震動評価

説明の概要

(7) 検討用地震の断層モデル手法を用いた地震動評価

3.16地震反映

- 敷地下方DC型地震の断層モデル手法による評価結果を示す。
- 断層モデル手法を用いた地震動評価は、敷地において適切な地震観測記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法(SGF)[釜江ほか(1991)及び入倉ほか(1997)]を用いた。



敷地下方DC型地震の断層モデル手法を用いた地震動評価(PN基準) ※: 前回提示「ケース1(基本ケース)(M7.3)との比較を補足説明資料5章に示す。

説明の概要

(8) 2022年3月16日福島県沖の地震に関する主な反映事項

- 前回適合性審査会合(第973回, 2021年5月14日)以降, 2022年福島県沖の地震(M7.4)(3.16地震)が発生したことから, 検討用地震の想定及び地震動評価について以下のとおり反映を行った。

2022年3月16日福島県沖の地震に関する主な反映事項

説明箇所(項目)		第973回審査会合(2021年5月14日)での説明	本資料
1. 敷地周辺の地震発生状況	主な被害地震 (二重深発地震上面)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 4.7地震(M7.2) ➤ 2.13地震(M7.3) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 4.7地震(M7.2) ➤ 2.13地震(M7.3) ➤ 3.16地震(M7.4)
	震央分布図, M- Δ 図	敷地周辺の被害地震を記載	3.16地震を追加
3. 海洋プレート内地震の発生状況と特徴	海洋プレート内地震の特徴 (二重深発地震上面)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 4.7地震に関するNakajima et al.(2011)等の知見を記載 ➤ 2.13地震の知見 ① [地震調査研究推進本部(2021)及び防災科学技術研究所(2021)]震源分布及びメカニズム解より, 2.13地震は二重深発地震上面の地震(DC型)。 ② [大野(2021)]A/V比から, 短周期の卓越は4.7地震よりも小さい傾向。また, 東北電力によるK-NET及びKiK-net観測記録を用いた検討から, 応答スペクトル特性でも同様の傾向を確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 4.7地震の知見(同左) ➤ 2.13地震の知見(同左) ➤ 3.16地震の知見 ① [地震調査研究推進本部(2022)及び防災科学技術研究所(2022)]震源分布及びメカニズム解より, 3.16地震は二重深発地震上面の地震(DC型)。 ② [日本建築学会(2022)]A/V比によれば, 概括的には, 短周期の卓越は4.7地震と同程度の傾向とされているが, 東北電力によるK-NET及びKiK-net観測記録を用いた詳細な検討を実施した結果, 応答スペクトル特性では短周期側で4.7地震より小さいことを確認。 ③ さらに, 女川原子力発電所を含めた強震動シミュレーション解析を実施した結果, 3.16地震の短周期レベルは標準レシピアの約1.3倍と評価され, 4.7地震の1.5倍より小さいことを確認。
4. 海洋プレート内地震の検討用地震の選定	地震タイプごとの整理 (二重深発地震上面)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 東北地方で発生した上面の地震の最大規模は2.13地震(M7.3) ➤ 短周期レベルは4.7地震が最も大きく, 標準レシピアの1.5倍 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 東北地方で発生した上面の地震の最大規模は3.16地震(M7.4) ➤ 短周期レベルは4.7地震が最も大きく, 標準レシピアの1.5倍(同左)
	敷地下方DC型地震の検討ケース	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケース(M7.3, 1.0×標準レシピア) ➤ 不確かさケース(M7.3, 1.5×標準レシピア) [影響評価ケース(M7.5, 1.5×標準レシピア)は変わらず。] 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケース(M7.4, 1.0×標準レシピア) ➤ 不確かさケース(M7.4, 1.5×標準レシピア) [影響評価ケース(M7.5, 1.5×標準レシピア)は変わらず。]
5. 海洋プレート内地震(検討用地震)の地震動評価	検討ケース	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケース(M7.3, 1.0×標準レシピア) [不確かさケース①地震規模・短周期レベルの不確かさ(M7.5, 1.5×標準レシピア)や②断層位置等の不確かさ(M7.5, 1.2×標準レシピア, 海洋地殻)は変わらず。] 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケース(M7.4, 1.0×標準レシピア) [不確かさケース①地震規模・短周期レベルの不確かさ(M7.5, 1.5×標準レシピア)や②断層位置等の不確かさ(M7.5, 1.2×標準レシピア, 海洋地殻)は変わらず。]

赤字: 2022年3月16日福島県沖の地震(M7.4)(3.16地震)を踏まえた変更箇所。

※: 標準レシピア: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシピア)の短周期レベル

余白

目次(1)

1. 敷地周辺の地震発生状況	17
1. 1 主な被害地震	18
1. 2 地震発生状況	20
1. 3 太平洋プレートの沈み込み	25
1. 4 敷地周辺の地震発生状況 まとめ	26
2. 検討に用いる地盤モデル	27
2. 1 敷地における地震観測	28
2. 2 検討に用いる地盤モデル	29
3. 海洋プレート内地震の発生状況と特徴	31
3. 1 海洋プレート内地震の地震動評価フロー	32
3. 2 世界の主な海洋プレート内地震	33
3. 3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴	39
3. 4 まとめ	72

目次(2)

4. 海洋プレート内地震の検討用地震の選定	73
4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針	74
4. 2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震	88
4. 3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震	94
4. 4 沖合いのやや浅い地震(東北)	100
4. 5 二重深発地震下面の地震(北海道) 北海道DE型地震	107
4. 6 沖合いのやや浅い地震(北海道)	112
4. 7 アウターライズ地震	117
4. 8 検討用地震の選定 まとめ(検討対象地震の地震動評価)	121
5. 海洋プレート内地震(検討用地震)の地震動評価	122
5. 1 海洋プレート内地震の検討用地震	123
5. 2 断層面を海洋地殻まで近づけた場合の応力降下量	127
5. 3 検討用地震の地震動評価	128
5. 4 海洋プレート内地震の地震動評価 まとめ	151
参考文献	152

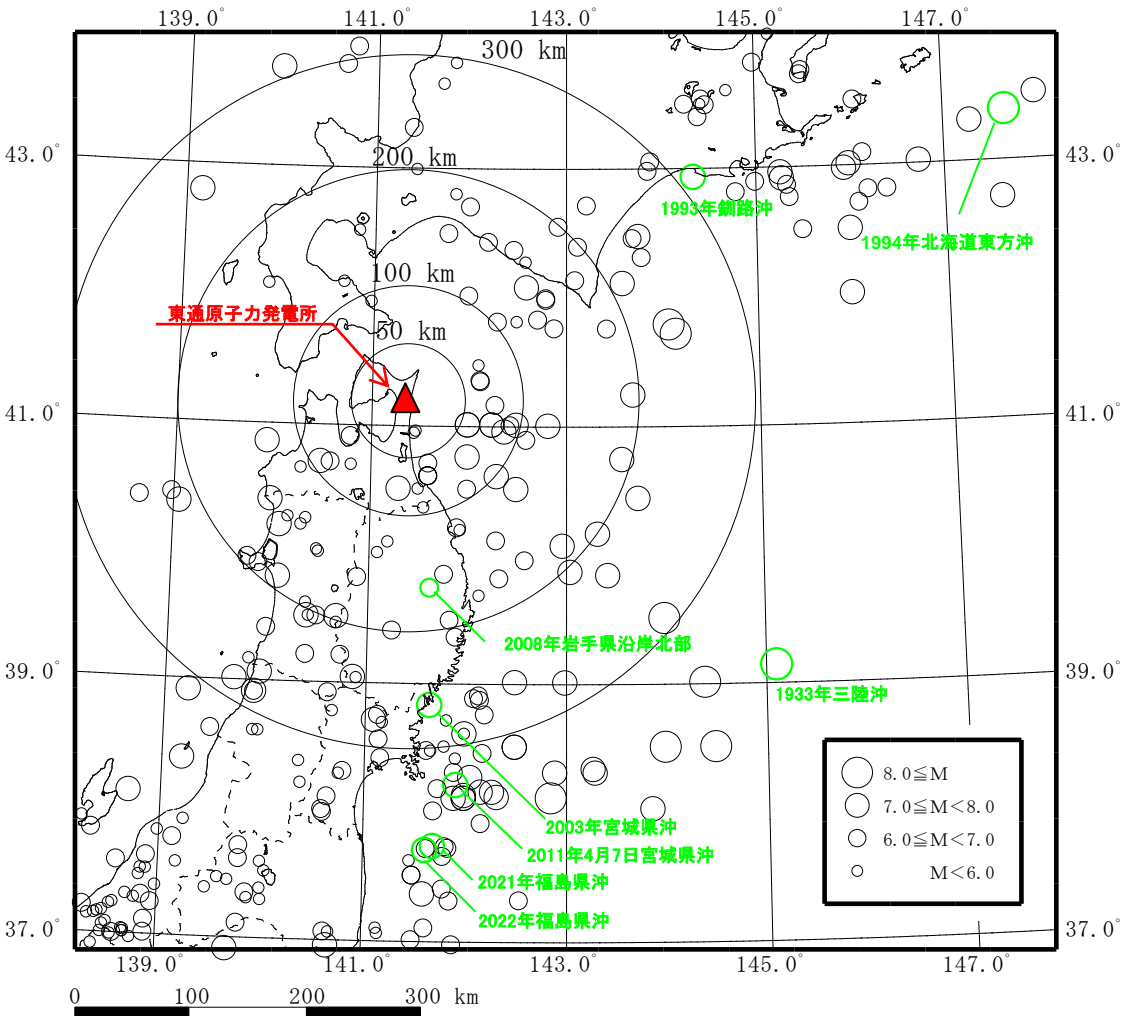
1. 敷地周辺の地震発生状況

- 1. 1 主な被害地震
- 1. 2 地震発生状況
- 1. 3 太平洋プレートの沈み込み
- 1. 4 敷地周辺の地震発生状況 まとめ

1.1 主な被害地震

(1) 敷地周辺における主な被害地震の震央分布

3.16地震反映



敷地周辺の主な被害地震の分布
(599年～2022年3月)

【主な海洋プレート内地震の被害地震】

- 敷地から100km以内では、海洋プレート内地震の被害地震は知られていない。
- 東北地方では以下の被害地震が発生している。
 - ①二重深発地震上面の地震
 - 2003年5月26日宮城県沖の地震(M7.1)(5.26地震)
 - 2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2)(4.7地震)
 - 2021年2月13日福島県沖の地震(M7.3)(2.13地震)
 - 2022年3月16日福島県沖の地震(M7.4)(3.16地震)
 - ②二重深発地震下面の地震
 - 2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)
 - ③日本海溝付近のアウトターライズの地震
 - 1933年三陸沖の地震(M8.1)
- 北海道では以下の被害地震が発生している。
 - ④二重深発地震下面の地震
 - 1993年釧路沖地震(M7.5)
 - ⑤沖合いのやや浅い地震
 - 1994年北海道東方沖地震(M8.2)

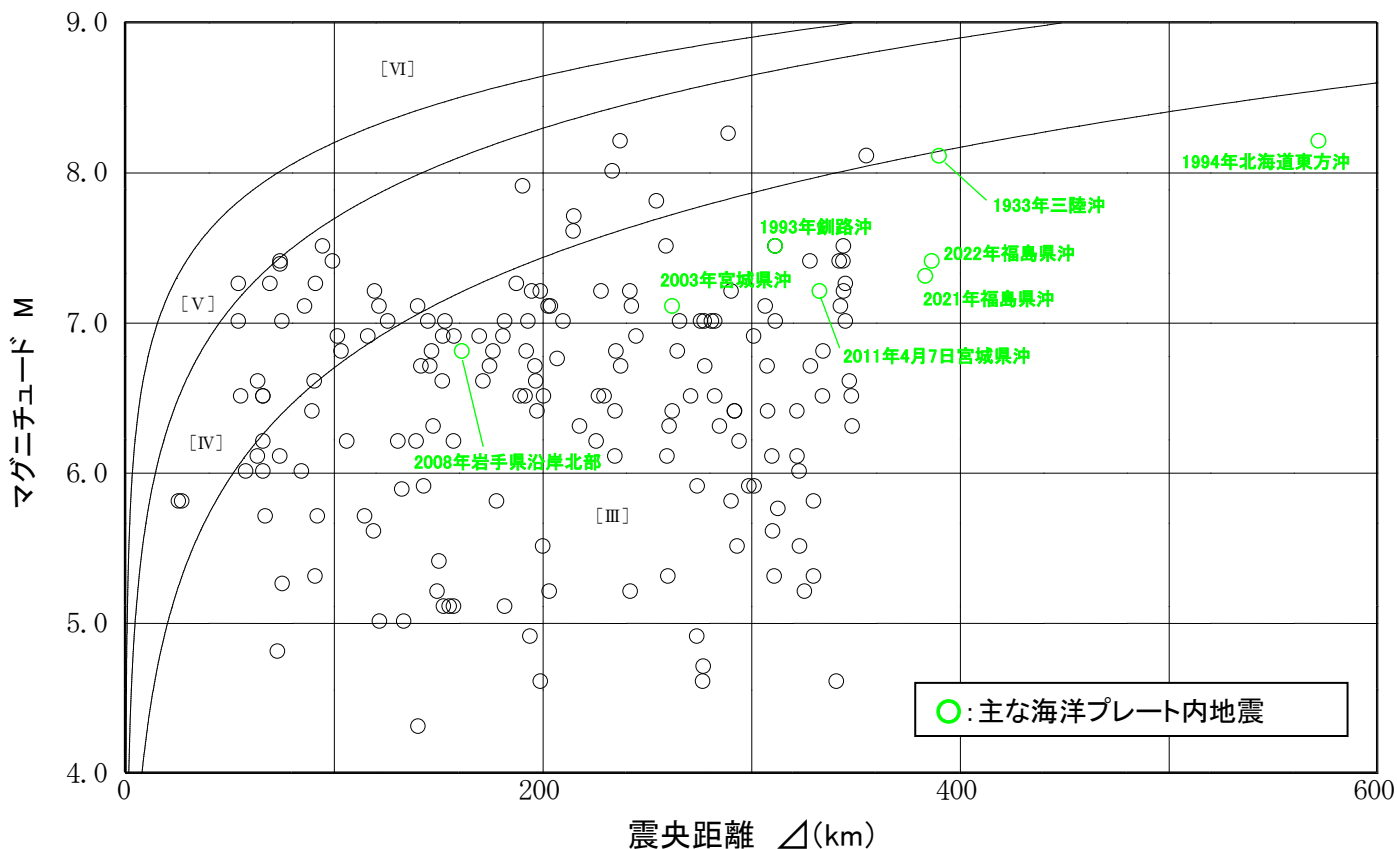
1918年以前は宇佐美ほか(2013), 1919年以降は気象庁(2020)による。
 2021年2月13日福島県沖の地震, 2021年3月20日宮城県沖の地震, 2021年5月1日宮城県沖の地震及び
 2022年3月16日福島県沖の地震は, 気象庁震源リスト
 (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily_map/index.html>)による。

1. 1 主な被害地震

(2) 敷地周辺の主な被害地震のM-Δ図

3.16地震反映

- 敷地周辺の主な被害地震による敷地への影響を検討するため、敷地周辺で発生した主な被害地震のM(マグニチュード)-Δ(震央距離)図を示す。なお、遠方ではあるものの地震規模が大きい1933年三陸沖の地震, 1994年北海道東方沖地震についても示す。
- 村松(1969), 勝又・徳永(1971)の震度(気象庁旧震度階級)の区分によると、海洋プレート内地震の被害地震による敷地の震度は、[Ⅲ]以下である。



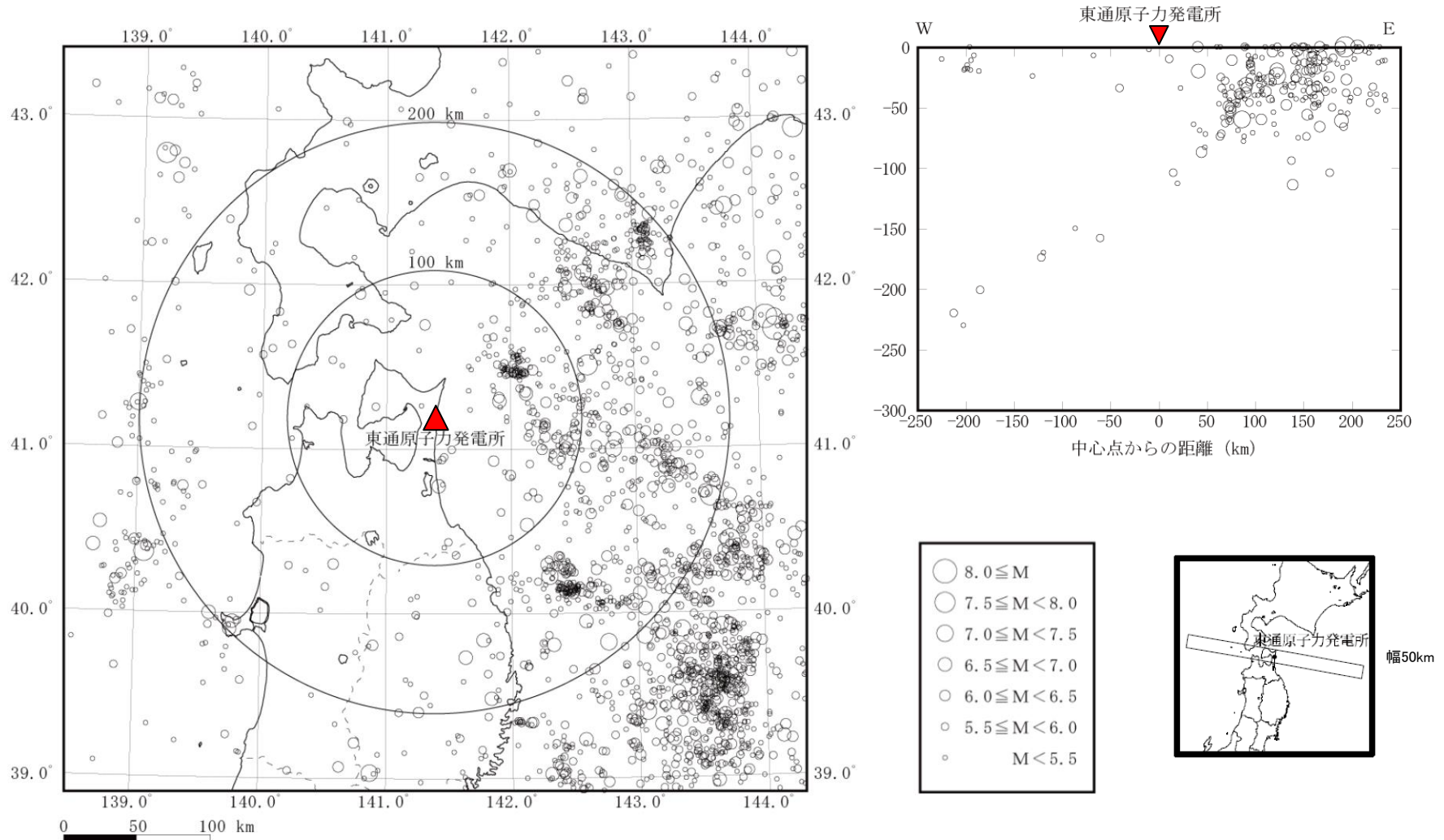
[Ⅵ],[Ⅴ],[Ⅳ]は気象庁旧震度階級で、震度の境界線は村松(1969), 勝又・徳永(1971)による。

※: 2011年東北地方太平洋沖地震のMとΔは、神田ほか(2012)による震度インバージョンによる値(M8.1, Δ=356km)を用いた。

1.2 地震発生状況

(1) 敷地周辺におけるM5.0以上の地震の発生状況

- 太平洋側海域で発生頻度が高い。
- 1919年以降, 敷地から100km以内ではM7を超える地震は発生していない。

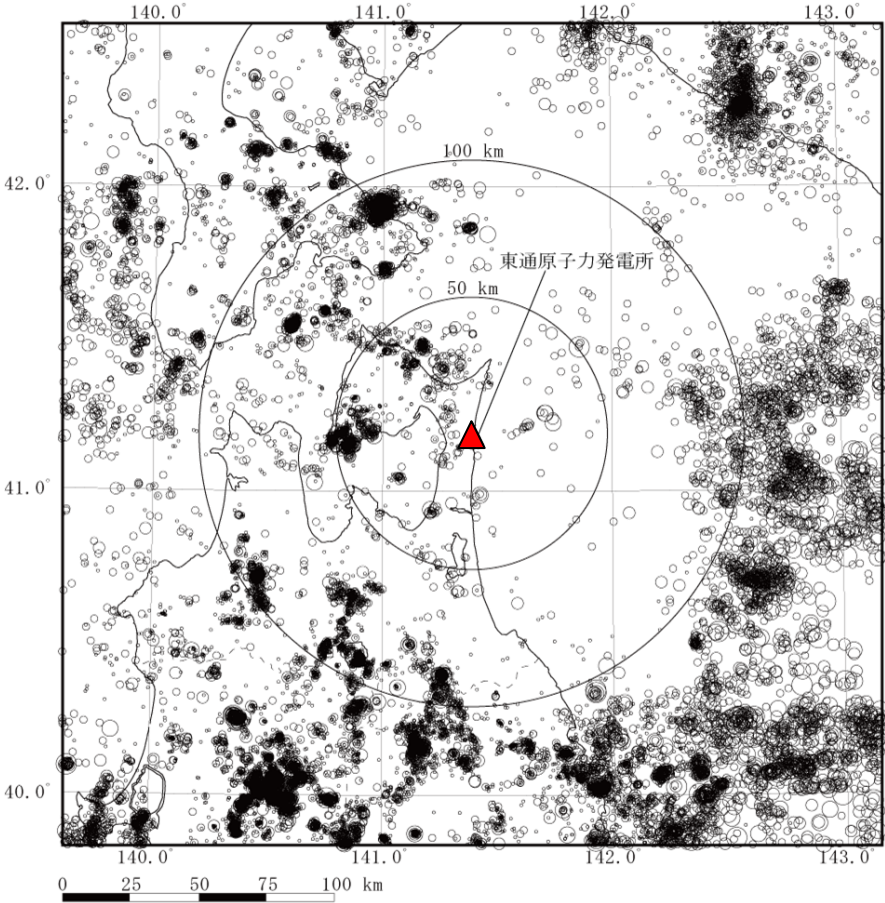


[1919年1月～2018年12月:気象庁(2020)]

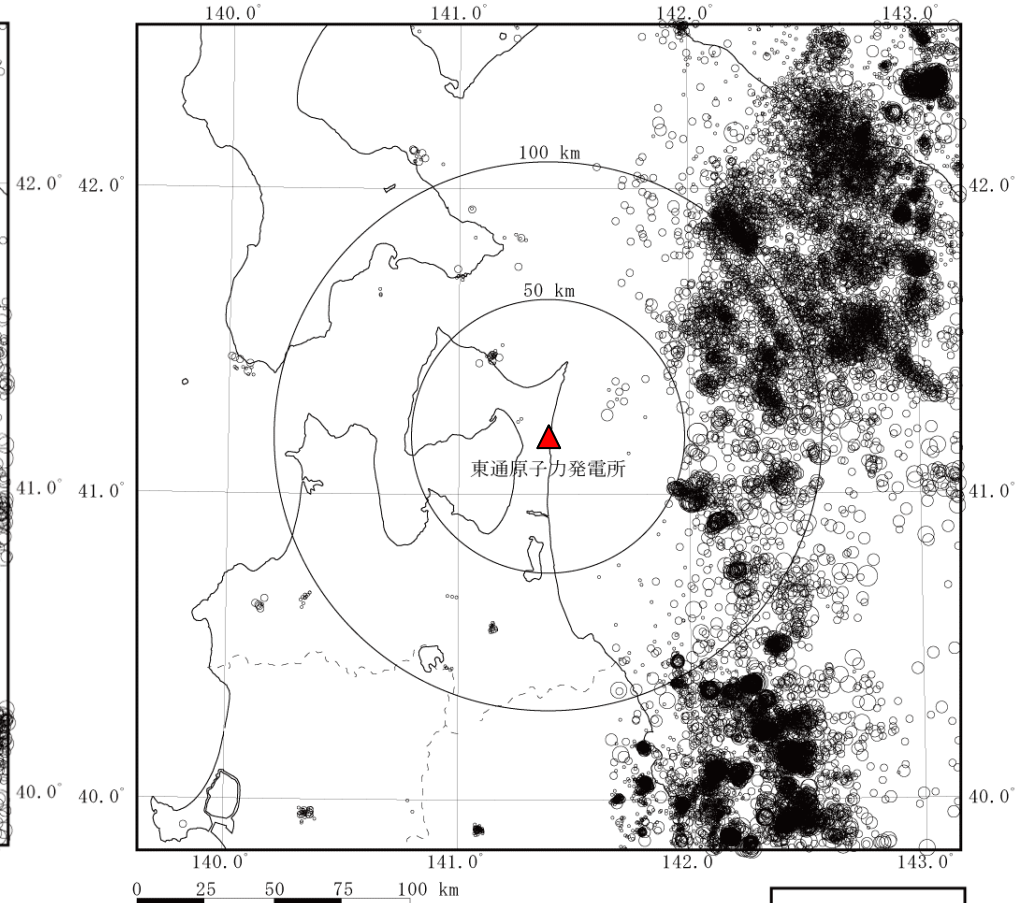
1. 2 地震発生状況

(2) 敷地周辺におけるM5.0以下の地震の発生状況 震央分布図①

- 深さ0～30kmでは、海域のプレート境界付近及び陸域の地殻内で地震が発生。
- 深さ30～60kmでは、多くの地震がプレート境界付近で発生しており、陸域の地震はほとんど見られない。



震源深さ 0～30km



震源深さ 30～60km

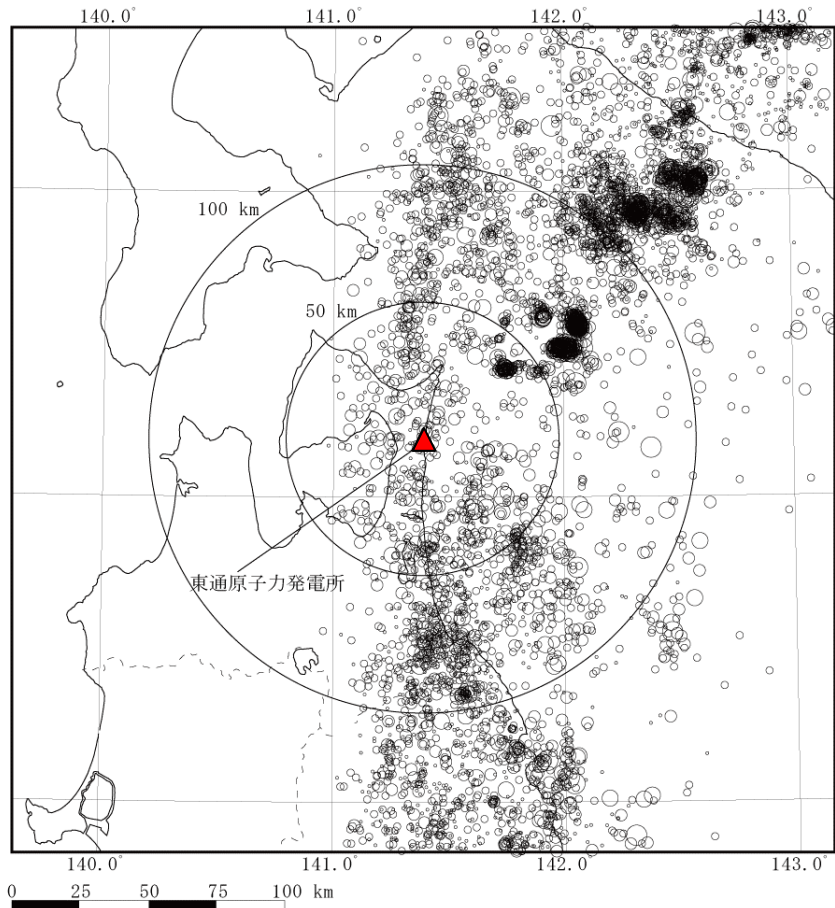


[2011年1月～2018年12月:気象庁(2020)]

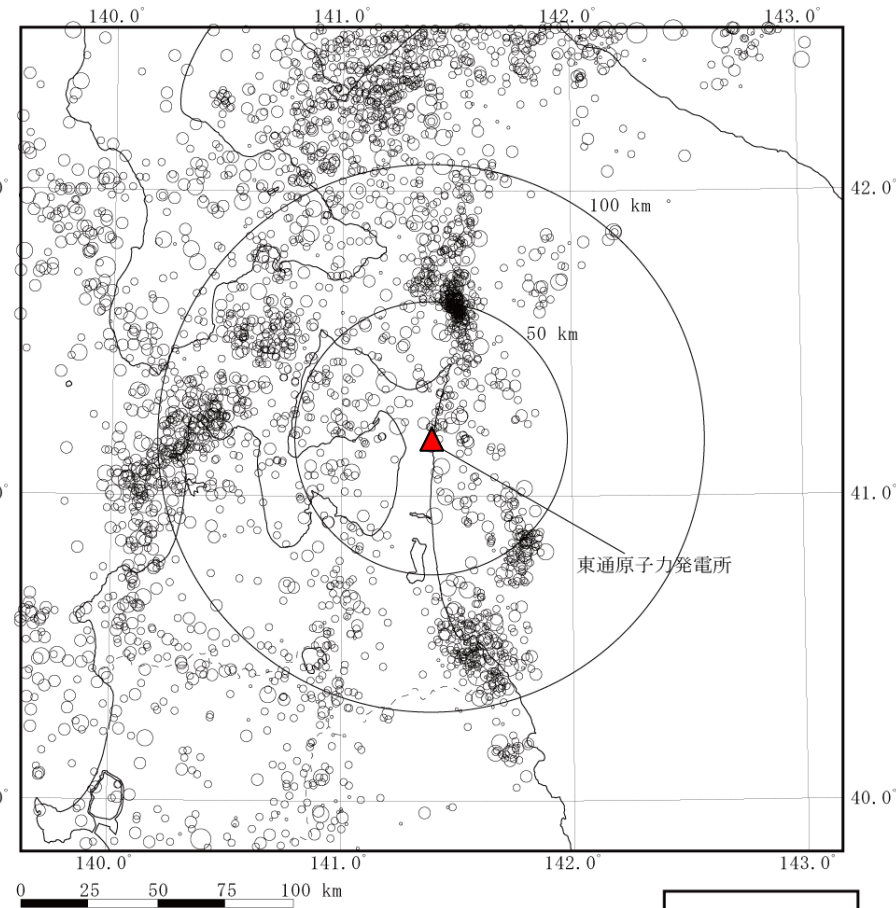
1. 2 地震発生状況

(2) 敷地周辺におけるM5.0以下の地震の発生状況 震央分布図②

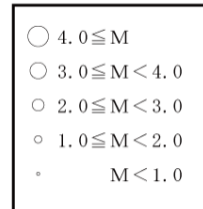
➤ 深さ60km以深では、太平洋プレートの沈み込みに沿って地震の発生が見られる。



震源深さ 60~100km



震源深さ 100km以深

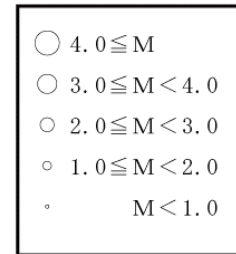
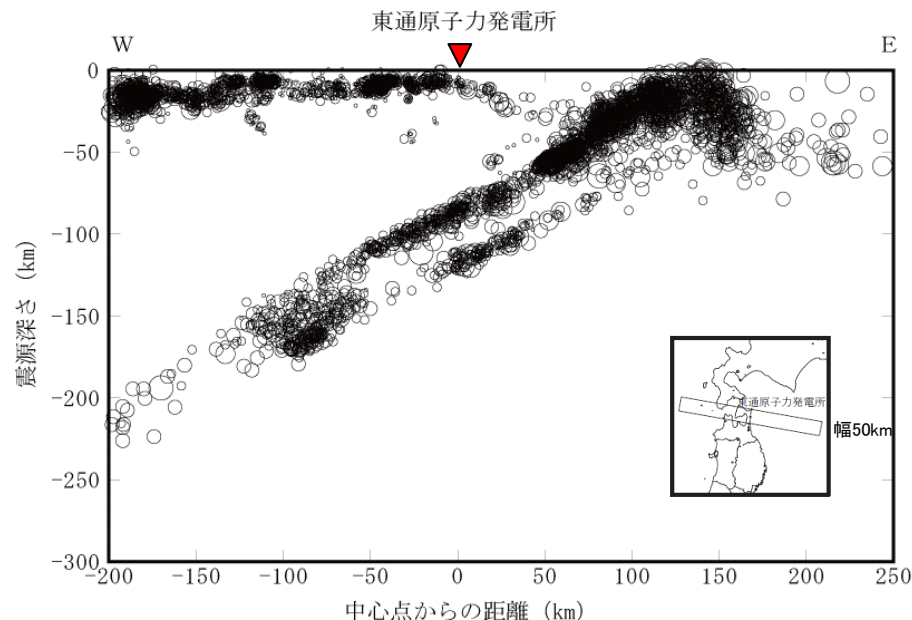
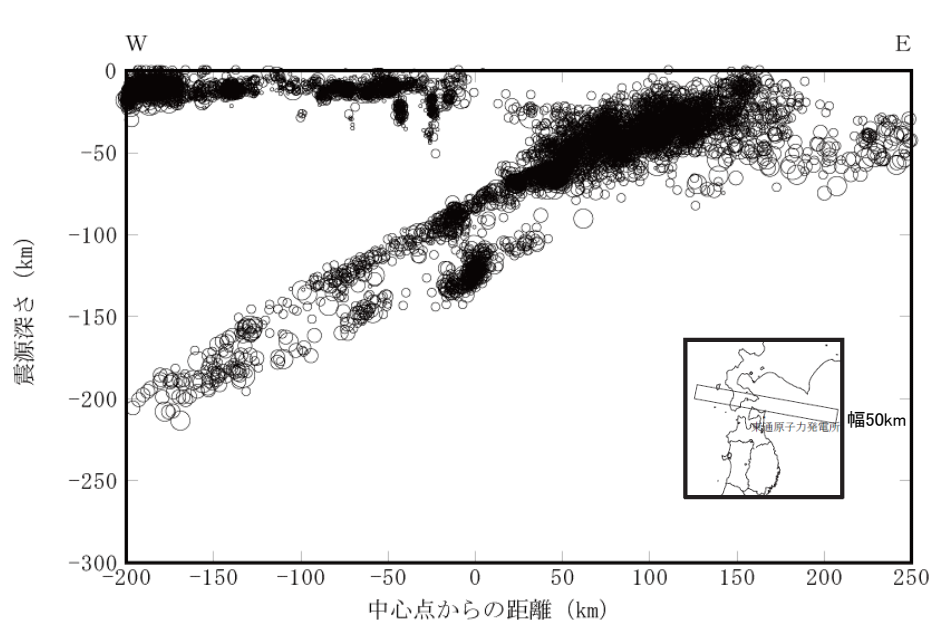


[2011年1月~2018年12月:気象庁(2020)]

1. 2 地震発生状況

(2) 敷地周辺におけるM5.0以下の地震の発生状況 震源深さ分布図①

➤ 太平洋プレートの沈み込みに沿って二重深発地震が見られる。

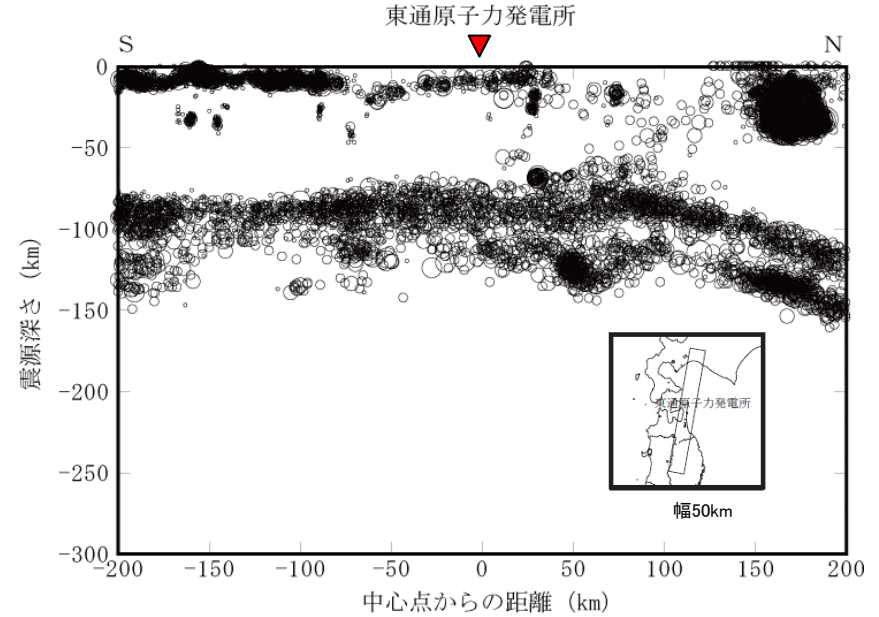
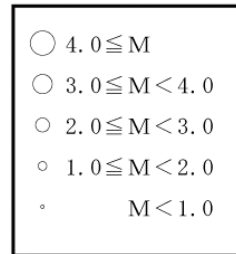
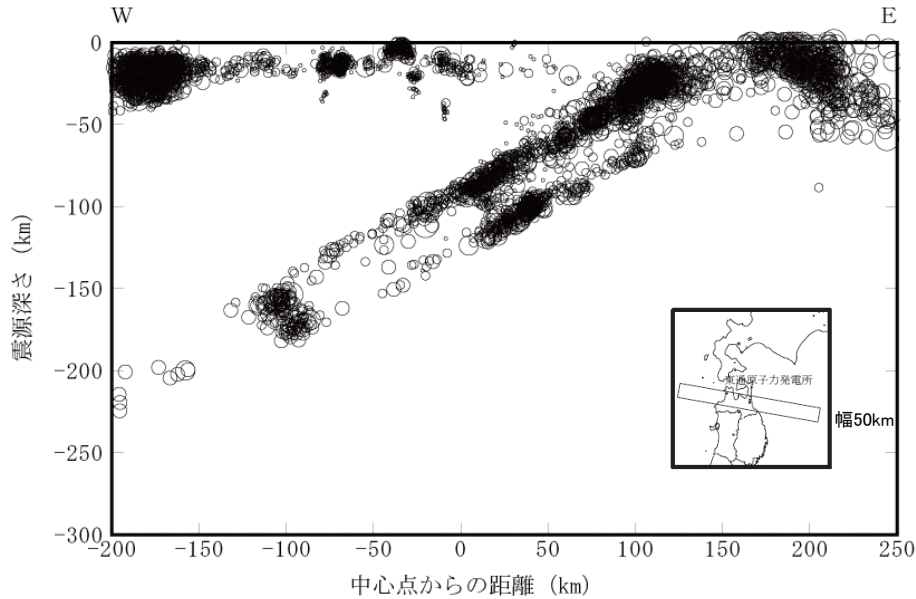


[2011年1月～2018年12月: 気象庁(2020)]

1. 2 地震発生状況

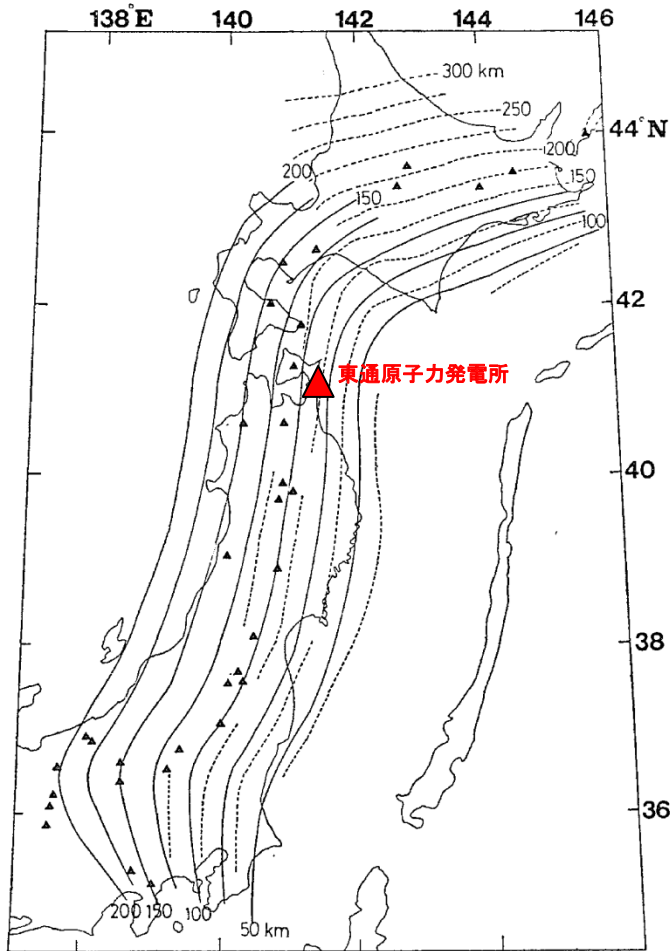
(2) 敷地周辺におけるM5.0以下の地震の発生状況 震源深さ分布図②

▶ 太平洋プレートの沈み込みに沿って二重深発地震が見られる。



[2011年1月～2018年12月:気象庁(2020)]

1.3 太平洋プレートの沈み込み プレート境界面の等深線



特徴

- 敷地が位置する東北地方では、日本海溝で陸側のプレートの下に海洋プレートである太平洋プレートが沈み込んでいる。
- 沈み込んだ太平洋プレートは、陸側に近づくにしたがって深くなっており、敷地は深発地震上面の等深線75kmと100kmの間に位置する。

—— 上面の等深線
- - - 下面の等深線
▲ 活火山及び第四紀の火山の位置

1.4 敷地周辺の地震発生状況 まとめ

3.16地震反映

【主な海洋プレート内地震の被害地震】

- 敷地から100km以内では、海洋プレート内地震の被害地震は知られていない。
- 東北地方の二重深発地震上面では、2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2)(4.7地震)、2021年福島県沖の地震(M7.3)(2.13地震)及び2022年福島県沖の地震(M7.4)(3.16地震)等、M7クラスの地震が発生している。下面の地震としては2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)が発生している。また、日本海溝付近では1933年三陸沖の地震(M8.1)が発生している。
- 北海道では、1993年釧路沖地震(M7.5)、1994年北海道東方沖地震(M8.2)が発生している。
- 海洋プレート内地震の被害地震による敷地の震度は[Ⅲ](気象庁旧震度階級)以下である。

【敷地周辺で発生した地震】

- 1919年以降、敷地から100km以内ではM7を超える地震は発生していない。
- 太平洋プレートの沈み込みに沿って二重深発地震が見られる。

【プレート境界の等深線】

- 沈み込んだ太平洋プレートは、陸側に近づくにしたがって深くなっており、敷地は深発地震上面の等深線75kmと100kmの間に位置する。



敷地から100km以内の海洋プレート内地震の被害地震は知られていないこと、また、敷地は海洋プレートまでの距離が比較的遠い場所に位置していることから、海洋プレート内地震による大きな影響は受けていない。

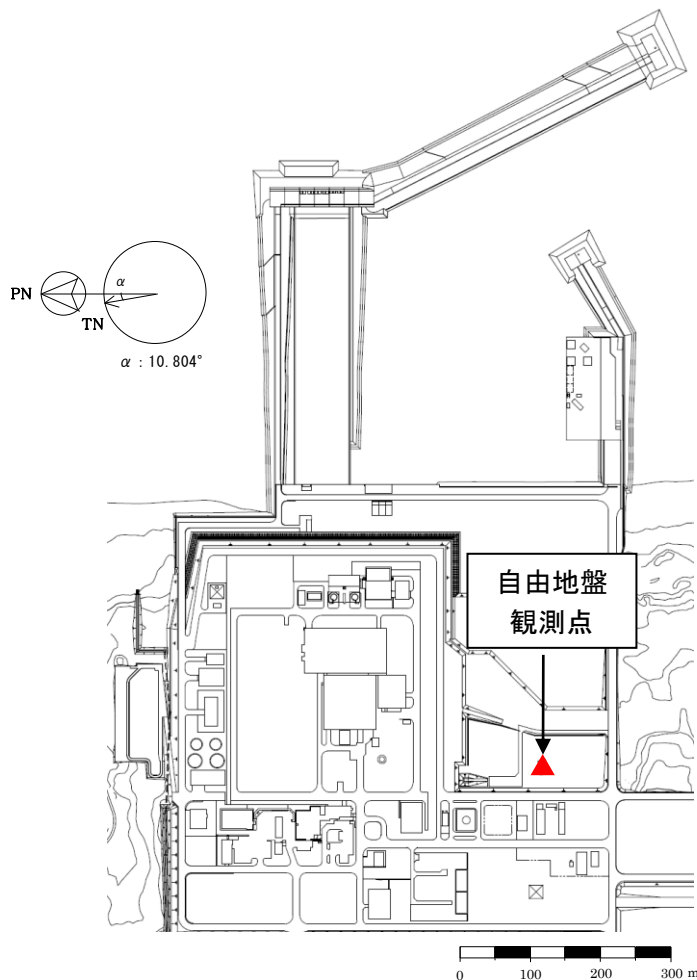
2. 検討に用いる地盤モデル

- 2. 1 敷地における地震観測
- 2. 2 検討に用いる地盤モデル

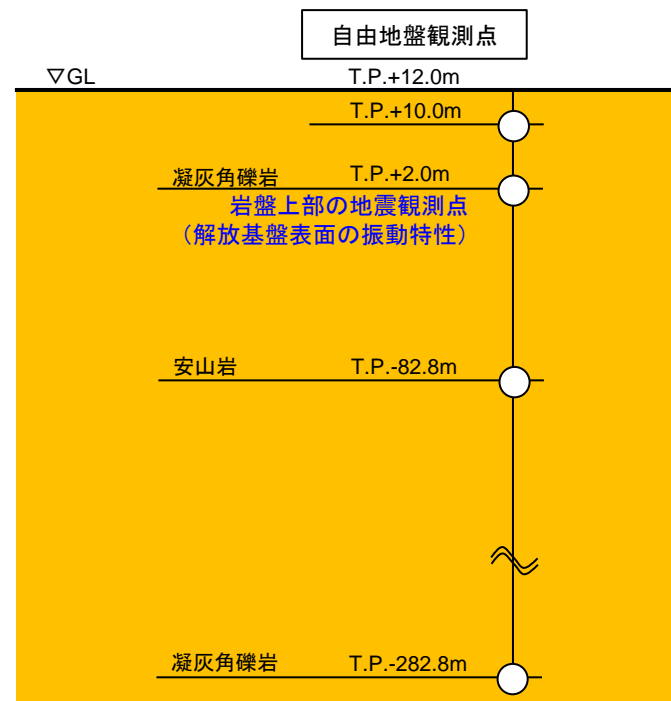
2. 1 敷地における地震観測

➤ 敷地における自由地盤観測点では、原子炉建屋設置位置付近と同じ岩盤に地震計を設置し、1994年4月から観測を行っている。

- 敷地で観測された主な地震については、第902回審査会合(2020年10月2日)資料2-3-2参照。
- 2008年7月までのT.P.+2.0m観測点におけるUD成分については、地震計の設置方法に起因する特性の補正を行っている。



平面配置図



凡例 ○ :地震観測点

地震計鉛直断面位置図

2.2 検討に用いる地盤モデル

(1) 観測記録のはぎとり解析に用いる地盤モデル(はぎとり地盤モデル)

➤ 観測記録のはぎとり波算定に用いる地盤モデルを以下に示す。

T.P. (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	Q _s	Q _p	
+12.0	—	—	—	—	—	—	
+11.5	0.5	1.90	58	130	0.52f ^{0.53}	1.00f ^{0.50}	
+11.0	0.5	1.90	60	190	0.52f ^{0.53}	1.00f ^{0.50}	
+10.0	1	1.90	280	420	9.94f ^{1.00}	1.00f ^{0.50}	
+8.0	2	1.90	280	420	9.94f ^{1.00}	1.00f ^{0.50}	
+6.0	2	1.90	380	570	9.97f ^{1.00}	4.16f ^{0.88}	
+3.0	3	1.90	920	1380	9.97f ^{1.00}	4.16f ^{0.88}	
+2.0	1	2.24	1300	2250	1.02f ^{0.83}	2.36f ^{0.52}	▽岩盤上部の地震観測点 (解放基盤表面の振動特性)
-7.0	9.0	2.24	1300	2250	1.02f ^{0.83}	2.36f ^{0.52}	
-62.0	55.0	2.24	1790	3060	1.02f ^{0.83}	2.36f ^{0.52}	
-82.8	20.8	2.72	1800	3340	1.02f ^{0.83}	2.36f ^{0.52}	
-106.0	23.2	2.72	1800	3340	1.02f ^{0.83}	2.36f ^{0.52}	
-166.0	60.0	2.30	1910	3350	1.57f ^{0.88}	1.53f ^{0.89}	
-190.0	24.0	2.30	2030	3360	1.57f ^{0.88}	1.53f ^{0.89}	
-252.0	62.0	2.30	2100	3390	1.57f ^{0.88}	1.53f ^{0.89}	
-282.8	30.8	2.33	2090	3690	1.57f ^{0.88}	1.53f ^{0.89}	
	∞	2.33	2090	3690	1.57f ^{0.88}	1.53f ^{0.89}	

【青文字】地震観測点位置を示す。

※: 解放基盤表面の地震動評価として採用する観測点はT.P.+2.0m, 地盤のせん断波速度はV_s=1300m/s。

2.2 検討に用いる地盤モデル (2)統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル

➤ 断層モデル手法を用いた地震動評価には統計的グリーン関数法を使用している。地震基盤波の上昇計算に用いる地盤モデルを以下に示す。

T.P. (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	Q _s	Q _p	
+2.0	—	—	—	—	—	—	▽岩盤上部の地震観測点
-7.0	9.0	2.24	1300	2250	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}	(解放基盤表面の振動特性)
-62.0	55.0	2.24	1790	3060	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}	
-82.8	20.8	2.72	1800	3340	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}	
-106.0	23.2	2.72	1800	3340	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}	
-166.0	60.0	2.30	1910	3350	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}	
-190.0	24.0	2.30	2030	3360	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}	
-252.0	62.0	2.30	2100	3390	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}	
-282.8	30.8	2.33	2090	3690	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}	
-574.8	292.0	2.44	2390	3690	100	100	
-1495.8	921.0	2.45	2460	3750	100	100	
-2441.8	946.0	2.48	2590	3960	100	100	
-2987.8	546.0	2.50	2680	4160	100	100	▽地震基盤
	∞	2.63	3340	5800	150	150	

【青文字】地震観測点位置を示す。

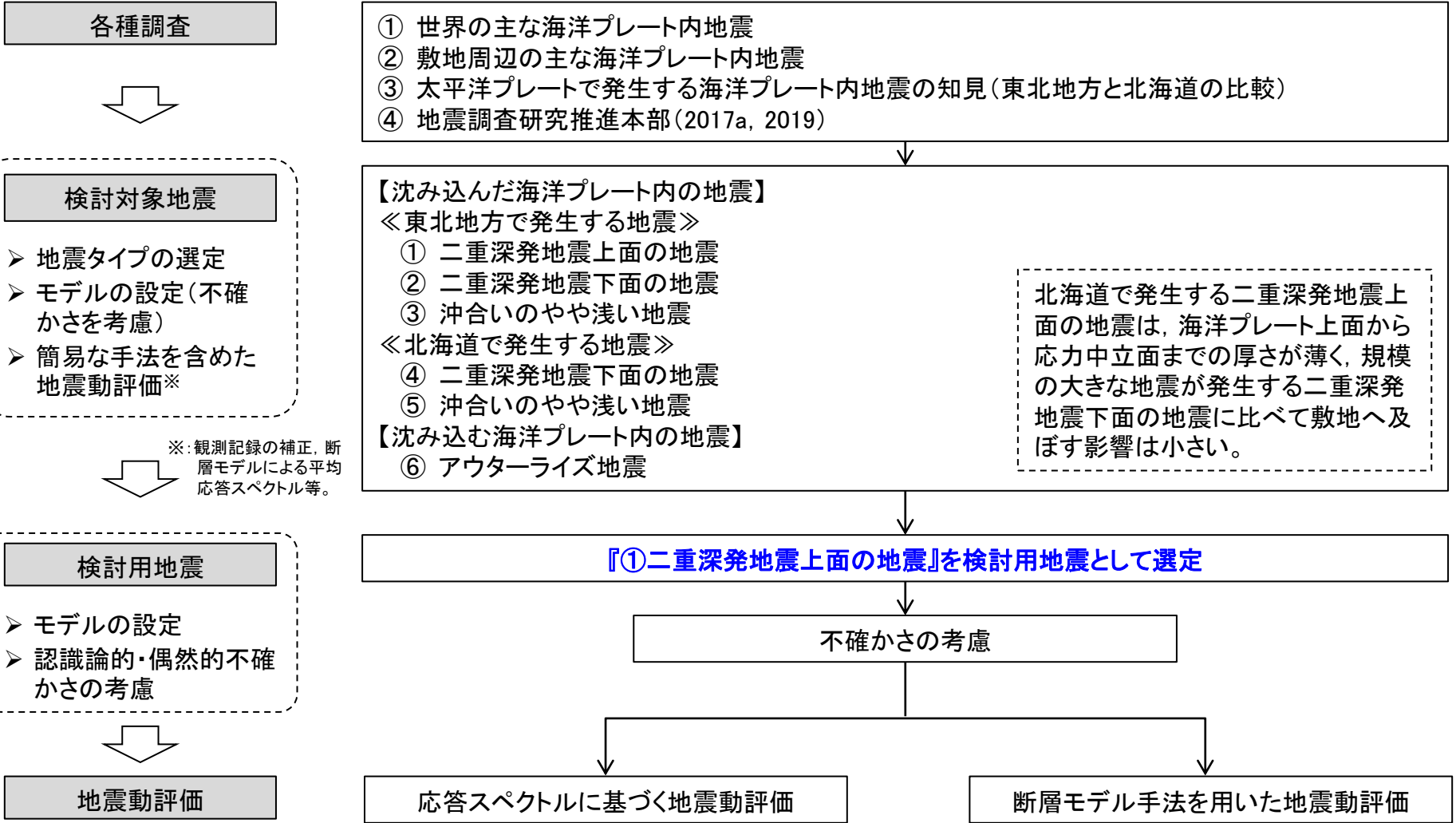
※:解放基盤表面の地震動評価として採用する観測点はT.P.+2.0m, 地盤のせん断波速度はV_s=1300m/s。

3. 海洋プレート内地震の発生状況と特徴

- 3. 1 海洋プレート内地震の地震動評価フロー
- 3. 2 世界の主な海洋プレート内地震
- 3. 3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴
- 3. 4 まとめ

3. 1 海洋プレート内地震の地震動評価フロー

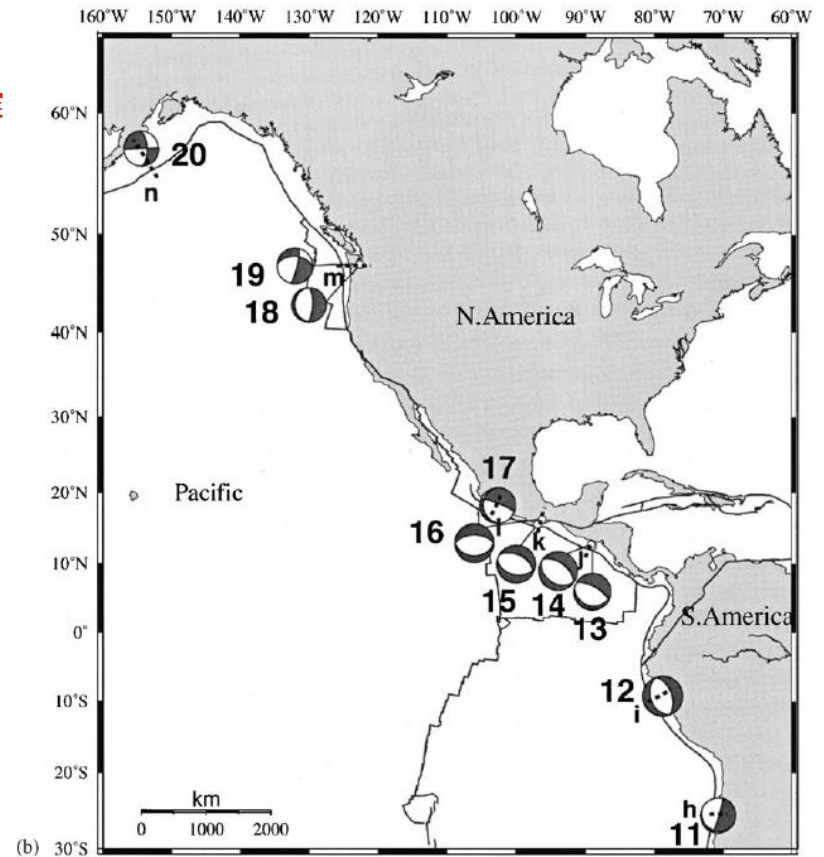
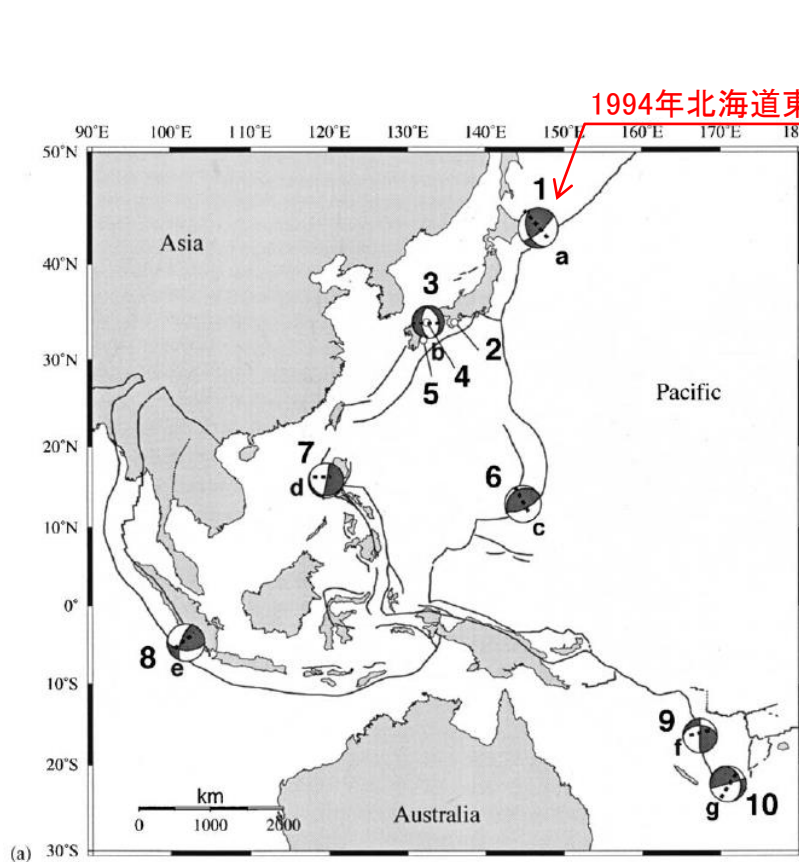
➤ 海洋プレート内地震の評価フローを以下に示す。



3. 2 世界の主な海洋プレート内地震 (1)世界の海洋プレート内地震① 主な地震の分布

【Seno and Yoshida(2004)】

- ハーバードCMTカタログなどから、1977~2001年に発生したMw7.0以上、深さ20~60kmの海洋プレート内地震を抽出し、整理している。
- 地震規模の最大は1994年北海道東方沖地震(M8.2)である。



規模の大きな浅い海洋プレート内地震の震源メカニズム
〔Seno and Yoshida(2004)に一部加筆〕

3. 2 世界の主な海洋プレート内地震

(1)世界の海洋プレート内地震② 主な地震の表

【Seno and Yoshida(2004)】

世界的に見た場合、1994年北海道東方沖地震(M8.2※)が海洋プレート内地震として最大規模である。

※: 気象庁マグニチュード

浅い海洋プレート内地震の一覧〔Seno and Yoshida(2004)に一部加筆〕

Region event	Date	Epicenter		M_w	Depth (km)	Strike/dip/rake			Age (Ma)	Upper plate stress
		°N	°E			(°)	(°)	(°)		
E. Hokkaido										
1 Hokkaido-toho-oki	4 October 1994	43.42	146.81	8.3	33	158	41	24	123	
Kyushu-SW. Japan										
2 Kii-Yamato ^a	7 March 1899	34.1	136.1	7.0	45				15-30	G
3 Geiyo	24 March 2001	34.13	132.71	6.8	47	181	57	-67		
4 Geiyo ^a	2 June 1905	34.1	132.5	7.2	50					
5 Hyuganda ^a	2 November 1931	32.2	132.1	7.1	40					
S. Mariana										
6 Guam	8 August 1993	12.98	144.80	7.7	45	238	24	82	164	G
Manila										
7 Manila	11 December 1999	15.87	119.64	7.2	35	112	13	-169	22	
Sumatra										
8 Sumatra	4 June 2000	-4.73	101.94	7.8	44	92	55	152	66	
Vanuatu										
9 Vanuatu	13 July 1994	-16.50	167.35	7.1	25	272	42	2	35-52	G
10 Vanuatu	6 July 1981	-22.31	170.90	7.5	58	345	30	-179		
N. Chile										
11 Taltal	23 February 1965	-25.67	-70.79	7.0	60	16	86	-78	48	G
C. Peru										
12 Peru	31 May 1970	-9.18	-78.82	7.9	43	160	37	-90	44	G
El Salvador										
13 El Salvador	19 June 1982	12.65	-88.97	7.3	52	102	25	-106	>37	G
14 El Salvador	13 January 2001	12.97	-89.13	7.7	56	121	35	-95		
Mexico										
15 Oaxaca	30 September 1999	15.70	-96.96	7.4	47	102	42	-103	10-17	G
16 Oaxaca	15 January 1931	16.4	-96.3	7.7	40	90	34	-90		
17 Michoacan	11 January 1997	18.34	-102.58	7.1	40	175	18	-28		
N. Cascadia										
18 Nisqually	28 February 2001	47.14	-122.53	6.8	47	176	17	-96	10	G
19 Olympia ^b	13 April 1949	47.17	-122.62	7.1	54	14	82	-135		
Alaska										
20 Kodiak Island	6 December 1999	57.35	-154.35	7.0	36	357	63	-180	55	G

^a Hypocenters and magnitudes are from Utsu (1982), except for the depths of the 1899 and 1905 events which are estimated in this study. Magnitudes are referring to the Japan Meteorological Agency (JMA) magnitude.

^b Hypocenters and magnitudes are from Baker and Langston (1987).

Hypocenters for other events are from the Harvard University centroid moment tensor catalogue (HCMT), except for the depths by individual studies mentioned in the text. Strike, dip and rake are from HCMT except for the 1993 Guam event: Tanioka et al. (1995), 1965 Taltal event: Malgrange and Madariaga (1983), 1970 Peru event: Abe (1972), 1931 Oaxaca event: Singh et al. (1985), and 1949 Olympia event: Baker and Langston (1987). G abbreviates gradient in the upper plate stresses.

3. 2 世界の主な海洋プレート内地震

(1) 世界の海洋プレート内地震③ 島弧の特徴

【Seno and Yamanaka(1998)】

■世界の海洋プレート内地震の特徴

- 世界の海洋プレートと島弧に働く応力の状況、プレートの年代がまとめられている。
- 東北日本弧(N.Honshu), カムチャツカ(Kamchatka)及び千島弧(Kuril)は、海洋プレート内の応力が中立(Neutral), 背弧の応力が圧縮(Compression)である。
- また、千島弧と比較して東北日本弧の海洋プレートは古い年代となっている。

海洋プレート及び背弧の応力状態
[Seno and Yamanaka(1998)に一部加筆]

Arc	Slab Stress	Back-arc Stress	Slab Age (Ma)	Ref. (slab)	Ref. (arc)
S. Ryukyu	C	T	45	(1)	(2)
Izu-Bonin	C	T	150	(3)	(4)
Tonga	C	T	100	(3)	(5)
Kermadec	C	T	90	(3)	(5)
Kamchatka	N	C	90	(6)	(7)
Kuril	N	C	110	(8)	(9)
N. Honshu	N	C	130	(10)	(11)
E. Aleutians	N	T	53	(12)	(11)
S. Honshu	N	T	20	(13)	(9)
New Britain	N	T	30	(14)	(15)
Philippines	T	C	40	(16)	(16)
Sumatra	T	C	50	(3)	(17)
Peru	T	C	30	(18)	(19)
Chile	T	C	40	(18)	(19)
Mariana	T	T	165	(3)	(20)
Kyushu	T	T	26	(1)	(21)
Aegean	T	T	110	(22)	(23)

Slab Stressの凡例は以下の通り。

T: down-dip tension

C: down-dip compression

N: neutral

3. 2 世界の主な海洋プレート内地震

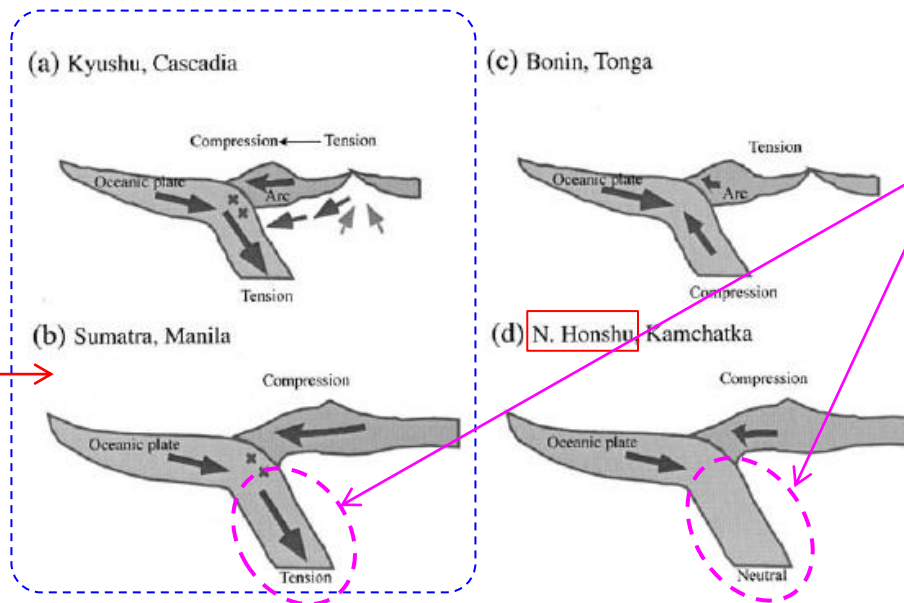
(1)世界の海洋プレート内地震④ 海洋プレートと島弧の応力の関係

【Seno and Yoshida(2004)】

- 海洋プレートと島弧に働く応力の関係を4つのタイプに分類した。
- 規模の大きい海洋プレート内地震は、海洋プレート内に引張力が作用し、かつ、島弧の応力状態が高いFig.12(a), (b)のタイプの地域で発生している。[Fig.12(a), (b)に該当する地域では、1994年北海道東方沖地震(M8.2※)、1993年グアムの地震(Mw7.7)、2000年スマトラの地震(Mw7.8)等が発生している。] ※: 気象庁マグニチュード
- 大きな海洋プレート内地震が発生していないFig.12(c), (d)のタイプは、海洋プレートに圧縮力が作用している場合か、あるいは、海洋プレート内に中立な応力を持っている場合である。これらの場合、島弧の圧縮の応力に対しバランスが保たれている。

規模の大きな海洋プレート内地震が発生するタイプ →

北海道(千島弧)は(b)に分類されている。
(文献中に、「This case is seen in Sumatra, Manila, and E.Hokkaido.」の記載がある。)



北海道と東北地方では、沈み込んだ海洋プレート内の応力状態に違いが見られる。東北地方には大きな応力は発生していない(Neutral)。

← 東北日本弧は(d)に分類されている。

Fig. 12. Relationships between the slab and arc stresses. The ridge push, slab pull and the fore-arc collision force are balanced (Seno and Yamanaka, 1998). (a) The slab is down-dip tensional and the arc is tensional in the back-arc and compressional in the fore-arc. (b) The slab is down-dip tensional and the arc is compressional. (c) The slab is down-dip compressional and the arc is tensional. (d) The slab is neutral in the stress state and the arc is compressional. In regimes (a) and (b), large shallow intraslab earthquakes tend to occur.

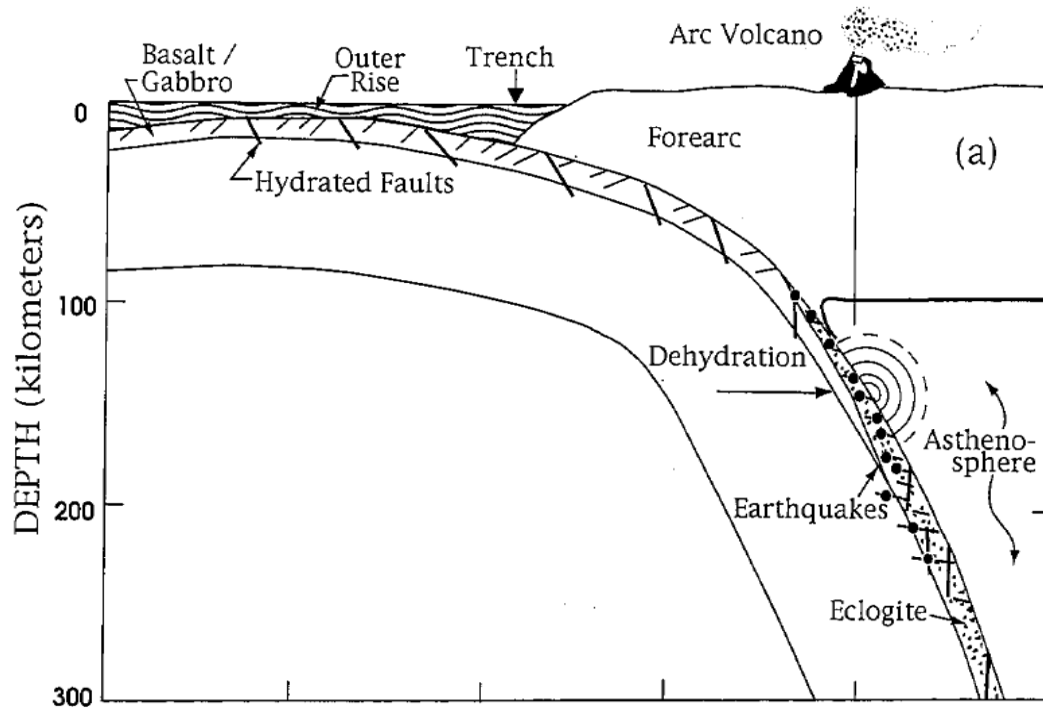
Seno and Yoshida(2004)に一部加筆

3. 2 世界の主な海洋プレート内地震 (2)アウターライズ地震 発生メカニズム

【Kirby et al.(1996)】

■アウターライズ地震の発生メカニズム

- 海洋プレートは、海溝で沈み込む際に下方に曲げられ、そのため海溝付近の海洋プレートの浅い部分で正断層型の地震が発生する。
- この正断層には、陸側と海側に傾斜した両方のタイプがあるが、どちらも傾斜角 60° 程度になる(海洋プレート表面となす角度が 60° 程度)。



海溝－アウターライズにおけるプレートのベンディングによる正断層地震の発生と海洋プレート内地震としての再活動

3. 2 世界の主な海洋プレート内地震 (3)まとめ

1. 沈み込んだ海洋プレート内地震

- 敷地が位置する東北地方(東北日本弧)と北海道(千島弧)には、同じ太平洋プレートが沈み込んでいる。それぞれの地域では、地震発生の最大深さや海洋プレートの収束速度に類似性が見られるものの、地震面の傾角及びカップリングの強さに差異が認められる。(補足説明資料1章1参照)
- 世界的に見た場合、沈み込んだ海洋プレート内地震の最大規模は1994年北海道東方沖地震(M8.2)である。
- 東北地方と北海道では、海洋プレート内部及び島弧側の応力状態に違いがみられる。北海道(千島弧)は規模の大きな海洋プレート内地震が発生する地域に区分されるのに対し、東北地方(東北日本弧)は規模の大きな海洋プレート内地震が発生しない地域に区分される。
- 沈み込んだ海洋プレート内地震は、アウターライズで生じた正断層の再活動と考えられる。

2. 沈み込む海洋プレート内地震(アウターライズ地震)

- 海洋プレートが海溝から沈み込む際に正断層が発生する。
- これまで知られている正断層のアウターライズ地震の最大規模は、東北地方の海溝東側で発生した1933年三陸沖の地震(M8.1)である。津波による被害が発生したが、地震による被害は少なかった。(補足説明資料1章1参照)

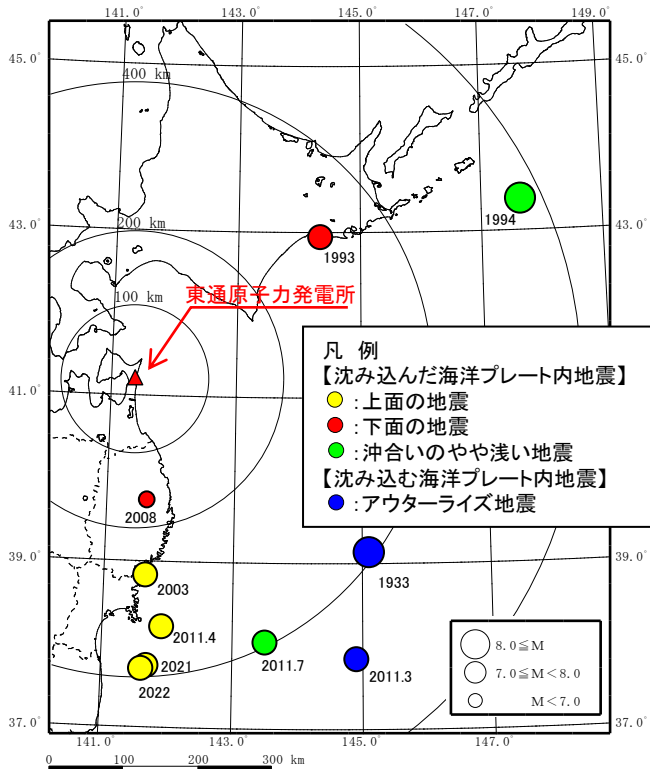
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(1) 敷地周辺の主な海洋プレート内地震

3.16地震反映

- 東北地方から北海道では、海溝から陸側に向かって沈み込んだ海洋プレート内で発生する地震は、二重深発地震を形成している。
- 東北地方(東北日本弧)では、下面(DE型)に比べて上面(DC型)の活動が活発で、M7クラスの地震が発生しており、その最大規模は2022年福島県沖の地震(M7.4)(3.16地震)である。一方、下面(DE型)ではM7を超える地震は発生しておらず、その最大規模は2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)である。沖合のやや浅い地震としては2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)が最大である。
- 北海道(千島弧)では上面(DC型)に比べ下面(DE型)の活動が活発で、最大規模としては1993年釧路沖地震(M7.5)がある。また、沖合のやや浅い地震として、1994年北海道東方沖地震(M8.2)がある。
- アウターライズ地震としては、1933年三陸沖の地震(M8.1)が発生している。

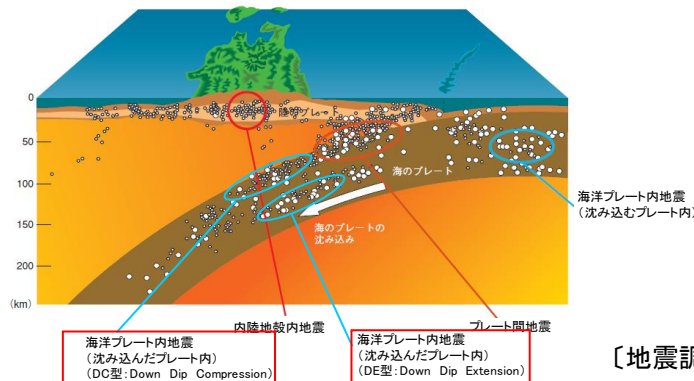
敷地周辺の主な海洋プレート内地震



主な海洋プレート内地震の震央分布

※:地震諸元は気象庁による

地震タイプ		東北地方(東北日本弧)	北海道(千島弧)
海洋プレート沈み込んだ地震	二重深発地震 上面の地震(DC型)	2003年宮城県沖の地震(M7.1) 2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2) 2021年福島県沖の地震(M7.3) 2022年福島県沖の地震(M7.4)	(規模の大きな地震は知られていない)
	二重深発地震 下面の地震(DE型)	2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)	1993年釧路沖地震(M7.5)
	沖合のやや浅い地震	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)
沈み込む海洋プレート内地震 (アウターライズ地震)		1933年三陸沖の地震(M8.1) 2011年3月11日三陸沖の地震(M7.5)	(規模の大きな地震は知られていない)



地震発生タイプの模式図

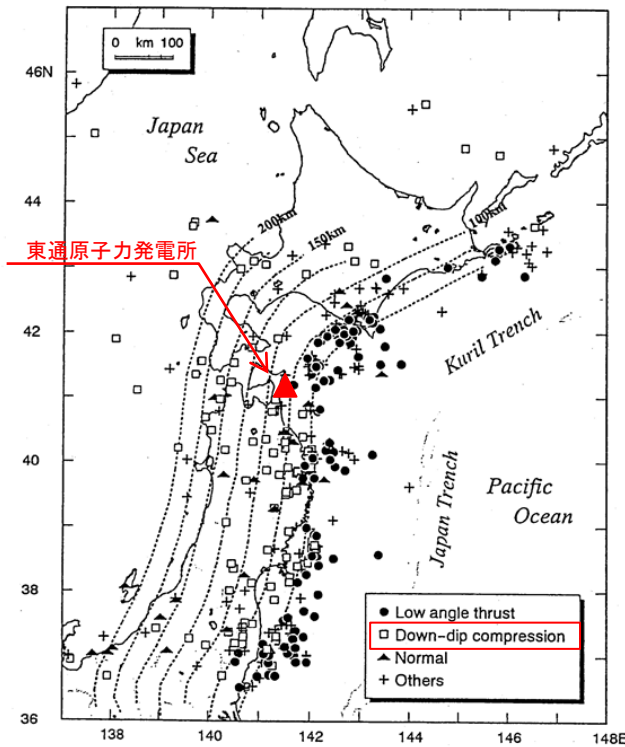
[地震調査研究推進本部(2017b)に一部加筆]

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (2) 太平洋プレートで発生する海洋プレート内地震

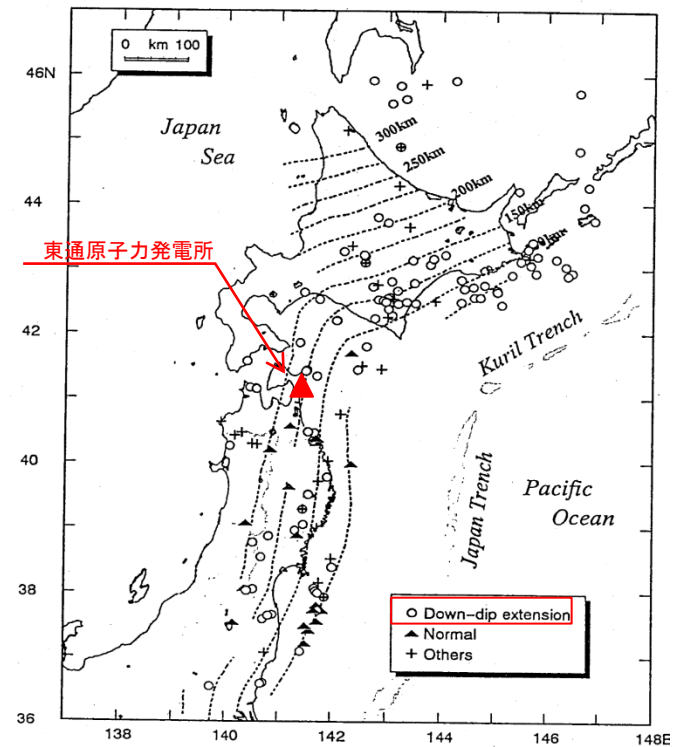
Kosuga et al.(1996)では、東北地方と北海道では二重深発地震の上面及び下面の活動に違いがあることを示している。

【Kosuga et al.(1996)】

- ◆ 東北地方では、海洋プレート上面で発生するDown-dip compressionの地震が優勢である。
- ◆ 北海道では、海洋プレート下面で発生するDown-dip extensionの地震が優勢である。



二重深発地震上面の地震



二重深発地震下面の地震

Fig. 6 (continued).

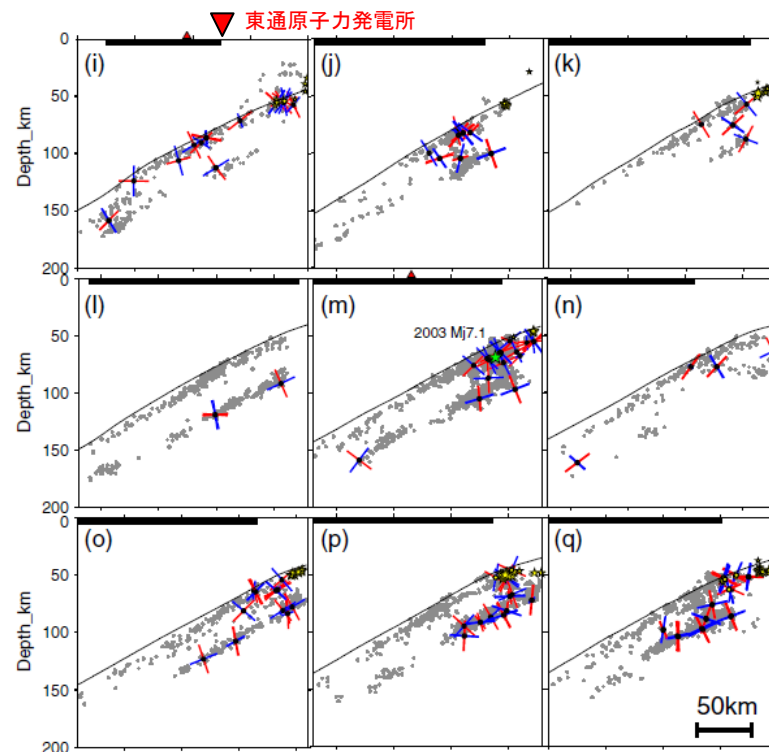
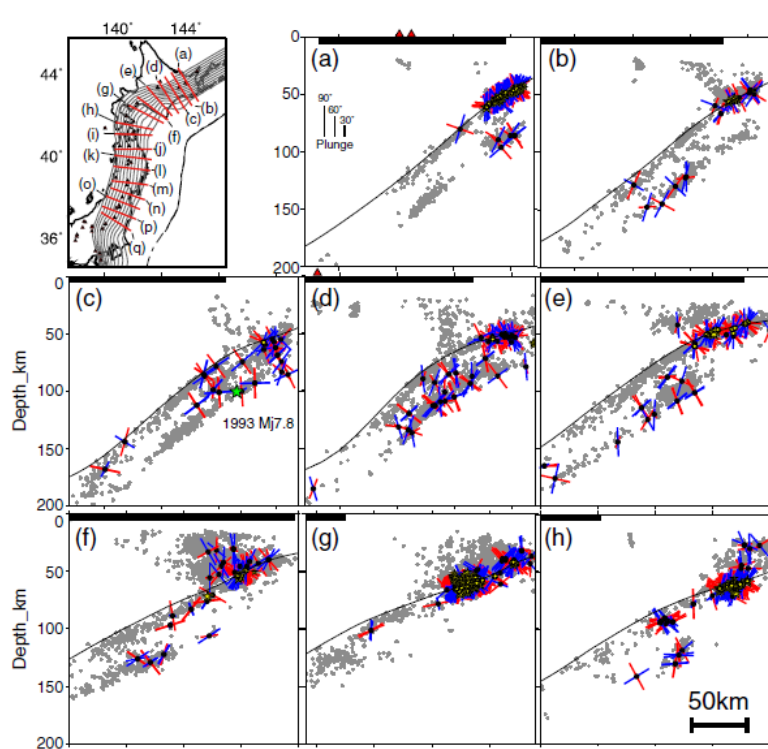
Kosuga et al.(1996)に一部加筆

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (2) 太平洋プレートで発生する海洋プレート内地震

Kita et al.(2010)では、東北地方及び北海道における海洋プレート内地震の上面と下面の発生状況の特徴を示している。

【Kita et al.(2010)】

- ◆ 震源深さ分布より、海洋プレート内地震の多くは、二重深発地震の上面及び下面で発生している。
- ◆ また、上面と下面の間の領域(面間)にも地震の発生が見られる。



●: 各断面から10km以内で発生した地震, 青線:T軸, 赤線:P軸, ☆: 繰返し地震, ●: プレート境界で発生した低角逆断層地震, 黒線: プレート上面

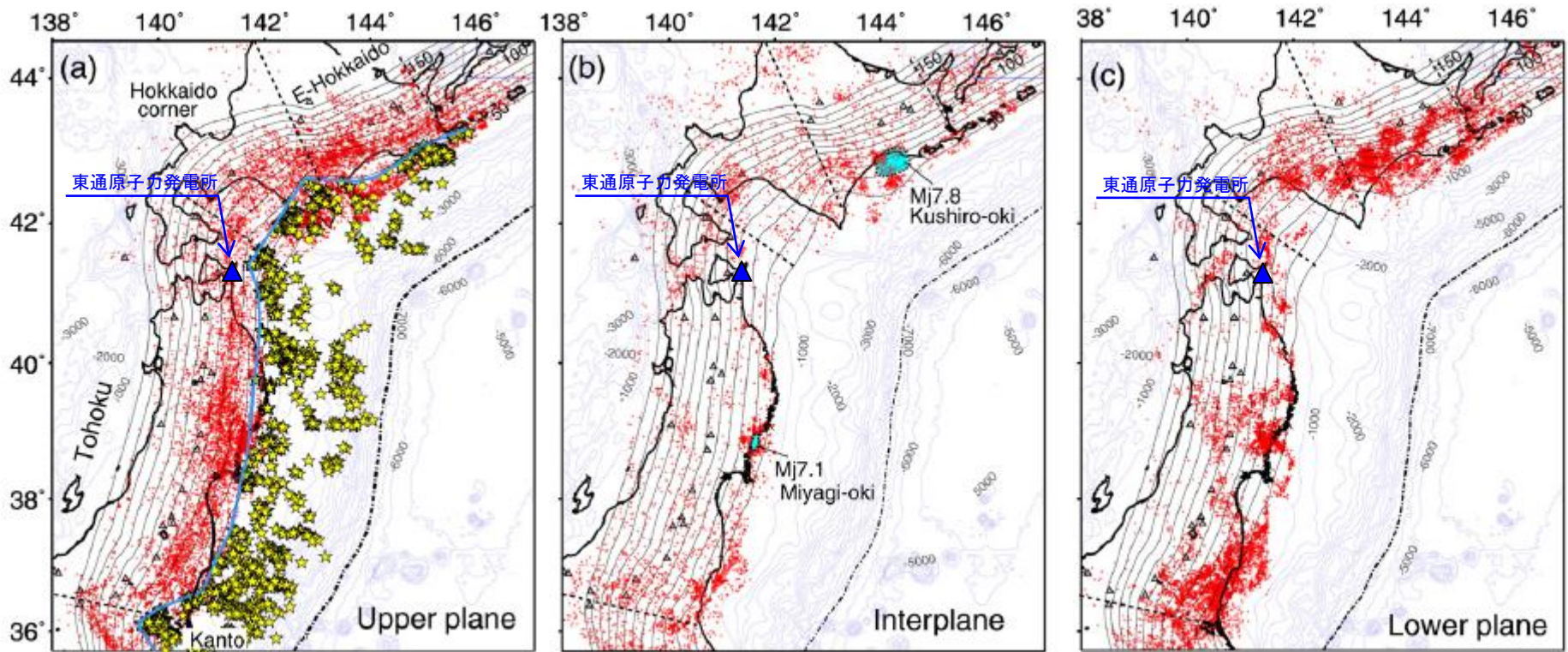
震源の島弧横断鉛直断面(一部加筆)

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (2) 太平洋プレートで発生する海洋プレート内地震

Kita et al.(2010)では、特に下面の地震の発生状況には非一様性が認められることを指摘している。

【Kita et al.(2010)】

- ◆ 上面の地震は、前弧側にやや多いものの、全域にわたって空間的にほぼ一様に分布する。
- ◆ それに対し下面の地震は、空間的に非一様に分布し、北海道東部、東北中央部、東北南東部にみられる。千島弧と東北日本弧の会合部では、深さ120km以浅の下面の地震活動は非常に低い。
- ◆ 面間地震は、下面の地震が発生する地域にみられる。東北北部(北緯40~41度)ではほとんど活動が見られない。



●: 海洋プレート内地震の震源, ▲: 活火山, 黒線: 海洋プレート上面の等深線, 青太線: プレート間地震の西縁, 青細線: 500mごとの海底等深線, ★: 繰返し地震, ●: 低角逆断層地震, 青網掛: 1993年釧路沖地震及び2003年宮城県沖の地震の余震範囲

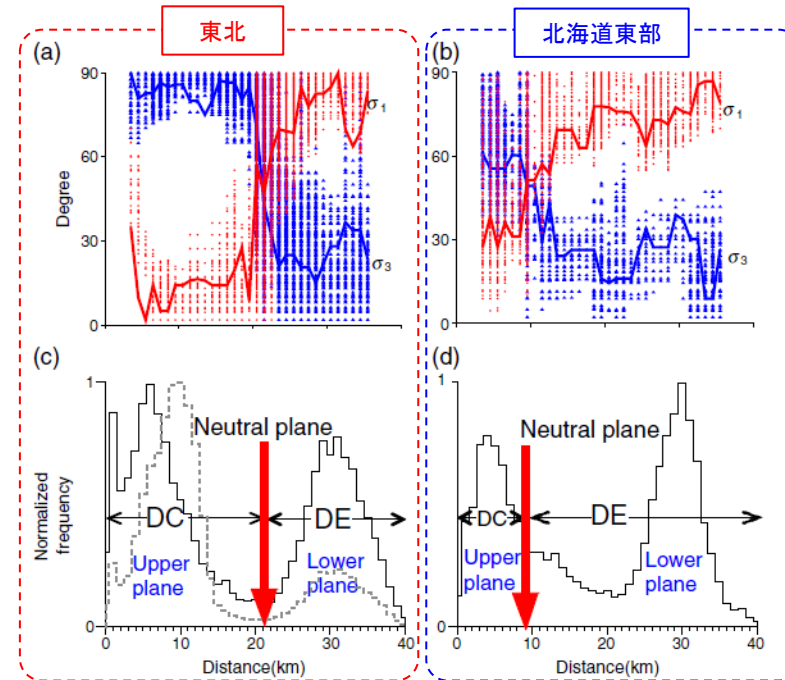
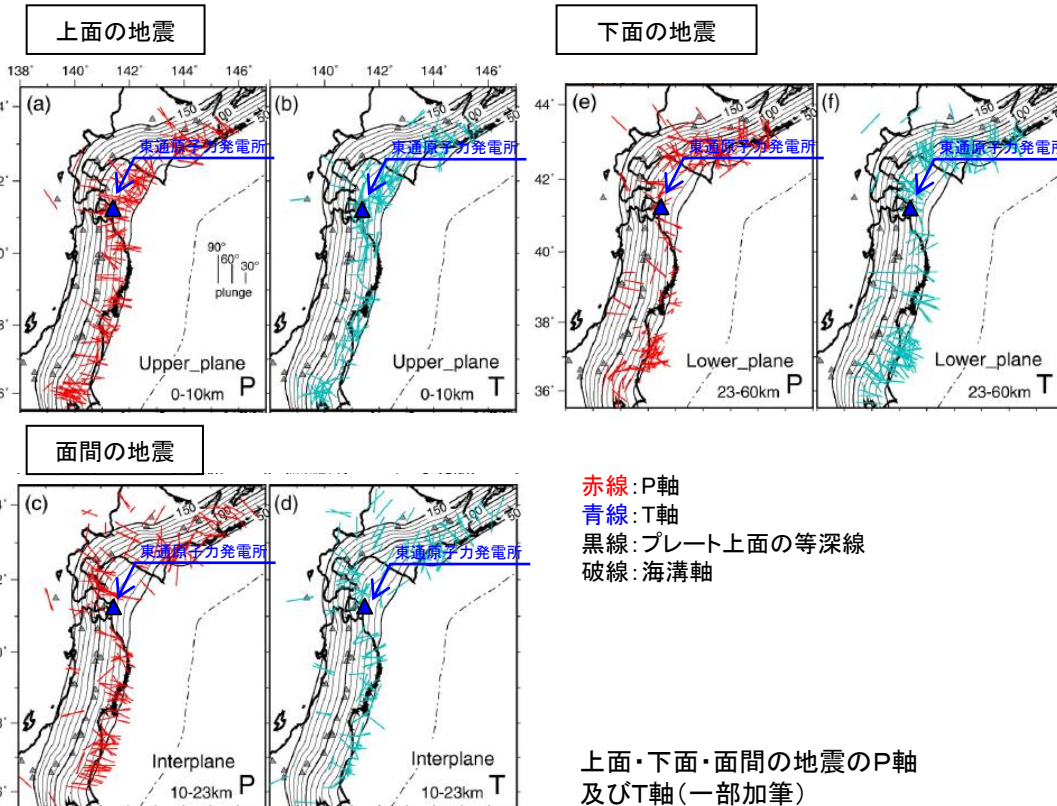
(a)上面, (b)面間, (c)下面の地震の震央分布(一部加筆)

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (2) 太平洋プレートで発生する海洋プレート内地震

Kita et al.(2010)を踏まえると、Down-dip Extension(DE)の応力場が広い北海道では、東北地方に比べて規模の大きな下面の地震が発生する可能性があると考えられる。

【Kita et al.(2010)】

- ◆ 東北地方も北海道も、上面の地震活動はP軸(DC型)が卓越、下面の地震はT軸(DE型)が卓越する傾向がある。ただし、北海道東部では、上面の地震活動は、東北地方と比べて顕著ではない。
- ◆ 面間地震は、東北地方ではP軸(DC型)が、北海道東部ではT軸(DE型)が卓越する傾向がある。
- ◆ 応力中立面は、東北地方では海洋プレート上面から深さ21km付近、北海道東部では海洋プレート上面から深さ9km付近である。

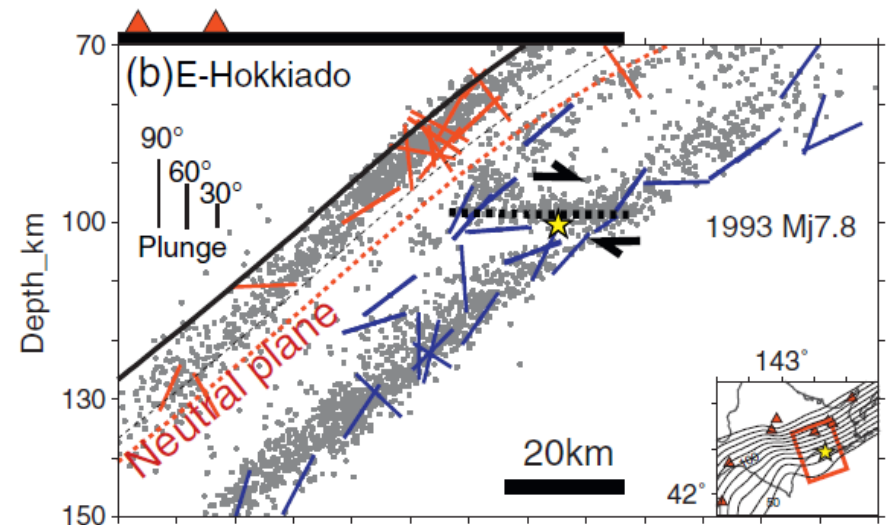
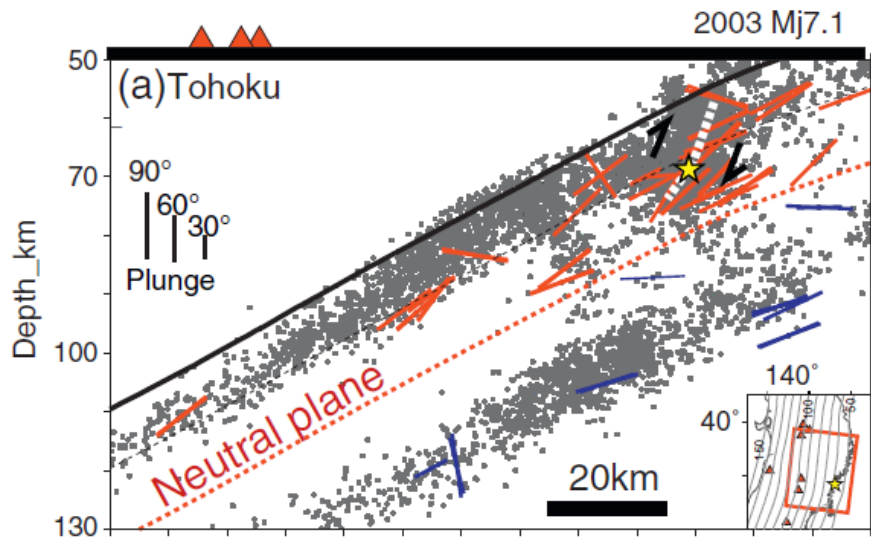


3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (2) 太平洋プレートで発生する海洋プレート内地震

Kita et al.(2010)では、DC型、DE型ともその破壊は応力中立面を超えて広がっていないことを指摘している。

【Kita et al.(2010)】

- ◆ 2003年宮城県沖の地震(M7.1)及び1993年釧路沖地震(M7.5)のどちらも、その破壊は応力中立面付近にまで達するものの、それを超えては広がっていない。



●:地震, 黒線:プレート境界面, 黒点線:モホ面, 赤点線:応力中立面, 青線:T軸, 赤線:P軸
白太点線:2003年宮城県沖の地震の断層面, 黒太点線:1993年釧路沖地震の断層面, ★:破壊開始点

規模の大きな海洋プレート内地震と応力中立面
〔DC型(2003年宮城県沖の地震)及びDE型(1993年釧路沖地震)〕

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(2) 太平洋プレートで発生する海洋プレート内地震 応力中立面が異なる原因

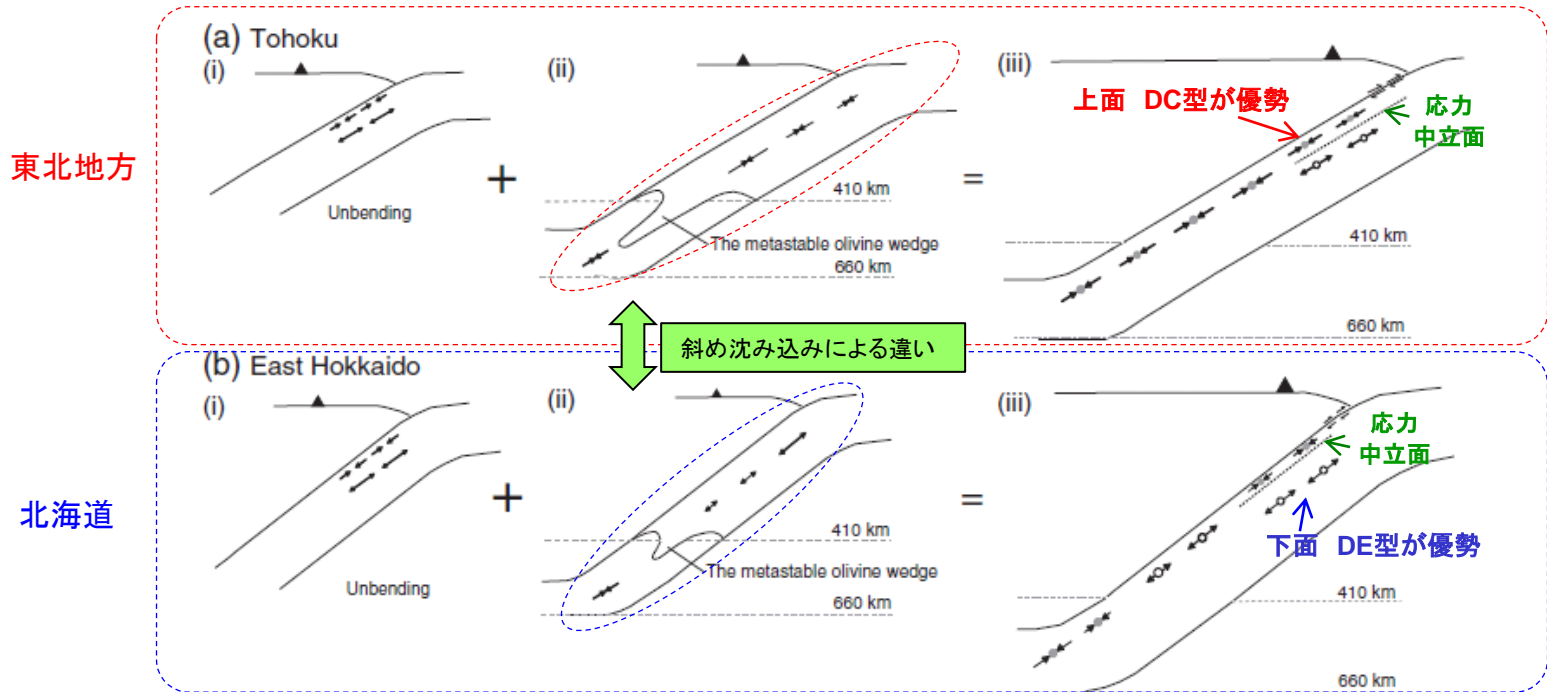
Kita et al.(2010)では、東北地方と北海道の海洋プレート内地震の発生様式の特徴が違う原因として、北海道における太平洋プレートの斜め沈み込みを指摘している。

【Kita et al.(2010)】

- ◆ Unbendingによる応力は、東北地方と北海道で違いはないが、浮力※1による応力に違いがあることから、二種類の応力の重ね合わせで、応力中立面の位置に違いが現れると推定される。
- ◆ **応力中立面の位置が異なる原因は、北海道下で太平洋プレートが斜め沈み込みをしていることによる熱パラメータ※2の値の違いにあると推定される。**

※1: 準安定オリビン相が410km不連続面を超えて深くまで及ぶと、周囲のマントルより密度が小さいため浮力が働く。

※2: 鉛直方向のプレートの沈み込み速度とプレート年齢を乗じたもので、それが大きいほど沈み込んだ海洋プレート、すなわち海洋プレートの中心部の温度が低いことに対応する。



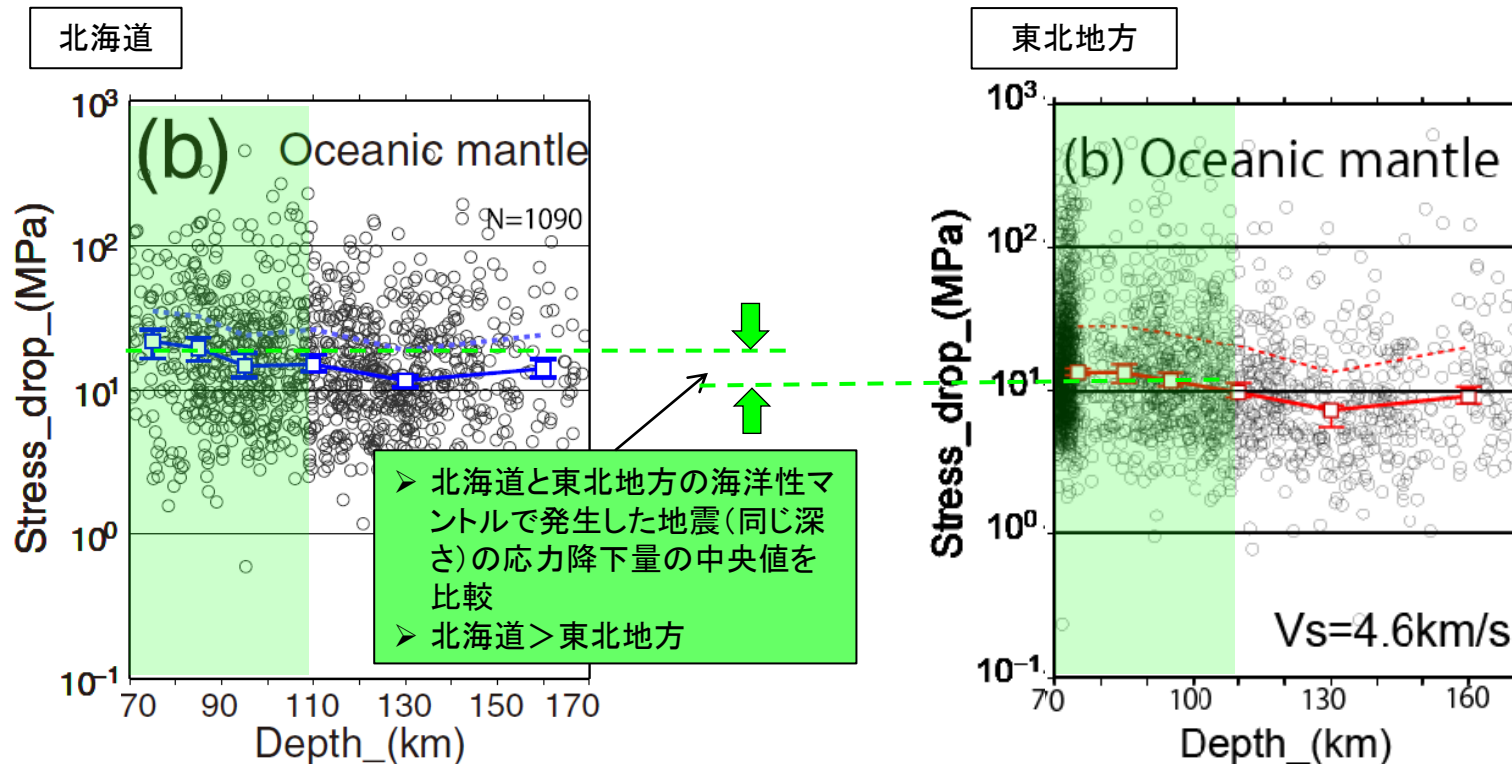
応力中立面位置の違いの原因[Kita et al.(2010)に一部加筆]

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(2) 太平洋プレートで発生する海洋プレート内地震 応力降下量の違い

北海道下で発生した1726個の海洋プレート内地震($2.0 < M < 5.0$)の応力降下量[Kita and Katsumata(2015)], 東北地方下で発生した約5000個の海洋プレート内地震($2.0 < M < 5.0$)の応力降下量[北(2016)]の比較から以下の傾向が確認される。

- ① 北海道と東北地方では、海洋プレート内地震の応力降下量の中央値に違いが見られる。
- ② 東北地方に比べて北海道の海洋プレート内地震の応力降下量は大きい傾向がある。



北海道の海洋プレート内地震の応力降下量
[Kita and Katsumata(2015)に一部加筆]

東北日本の海洋プレート内地震の応力降下量
[北(2016)に一部加筆]

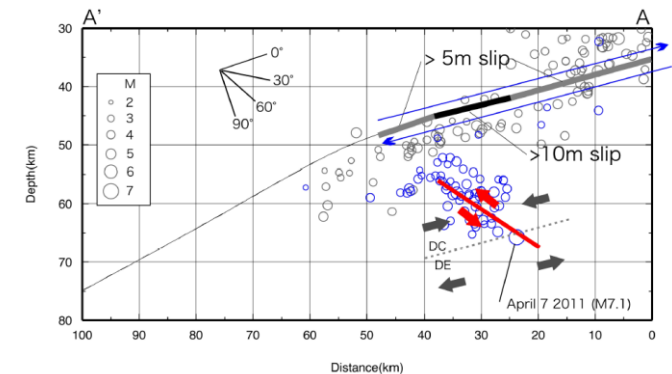
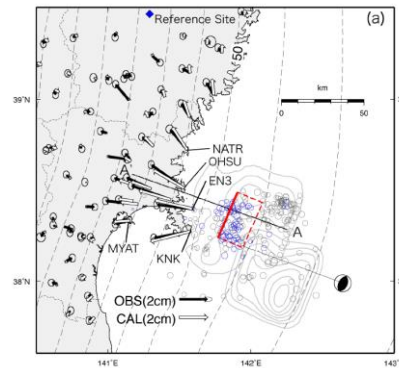
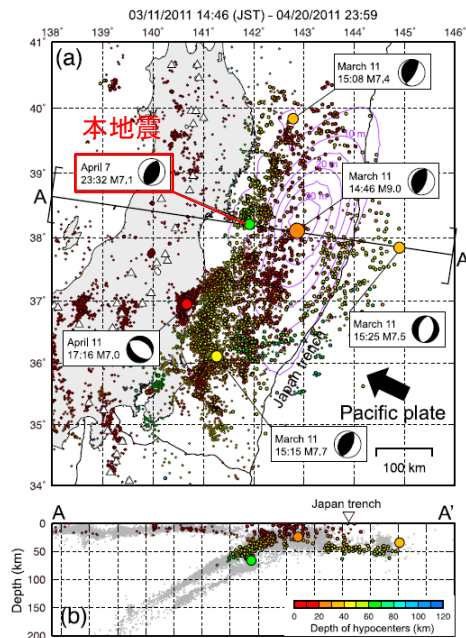
3. 3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ①2011年4月7日宮城県沖の地震

Nakajima et al.(2011)では, 4.7地震 (M7.2) のメカニズム解等について整理している。

【Nakajima et al.(2011)】

- ◆ 2011年4月7日に発生したM7.1 (註: 気象庁の確定値はM7.2) の宮城県沖地震 (左図中の緑丸) は, メカニズム解と余震分布から, 太平洋プレート内の二重深発地震の上面から面間にかけて広がる海側に傾斜した断層面を持つ海洋プレート内地震である。
- ◆ 上面の地震に特徴的な, P軸がプレートの傾斜方向に向くDown-dip compression型のメカニズム解を持つ。
- ◆ プレート境界に沿う本震(2011年東北地方太平洋沖地震)の大きなすべりに伴ってせん断応力が増加したために, 誘発されて発生したと推定される。



4.7地震の断層面 [Ohta et al.(2011)]

灰色の破線は, Kita et al.(2010)による応力中立面を示す。4.7地震の断層面は, 海洋プレート内の応力中立面を大きく超えて拡大したものではない。 [Ohta et al.(2011)]

2011年東北地方太平洋沖地震の本震・余震・誘発地震の震源分布

[Nakajima et al.(2011)に一部加筆]

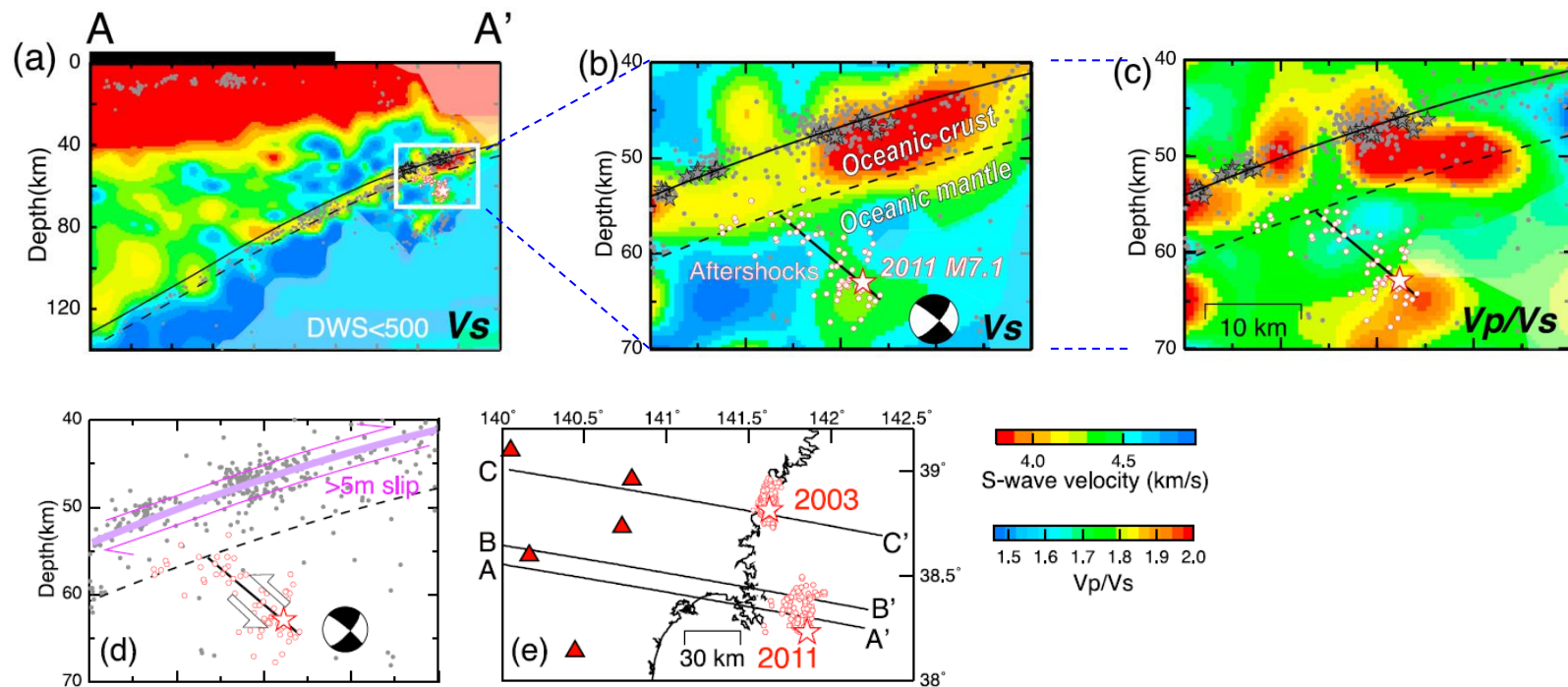
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ①2011年4月7日宮城県沖の地震

Nakajima et al.(2011)では、4.7地震(M7.2)は低速度の領域で発生していることを示している。

【Nakajima et al.(2011)】

- ◆ M7.1 (注: 気象庁の確定値はM7.2)の地震の震源域における詳細な速度構造を推定したところ、海洋性マントルが低速度になっている領域で余震が発生している。M7.1の地震は海洋性マントル最上部の低速度域内で発生したことを示している。
- ◆ 余震の並びとプレート境界とのなす角は約60度であり、アウターライズで生成された含水化した正断層が再活動し、M7.1の地震を発生させたことが示唆される。

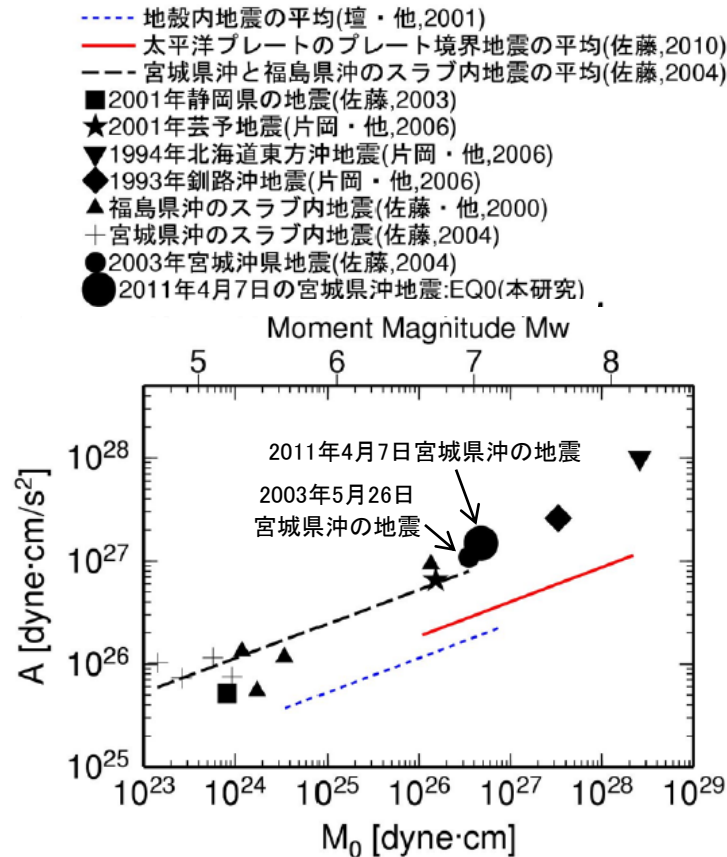


4.7地震の震源域周辺のS波速度構造等の鉛直分布図[Nakajima et al.(2011)に一部加筆]
白丸は再決定した余震。黒の太線はメカニズム解から推定した断層面。黒実線はプレート境界。破線は海洋プレートモホ面。

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ①2011年4月7日宮城県沖の地震

- 4.7地震の短周期レベルAは、同じ太平洋プレートの二重深発地震上面(DC型)で発生した2003年5月26日宮城県沖の地震(5.26地震)と比較して大きい※。



海洋プレート内地震の地震モーメントと短周期レベルの関係〔佐藤(2012)に一部加筆〕

※: 4.7地震の短周期レベルAは、5.26地震(M7.1)の短周期レベルAの約1.4倍。

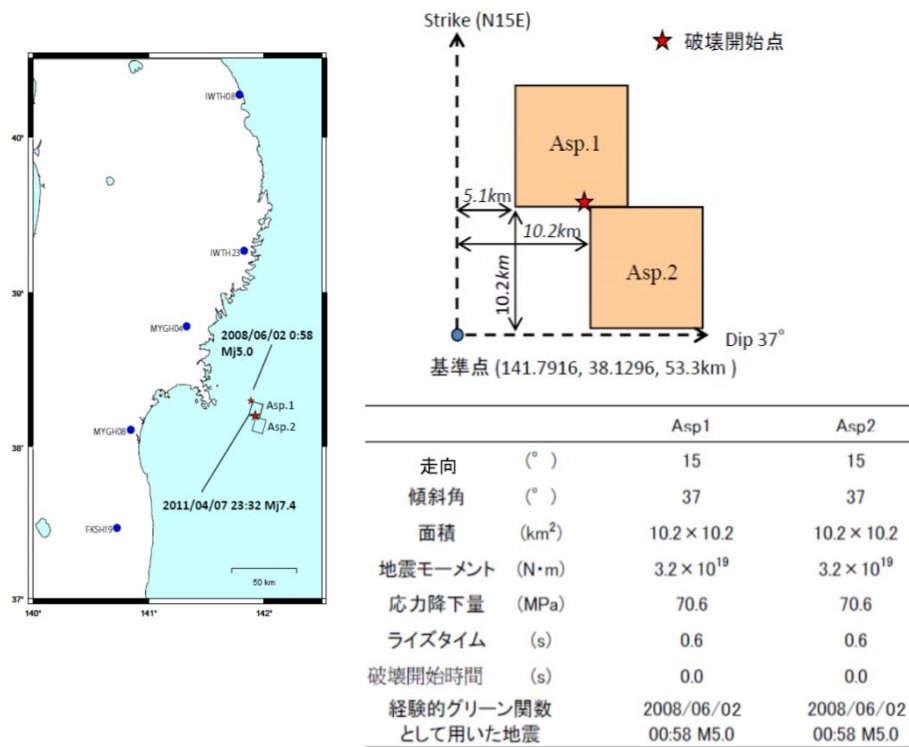
なお、規模の差を差し引いて求めた短周期レベルA(短周期レベルAが $M_0^{1/3}$ に比例すると仮定して算定)の差は約1.2倍となる。

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ①2011年4月7日宮城県沖の地震

- 原田・釜江(2011)による4.7地震の短周期レベルは, 地震調査研究推進本部(2020)による海洋プレート内地震の地震モーメント(M_0)－短周期レベル(A)の関係と比較して約1.5倍大きい。

【原田・釜江(2011)】



原田・釜江(2011)による4.7地震の震源モデル

4.7地震の短周期レベル(A)

モデル	断層パラメータ	地震モーメント M_0 (N·m)※	短周期レベル A (N·m/s ²)
4.7地震 シミュレーションモデル [原田・釜江(2011)]		4.74×10^{19}	1.16×10^{20}
(参考) 標準レシピ: 地震調査研究推進本部 (2020)(強震動予測レシ ピ)の短周期レベルA		4.74×10^{19}	7.67×10^{19}

約1.5倍

※: F-netによる。

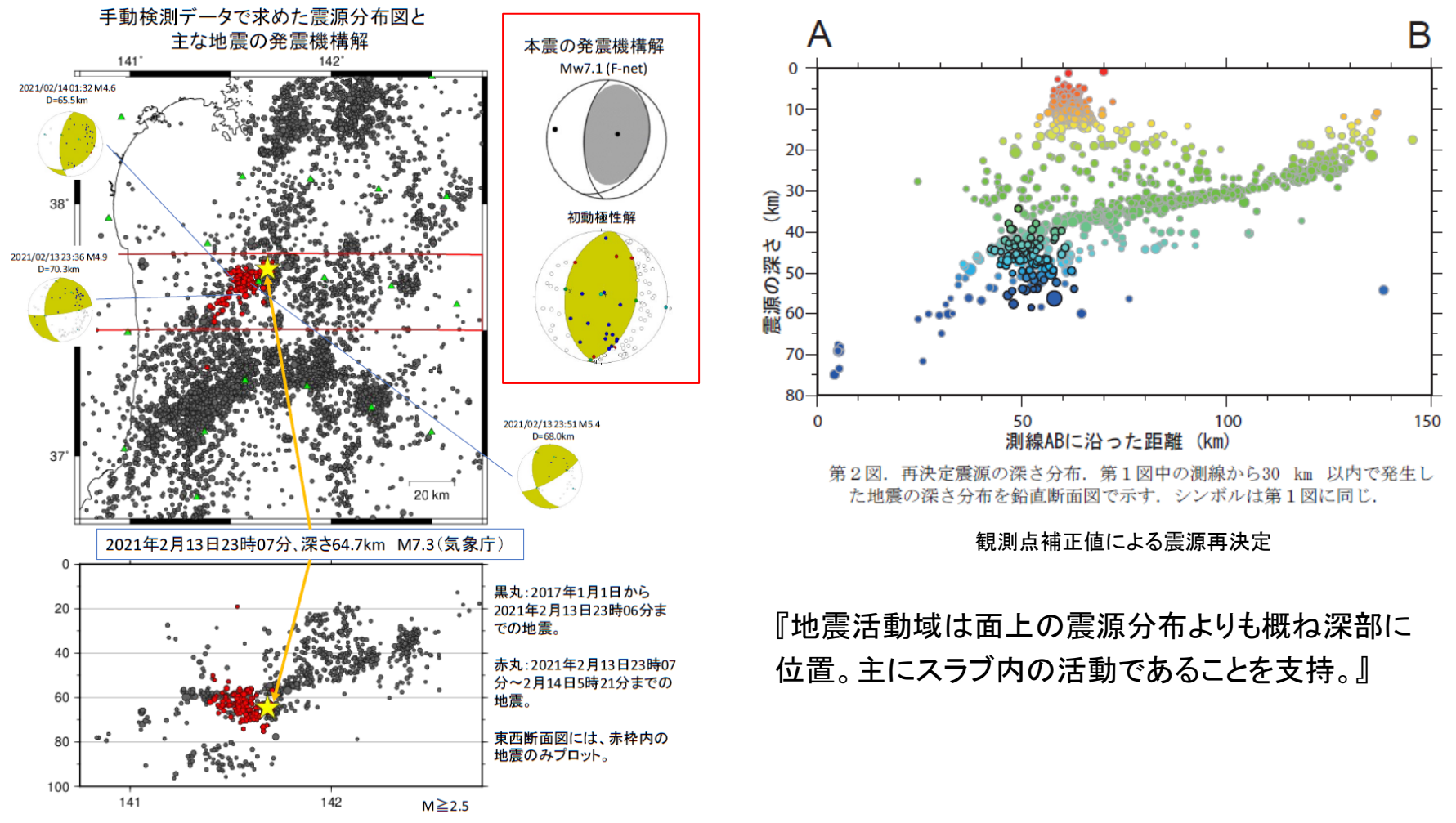
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ②2021年福島県沖の地震

➤ 防災科学技術研究所の報告を踏まえると, 2021年福島県沖の地震(2.13地震)はDown-dip Compression (DC) 型のメカニズム解を持つ海洋プレート内地震である。

【防災科学技術研究所(2021)】HPより引用(発震機構解の赤枠を加筆)

<<https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushima210213/>>



3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

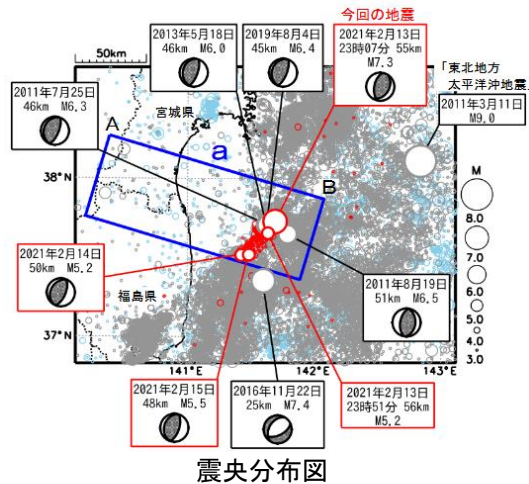
(3) 二重深発地震上面の地震 ②2021年福島県沖の地震

- 地震調査研究推進本部では、2.13地震はDC型の海洋プレート内地震としている。
- また、震源分布から、東傾斜の断層面がうかがえる。

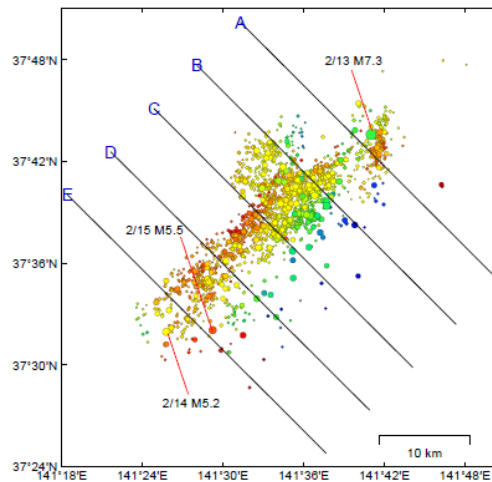
【地震調査研究推進本部(2021)】HPより引用(下線を加筆)

〈https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2021/20210213_fukushima_2.pdf〉

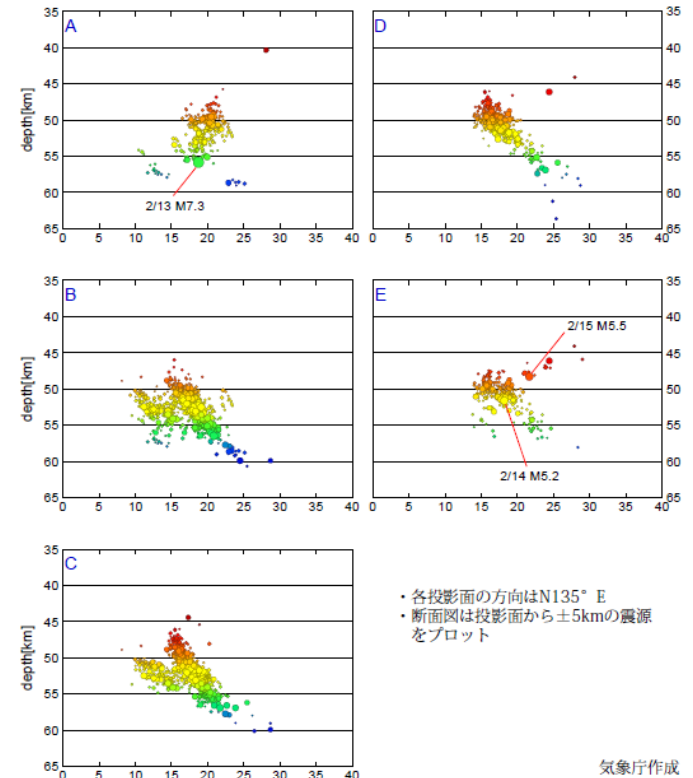
『2月13日23時07分に福島県沖の深さ約55kmでマグニチュード(M)7.3の地震が発生した。今回の地震により宮城県及び福島県で最大震度6強を観測し、被害を伴った。この地震の発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレート内部で発生した地震である。』



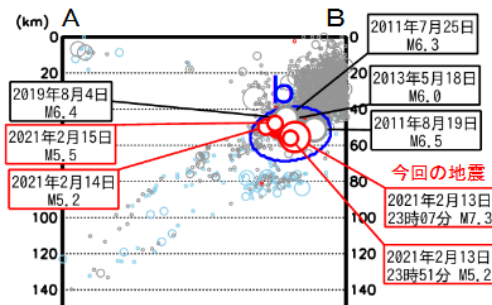
震央分布図



震央分布



断层面図



領域aの震源深さ分布

DD法による再計算震源分布

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

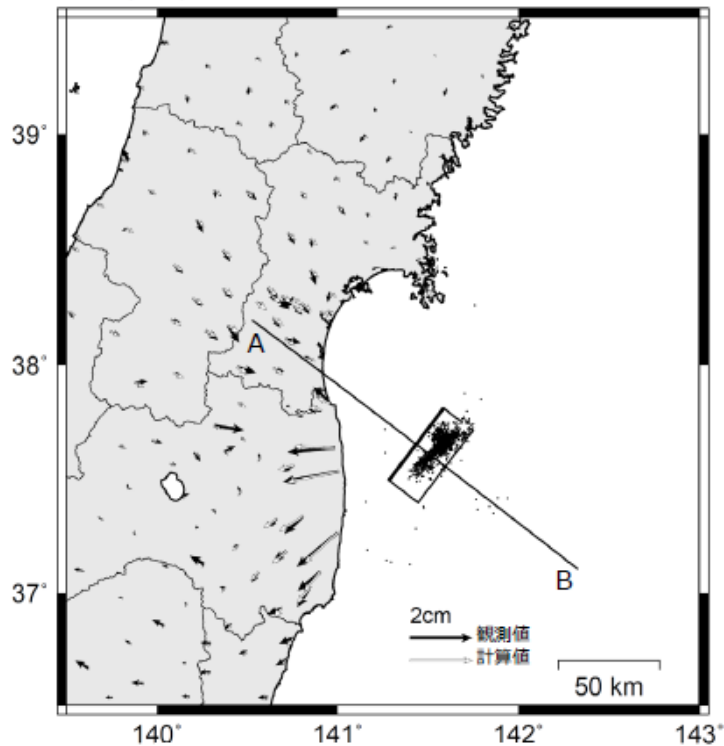
(3) 二重深発地震上面の地震 ②2021年福島県沖の地震

➤ 地震調査研究推進本部では、地殻変動データに基づき南東傾斜の断層モデルを推定している(暫定)。

【地震調査研究推進本部(2021)】HPより引用(断面図に海岸線の位置を加筆)

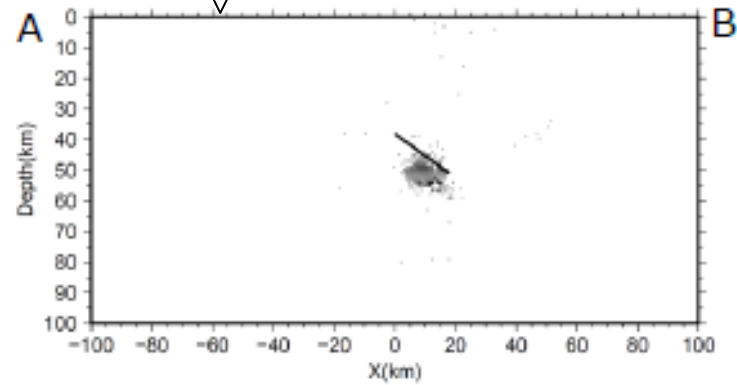
〈https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2021/20210213_fukushima_2.pdf〉

基準期間:2021/02/06~2021/02/12 [R3:速報解]
比較期間:2021/02/14~2021/02/17 [R3:速報解]
震定期:大瀬(950241)



南東傾斜の断層モデル

海岸線の位置(左図から読取り)



断面図

主な震源パラメータ

上端深さ (km)	断層長さ (km)	断層幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	地震規模 (Mw)
38.1	44.1	22.0	37.0	35.7	7.08

- 断層長さに対する断層幅の比を1/2に固定。
- M_w と断層面積の関係がスケーリング則(強震動予測レシビ)に近づくよう拘束。
- 剛性率を75GPaと仮定。

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

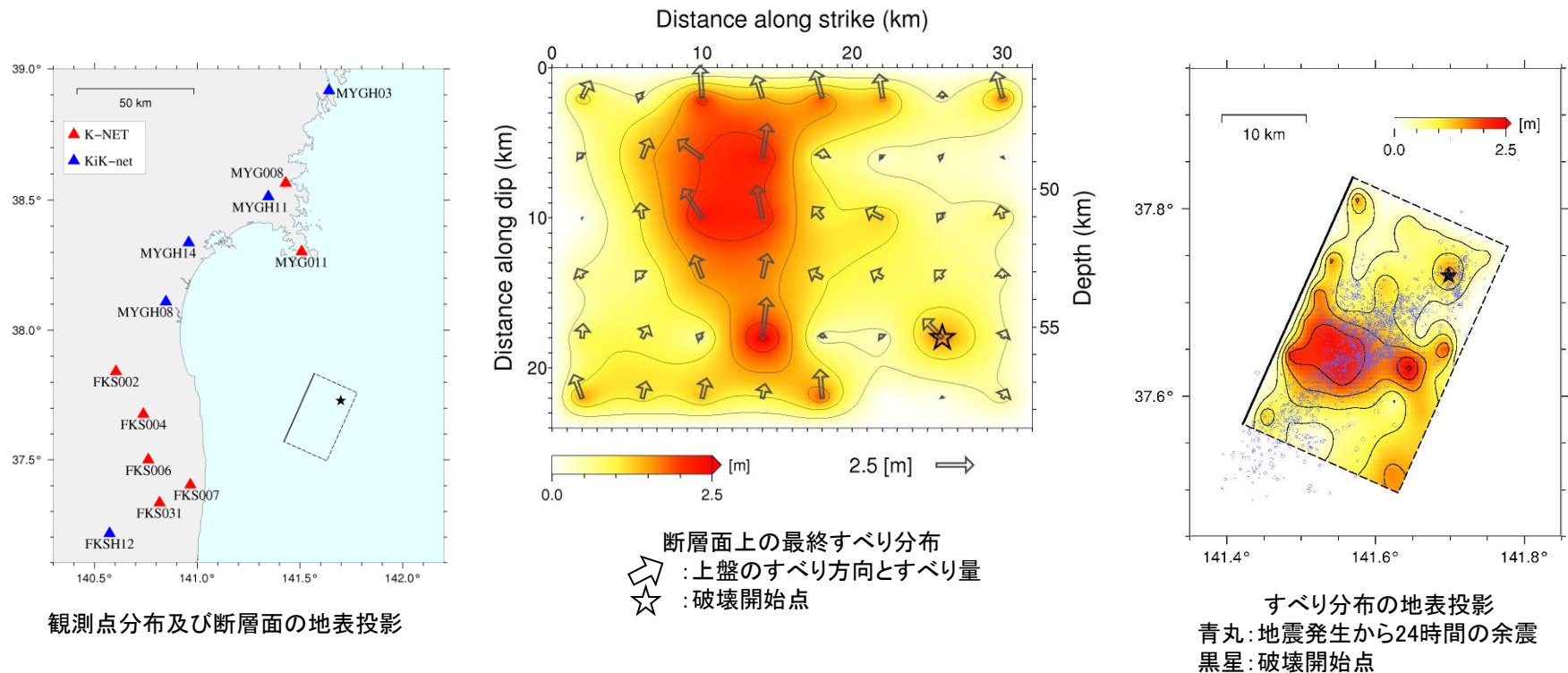
(3) 二重深発地震上面の地震 ②2021年福島県沖の地震

➤ 防災科学技術研究所では、近地強震記録を用いた震源インバージョン解析を実施している。

【防災科学技術研究所(2021)】HPより引用

〈https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/FukushimakenOki_20210213/inversion/inv_index.html〉

近地強震記録を用いた震源インバージョン解析結果



主な震源パラメータ

破壊開始点			断層長さ (km)	断層幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	M ₀ (Nm)
東経(°)	北緯(°)	深さ(km)					
141.698	37.729	55.4	32	24	24	33	4.7 × 10 ¹⁹

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

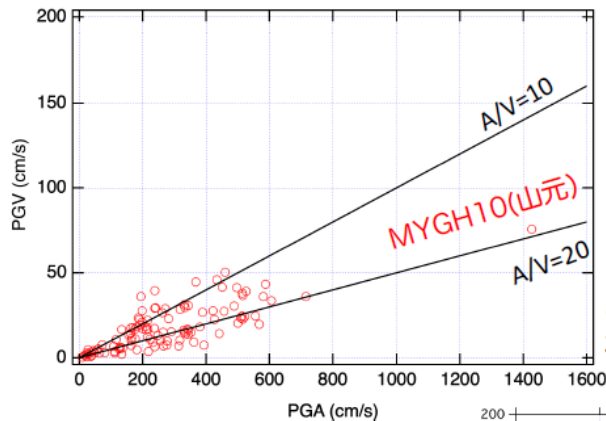
(3) 二重深発地震上面の地震 ②2021年福島県沖の地震

- 大野(2021)は、2.13地震の最大加速度／最大速度比(A/V比)は、概ね10～20の範囲に分布し、短周期が卓越していることを指摘している。
- また、同様のメカニズムを持つ二重深発地震上面の地震である4.7地震についても併せてA/V比を示しており、2.13地震に比べ4.7地震の方がA/V比は大きいことを示している。

【大野(2021)】

東北大学災害科学国際研究所HPより引用

<https://irides.tohoku.ac.jp/research/prompt_investigation/2021fukushima-eq.html>



PGV-PGA関係

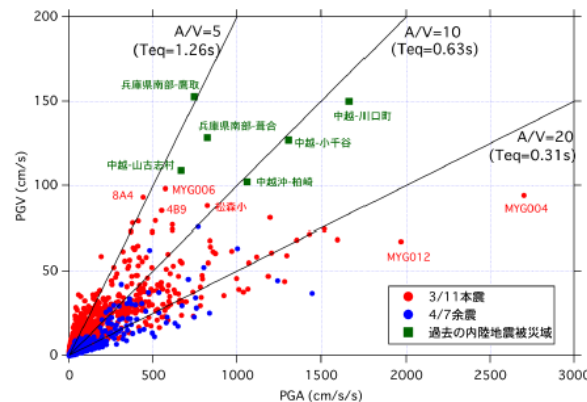
A/V比が大きい
=短周期卓越

2021年2月13日
福島県沖の地震

2.13地震の特徴

『最大加速度/最大速度比が大きく、短周期卓越型の記録が多い。』

過去の被害地震



図中の最大加速度(PGA)及び最大速度(PGV)は水平2方向の最大値

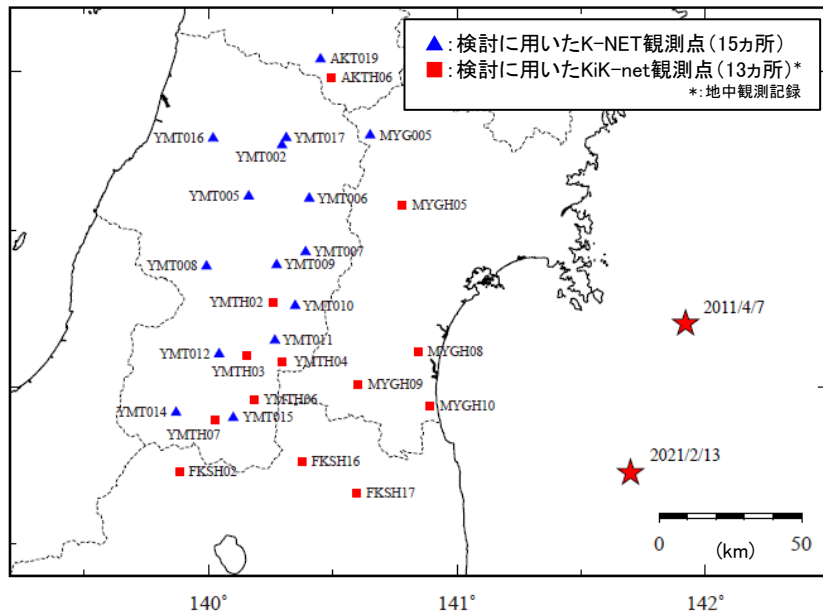
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ②2021年福島県沖の地震

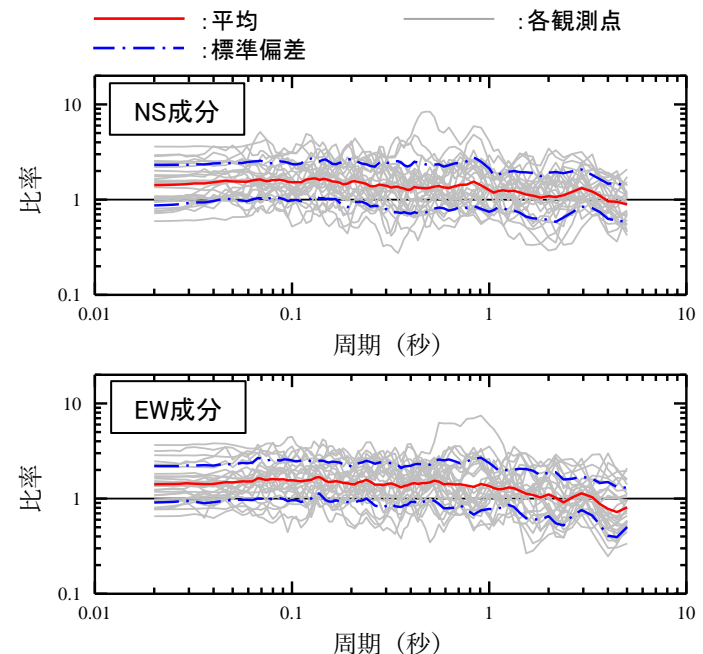
- 前頁の大野(2021)で示された傾向(4.7地震は2.13地震に比べて短周期が卓越)を応答スペクトルの特性で確認した。検討は、両地震の記録が得られているK-NET及びKiK-net観測点のそれぞれの地震におけるNoda et al.(2002)に対する残差を算定し、残差の比を全観測点について平均することにより求めた。

$$2.13地震に対する4.7地震のNoda et al.(2002)の残差の比 = \frac{4.7地震の観測記録の応答スペクトル / 4.7地震のNoda et al.(2002)の応答スペクトル}{2.13地震の観測記録の応答スペクトル / 2.13地震のNoda et al.(2002)の応答スペクトル}$$

- 地震動の大きさは、震源特性(マグニチュード、短周期レベル等)、伝播特性、サイト特性の影響を受けるが、マグニチュードの大きさの違い及び伝播経路の距離の違いはNoda et al.(2002)で補正した上で比較する。また、伝播経路の違いの影響を出来るだけ排除するために、観測点は震央距離200km以内で両地震に対し同程度の距離の地点を選定した。また、そのため、各観測点の地震動の揺れの大きさも両地震では概ね同程度になることから、残差の比におけるサイトの非線形性の影響も小さいものになっている。
- 検討結果は、短周期～中周期では4.7地震が大きく、長周期は2.13地震が大きい傾向となっており、各地の応答スペクトルからも大野(2021)と同様に4.7地震の短周期が2.13地震に比べて卓越する傾向を確認した。この傾向は、主に震源の特性(短周期レベル)が反映されたものと考えられる。



検討に用いた観測点の配置図



Noda et al.(2002)の残差の比(4.7地震/2.13地震)

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

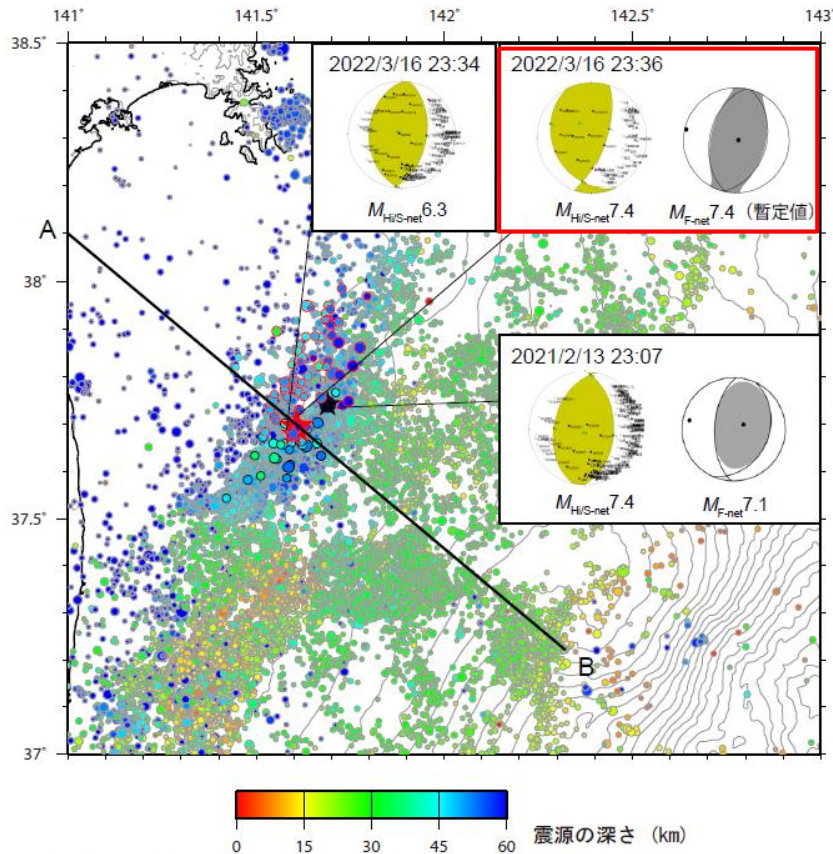
(3) 二重深発地震上面の地震 ③2022年福島県沖の地震

3.16地震反映

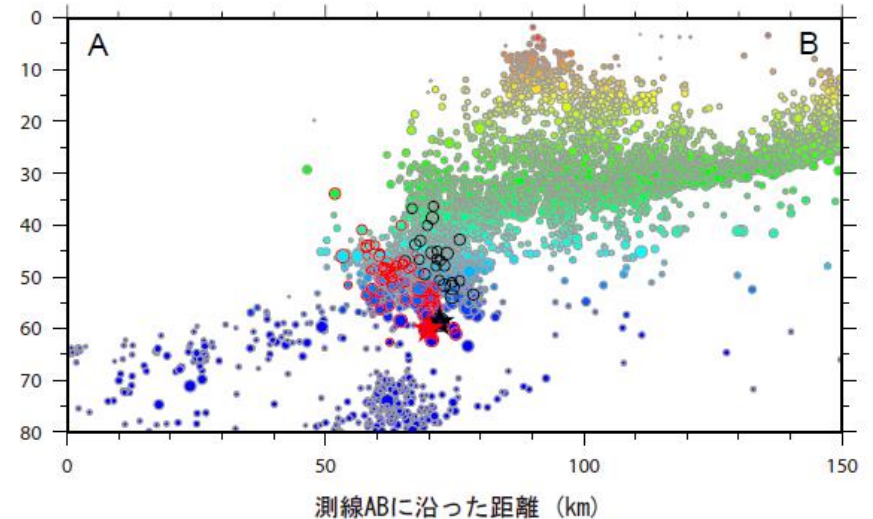
- 防災科学技術研究所の報告を踏まえると、2022年福島県沖の地震(3.16地震)はDown-dip Compression(DC)型のメカニズム解を持つ海洋プレート内地震である。

【防災科学技術研究所(2022)】HPより引用(発震機構解の赤枠を加筆)

〈<https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushima220316/?LANG=ja&m=summary>〉



第1図. 観測点補正值による再決定震源の分布。2022年3月16日から17日7時までの地震を赤色アウトラインのシンボルで示す。また、2017年1月1日から2022年3月10日までの地震を灰色アウトラインのシンボルで、特にそのうち2021年2月13日から14日までの地震を黒色アウトラインのシンボルでそれぞれ示す。シンボル内の色は地震の深さを表す。防災科研によるルーチン処理震源カタログ(S-net記録使用、手動検測)の検測値に観測点補正值[浅野(2021)]を加えて再決定した。主要な地震を星印で示し、Hi-net/S-netによる初動解とF-net MT解を併せて示す。測線ABは第2図における鉛直断面の水平位置を表す。



第2図. 再決定震源の深さ分布。第1図中の測線から30 km以内で発生した地震の深さ分布を鉛直断面図で示す。シンボルは第1図に同じ。

観測点補正值による震源再決定

『一連の活動は主に沈み込むプレート内の活動と考えられる』

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ③2022年福島県沖の地震

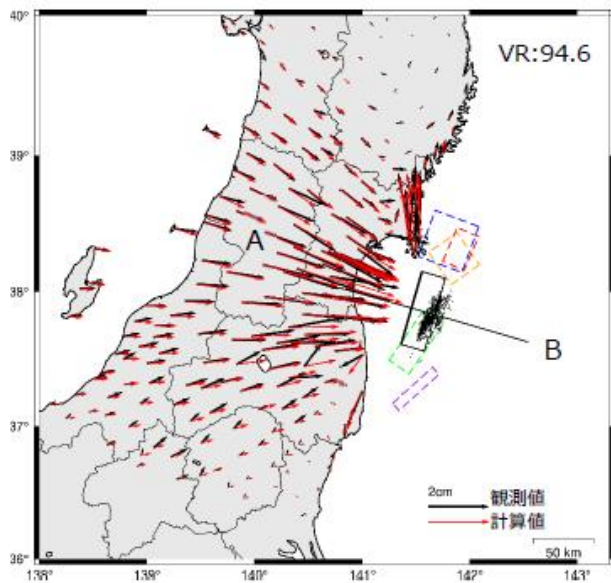
3.16地震反映

➤ 地震調査研究推進本部では、地殻変動データに基づき南東傾斜の断層モデルを推定している(暫定)。

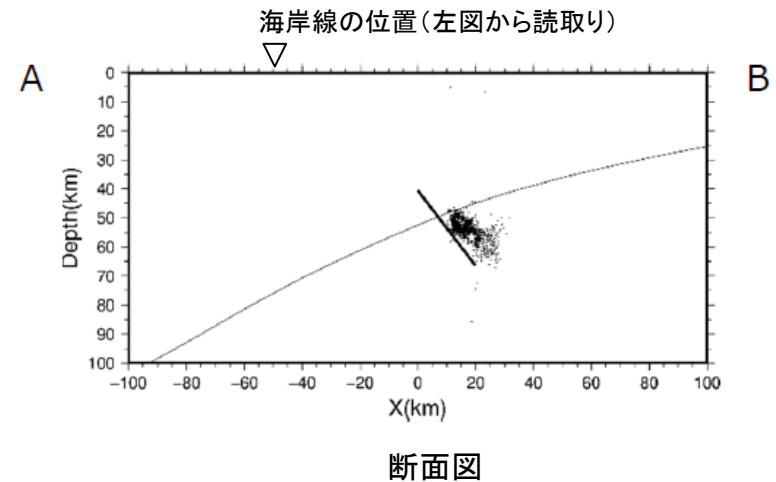
【地震調査研究推進本部(2022)】HPより引用(断面図に海岸線の位置を加筆)

〈https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/20220316_fukushima_2.pdf〉

基準期間:2022/03/08 09:00:00~2022/03/15 08:59:59[R5:速報解]JST
比較期間:2022/03/17 09:00:00~2022/03/24 08:59:59[R5:速報解]JST
固定局:岩崎(950154)



南東傾斜の断層モデル



主な震源パラメータ

上端深さ (km)	断層長さ (km)	断層幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	地震規模 (Mw)
40.6	62.2	32.6	15.9	52.4	7.38

- スラブ内地震のスケールング則[Strasser et al. (2010)]の断層面積とモーメントマグニチュードの関係式および断層幅とモーメントマグニチュードの関係式を使用。
- 剛性率を75GPaと仮定。

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ③2022年福島県沖の地震

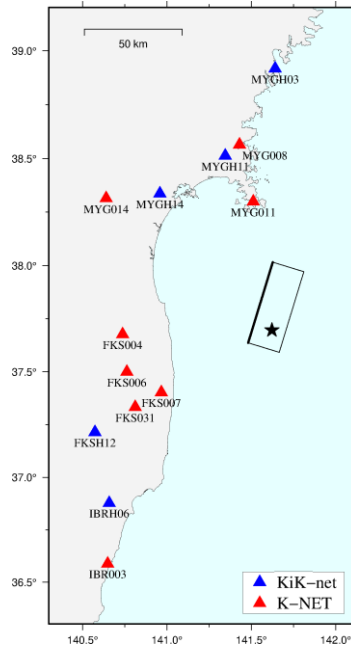
3.16地震反映

➤ 防災科学技術研究所では、近地強震記録を用いた震源インバージョン解析を実施している。

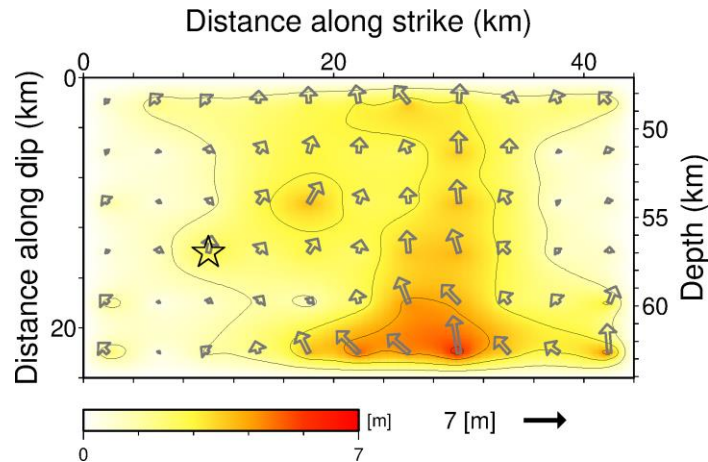
【防災科学技術研究所(2023)】HPより引用

〈https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/fukushima_20220316/inversion/inv_index.html〉

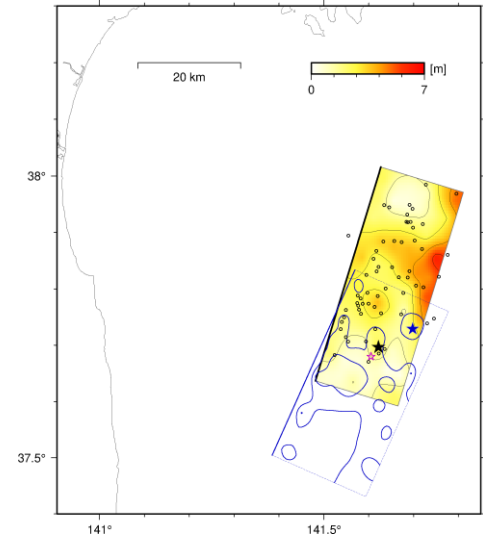
近地強震記録を用いた震源インバージョン解析結果



観測点分布及び断層面の地表投影



断層面上の最終すべり分布
 : 上盤のすべり方向とすべり量
 : 破壊開始点



すべり分布の地表投影

黒星: 3.16地震の破壊開始点
 青星: 2.13地震の破壊開始点
 青線: 2.13地震のすべり分布(コンター間隔1m)
 紫星: 2022年3月16日23時34分頃の地震(M6.1)
 黒丸: 3.16地震発生から2022年3月17日7時までの地震活動

主な震源パラメータ

破壊開始点			断層長さ (km)	断層幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	M ₀ (Nm)
東経(°)	北緯(°)	深さ(km)					
141.6217	37.6967	57	44	24	17	45	1.3×10^{20}

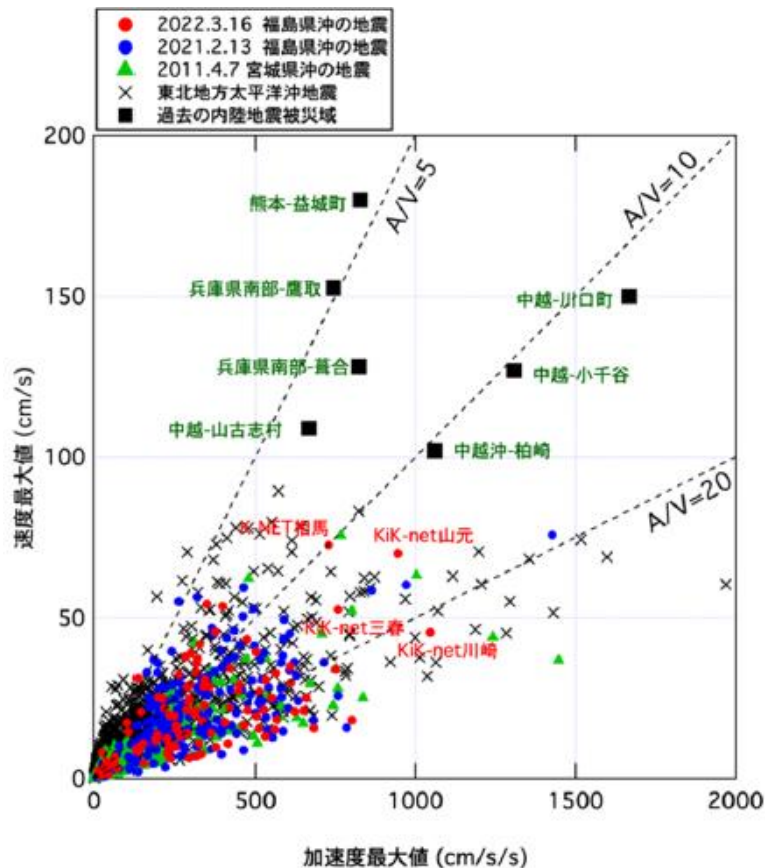
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ③2022年福島県沖の地震

3.16地震反映

- 日本建築学会東北支部災害調査連絡会(2022)は、3.16地震の最大加速度／最大速度比(A/V比)は、概ね10以上の範囲に分布し、短周期が卓越していることを指摘している。
- また、同様のメカニズムを持つ二重深発地震上面の地震である2.13地震及び4.7地震についても併せてA/V比を示しており、3.16地震は他地震と同程度であることを示している。

【日本建築学会東北支部災害調査連絡会(2022)】令和4(2022)年3月16日の福島県沖の地震災害調査速報より引用



『今回の地震はA/V比が大きく、2011年4月7日や2021年2月13日の地震と同様に短周期卓越型の地震動であったことがわかる。』

図中の最大加速度(PGA)及び最大速度(PGV)は水平2方向の最大値

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ③2022年福島県沖の地震

3.16地震反映

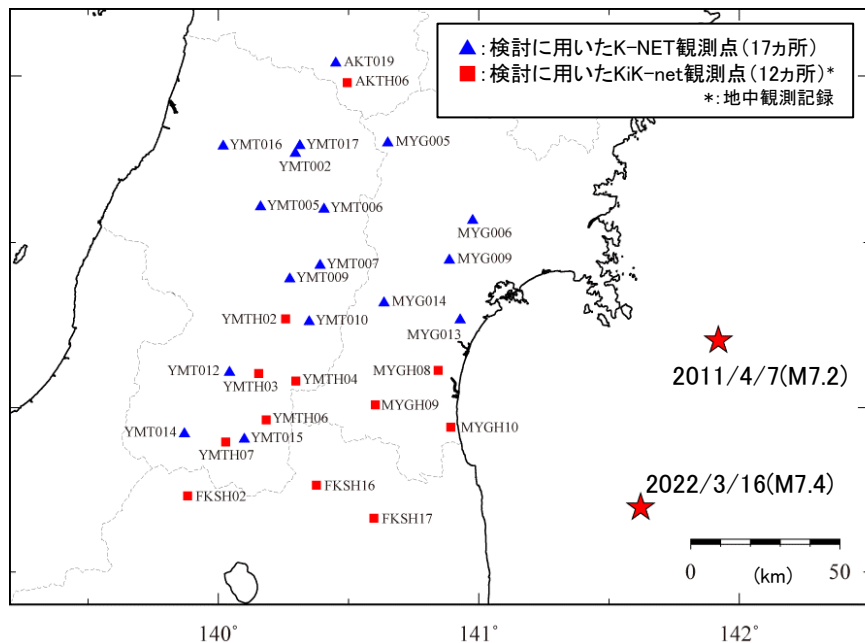
- 地震動の大きさ(短周期レベル)について応答スペクトルの特性で概略的な確認をした。検討は、両地震の記録が得られているK-NET及びKiK-net観測点の観測記録を用いて、それぞれの地震におけるNoda et al.(2002)に対する残差を算定し、残差の比を全観測点について平均することにより求めた。

$$\frac{4.7地震の観測記録の応答スペクトル}{4.7地震のNoda et al.(2002)の応答スペクトル}$$

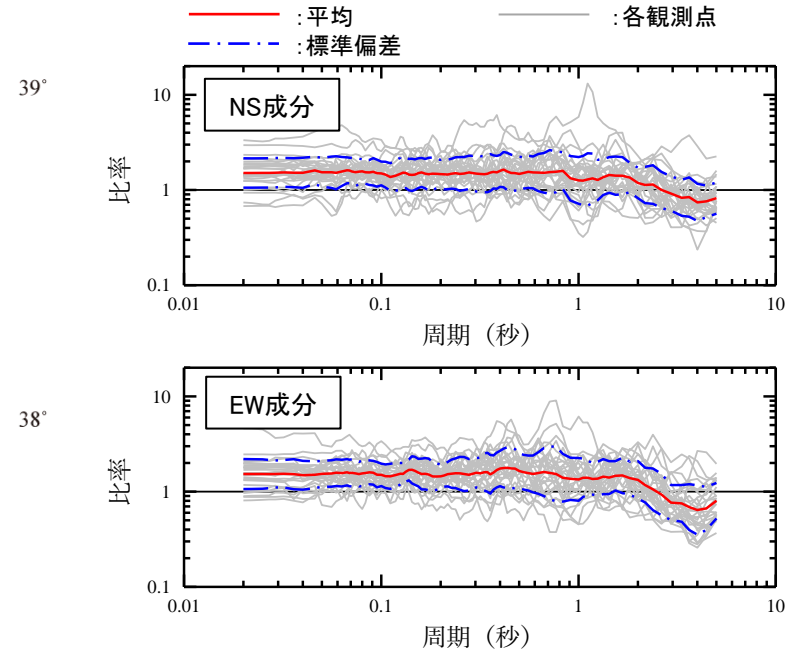
$$3.16地震に対する4.7地震のNoda et al.(2002)の残差の比 =$$

$$\frac{3.16地震の観測記録の応答スペクトル}{3.16地震のNoda et al.(2002)の応答スペクトル}$$

- 地震動の大きさは、震源特性(マグニチュード、短周期レベル等)、伝播特性、サイト特性の影響を受けるが、マグニチュードの大きさの違い及び伝播経路の距離の違いはNoda et al.(2002)で補正した上で比較する。また、経路の違いの影響を出来るだけ排除するために、観測点は震央距離200km以内で両地震に対して同程度の距離の地点を選定した。
- 検討結果は、短周期～中周期では4.7地震が大きく、長周期は3.16地震が大きい傾向となっており、この傾向は、主に震源の特性(短周期レベル)が反映されたものと考えられる。



検討に用いた観測点の配置図



Noda et al.(2002)の残差の比(4.7地震/3.16地震)

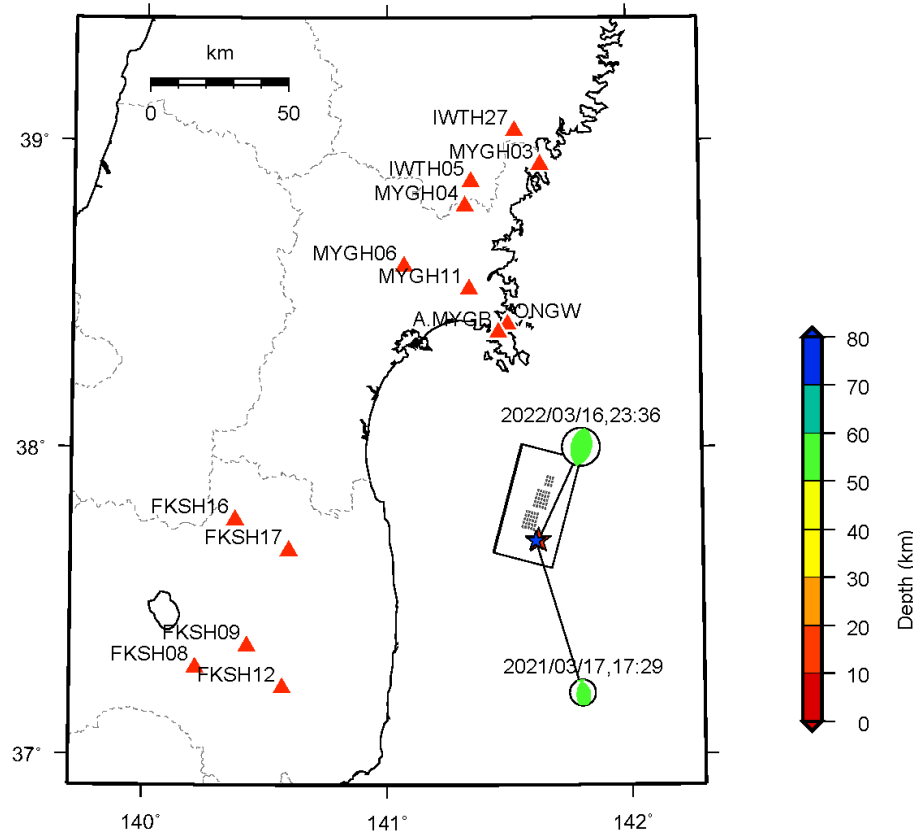
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ④2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション

3.16地震反映

- 3.16地震について、経験的グリーン関数法を用いて強震動生成域(SMGA)を推定し、強震動シミュレーションを行った。また、推定された震源モデルから算定される短周期レベルについて既往経験式との比較検討を行った。*
- 強震動シミュレーションの対象とする観測点は、女川原子力発電所のほか震源距離が160km以内かつ V_s30 が400m/s以上のKiK-net観測点等とした。
- 経験的グリーン関数として使用する小地震は、幾つかの候補の中から特に女川原子力発電所の観測記録(補足説明資料3章参照)との整合性を踏まえ、2021年3月17日17時29分頃に発生した地震(Mw5.0)を選定し、震源パラメータについては吉田ほか(2022)を用いた。

※:本検討については、日本地震工学会・大会(2022)において「2022年3月16日福島県沖の地震の強震動生成域の推定[新井ほか(2022)]」として発表している。

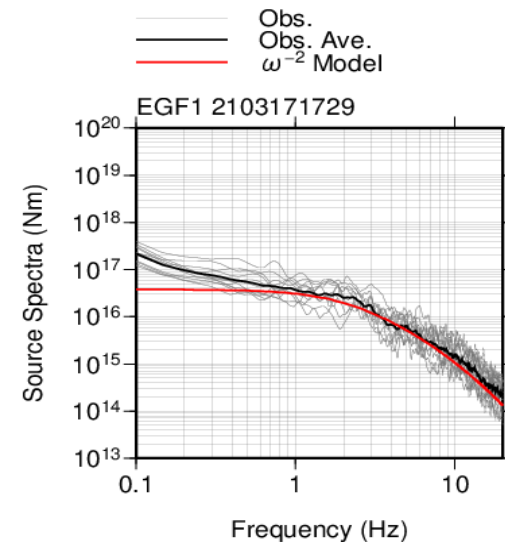


本震及び小地震の震央位置と検討対象観測点分布, SMGAモデル

★:本震震央, ★:小地震震央, ■:SMGA

小地震のパラメータ

パラメータ	単位	設定値	設定根拠
緯度	[°]	37.695	気象庁
経度	[°]	141.613	気象庁
震源深さ	[km]	57.3	気象庁
地震モーメント	[Nm]	3.76E+16	F-net
応力降下量	[MPa]	34.8	吉田・他(2022)
断層面積	[km ²]	1.9	吉田・他(2022)



小地震の観測記録より推定した震源スペクトルと理論スペクトルの比較

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

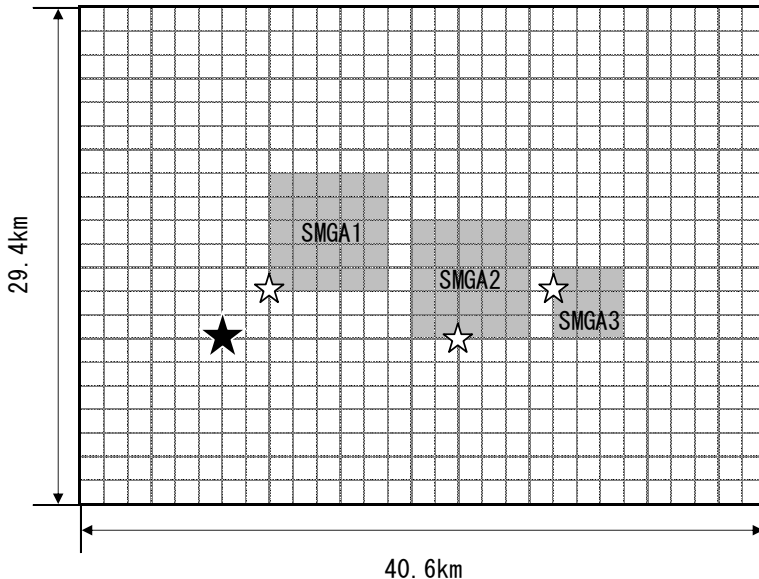
(3) 二重深発地震上面の地震 ④2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション

3.16地震反映

- SMGAモデルの推定に用いる経験的グリーン関数法による波形合成は、入倉ほか(1997)を用いて実施した。
- 気象庁の震源位置からの同心円状の破壊を仮定し、主に擬似速度応答スペクトルの再現性を確認しながら、SMGAの個数、面積、位置、応力降下量、ライズタイム、破壊開始点、破壊伝播速度を試行錯誤で決定した。
- さらに、速度波形や応答スペクトルの周期特性の再現性を確認しながら、破壊伝播速度に不均質性を導入した。具体的には、各要素断層の破壊位置をランダムに複数ケース設定したうえで地震動評価を実施し、観測記録との比較を行い、観測記録の再現性が高いケースを選定した。また、S波の到達時刻を合わせるため、各SMGAに5.0秒の破壊時刻遅れを考慮した。

SMGAモデルのパラメータ

断層パラメータ	記号	単位	合計	SMGA1	SMGA2	SMGA3	設定方法
走向	θ	[°]	15	-			津田・他(2022)
傾斜角	δ	[°]	42	-			津田・他(2022)
長さ	L	[km]	-	7.0	7.0	4.2	設定
幅	W	[km]	-	7.0	7.0	4.2	設定
面積	S	[km ²]	115.6	49.0	49.0	17.6	$S=L \times W$
剛性率	μ	[N/m ²]	6.76E+10	-			$\mu = \rho \beta^2$
密度	ρ	[g/cm ³]	3.40	-			設定
S波速度	β	[km/s]	4.46	-			設定
破壊伝播速度	V_r	[km/s]	3.20	-			設定
応力降下量	$\Delta\sigma$	[MPa]	-	92.22	92.22	92.22	設定
地震モーメント	M_0	[Nm]	2.88E+19	1.30E+19	1.30E+19	2.80E+18	円形クラック
短周期レベル	A	[Nm/s ²]	1.40E+20	9.10E+19	9.10E+19	5.46E+19	$A = 4\pi r \beta^2 \Delta\sigma$
短周期レベル(経験式)	A_{sasa}	[Nm/s ²]	1.04E+20	-			笹谷・他(2006)
短周期レベル比	-	-	1.34	-			A/A_{sasa}
平均すべり量	D	[m]	-	3.92	3.92	2.35	$D = M_0 / (\mu S)$
ライズタイム	τ	[s]	-	0.27	0.27	0.16	設定



SMGAモデル

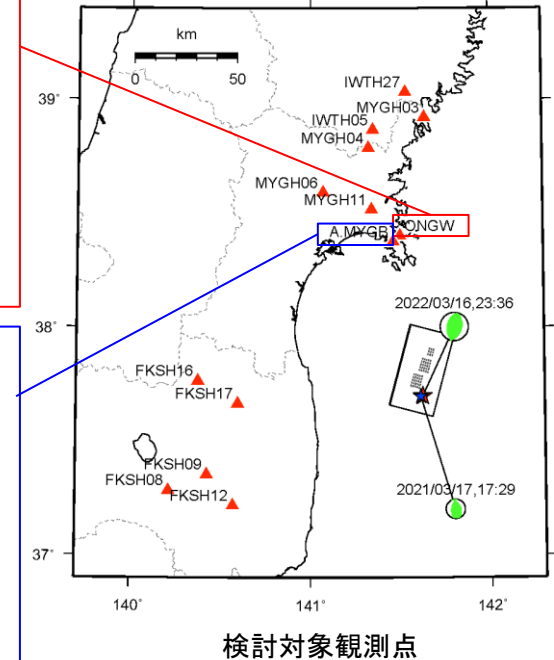
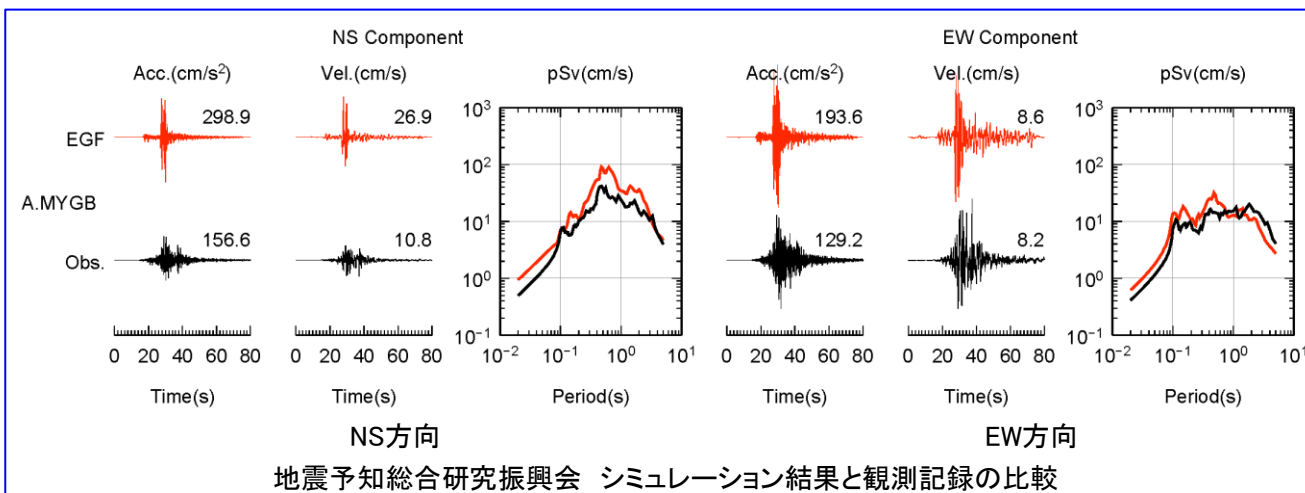
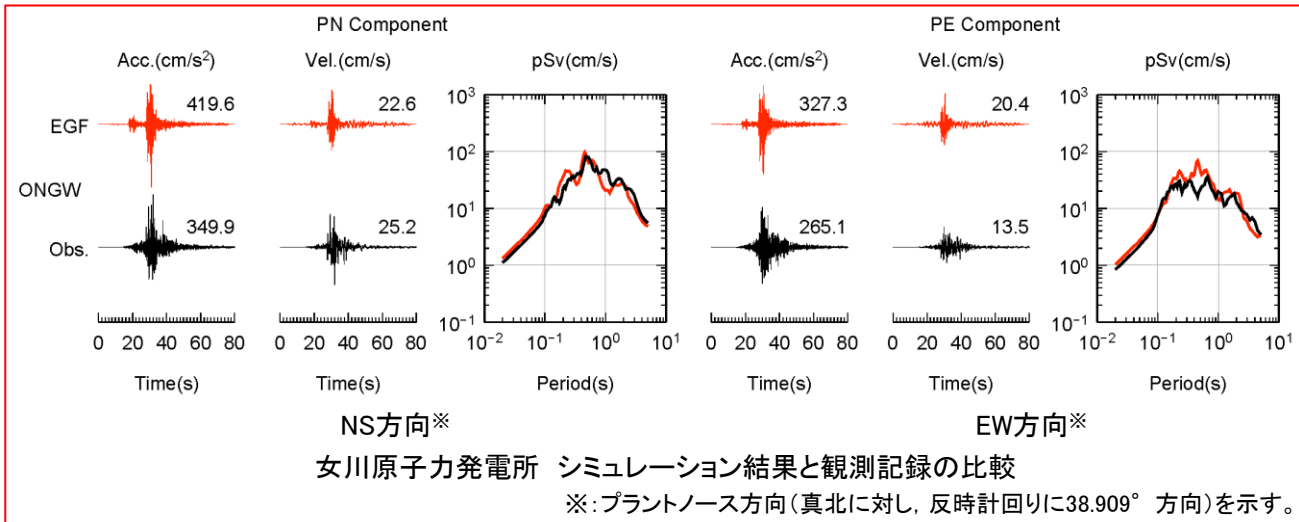
★:全体の破壊開始点, ☆:各SMGAの破壊開始点

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ④2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション

3.16地震反映

- シミュレーション結果は、牡鹿半島に位置する女川原子力発電所(ONGW:下図赤色枠囲み部)及び地震予知総合研究振興会(A.MYGB:下図青色枠囲み部)の応答スペクトルをほぼ再現できている。
- 女川のPN方向にみられる周期0.5秒のピークも概ね再現出来ているが、一方で観測記録に卓越の認められないPE方向のシミュレーション結果もピークを持っており、片方向の卓越としては評価できていない。

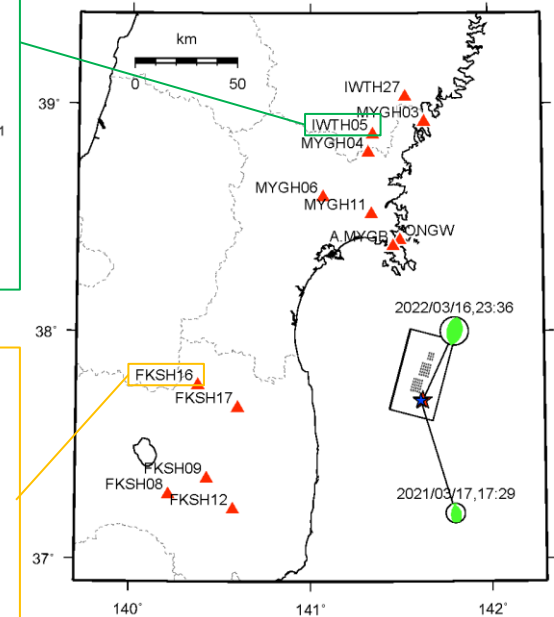
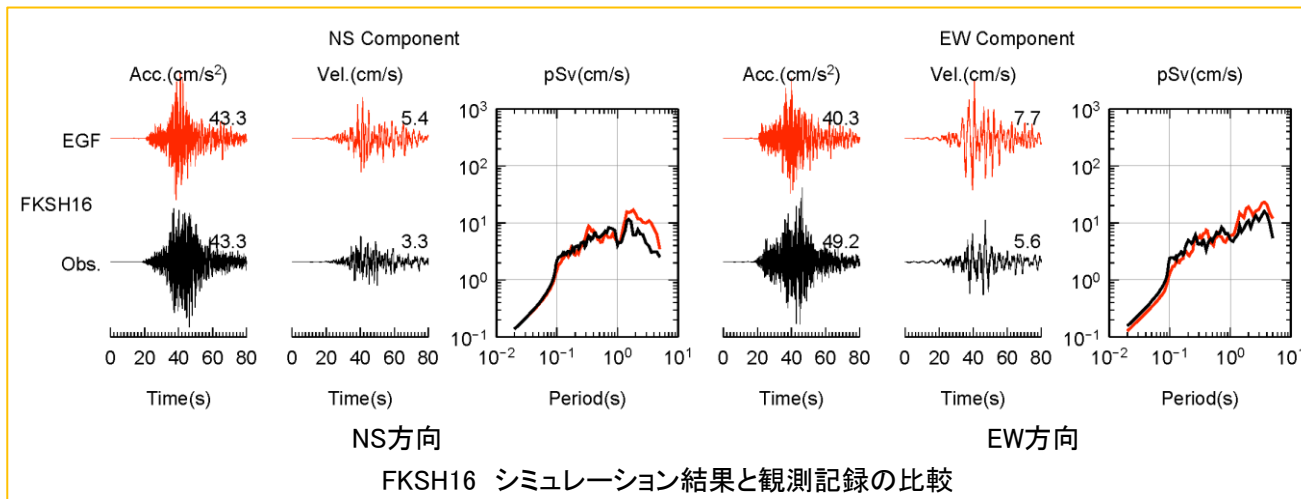
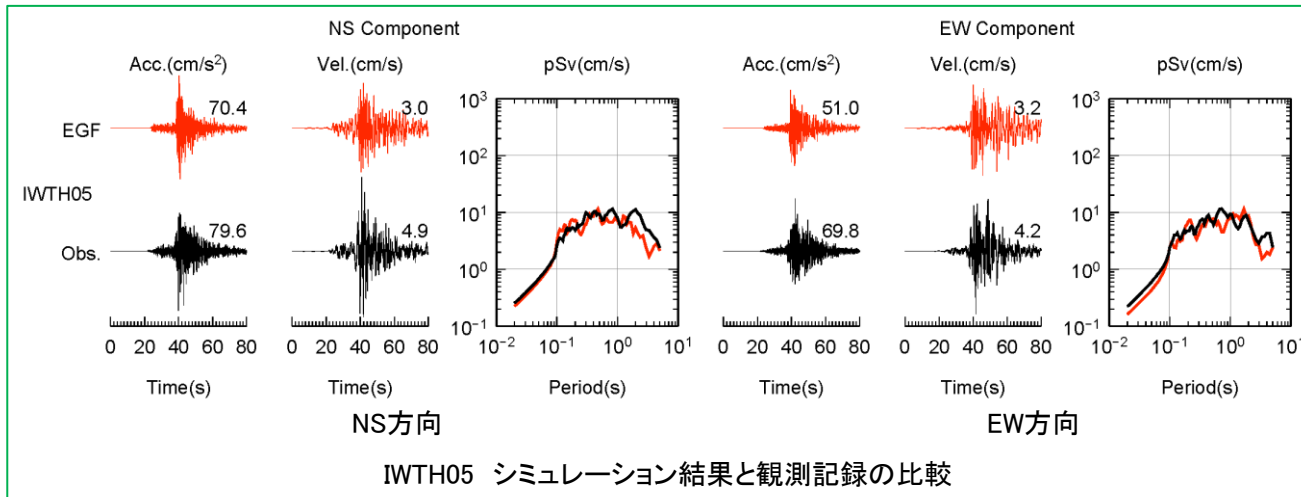


3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ④2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション

3.16地震反映

- シミュレーション結果は、岩手県(例として、IWTH05:下図緑色枠囲み部)及び福島県(例として、FKSH16:下図橙色枠囲み部)の観測点の応答スペクトルもほぼ再現できている。



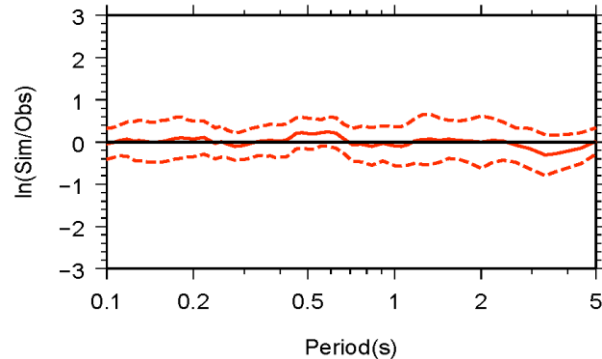
検討対象観測点

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

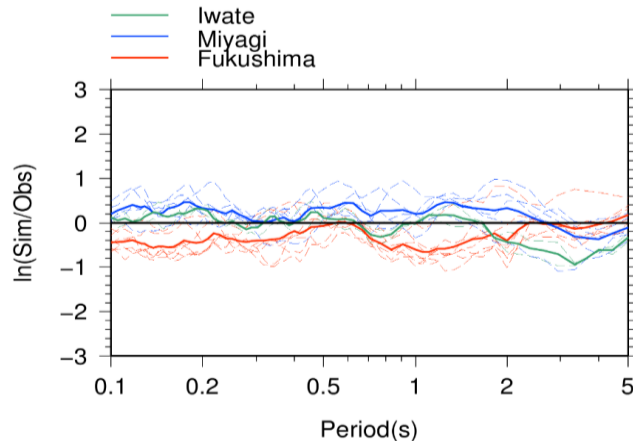
(3) 二重深発地震上面の地震 ④2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション

3.16地震反映

- 観測記録と地震動評価結果を応答スペクトル比で確認すると、全観測点の平均は概ね1に近い。
- 県別にみた場合、福島観測点で地震動評価結果がやや小さめの傾向となった。

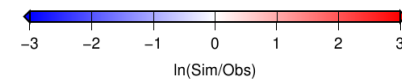
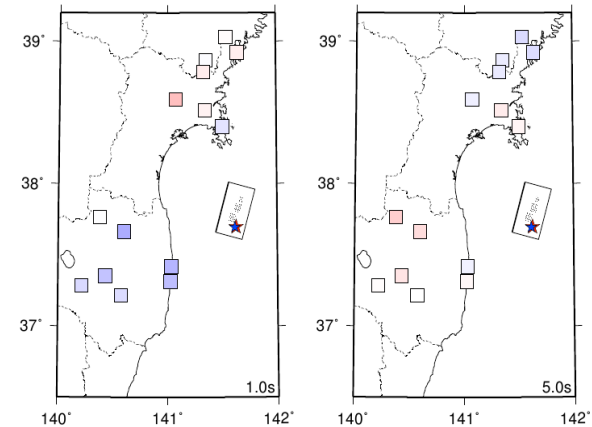
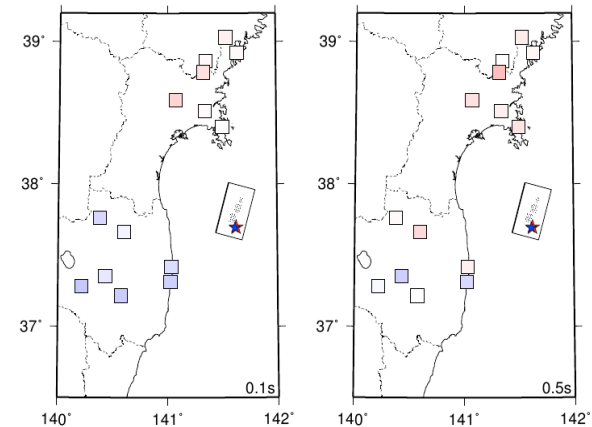


(a) 全観測点の3成分の平均値と±標準偏差



(b) 県別の応答スペクトル比

応答スペクトル比(地震動評価結果／観測記録)



応答スペクトル比の分布(地震動評価結果／観測記録)

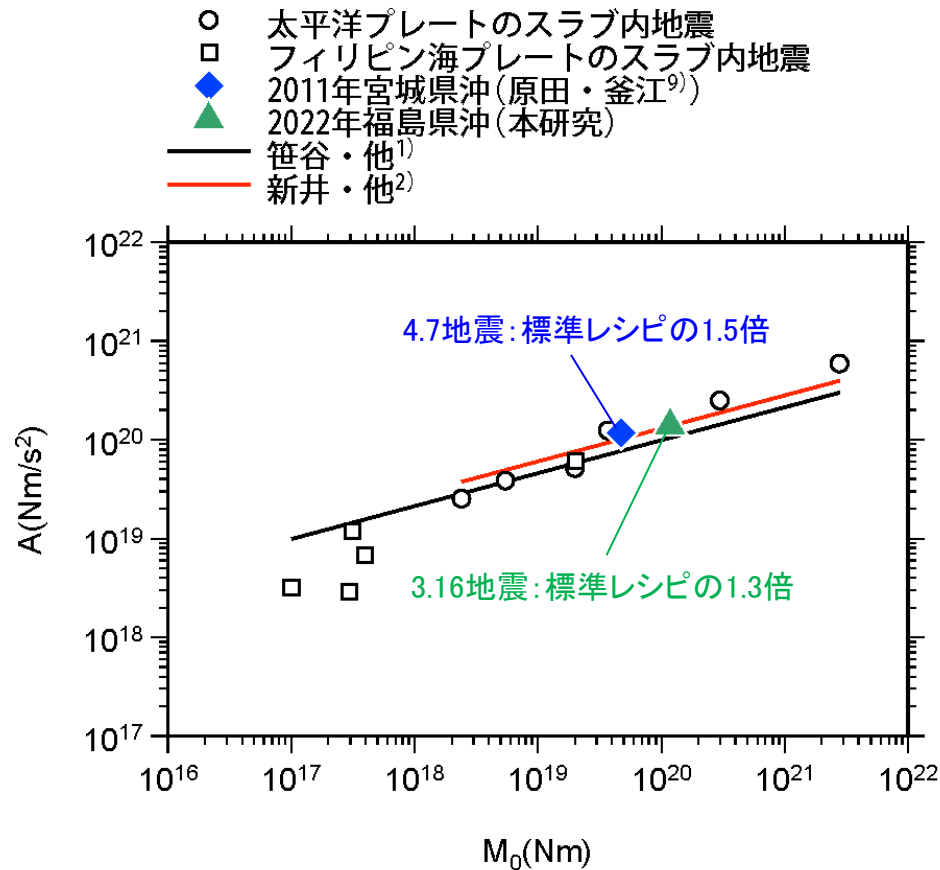
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴

(3) 二重深発地震上面の地震 ④2022年福島県沖の地震 強震動シミュレーション

3.16地震反映

- 3.16地震のSMGAモデルの短周期レベルを過去の地震及びスケーリング則と比較した。3.16地震の短周期レベル(図中:2022年福島県沖)は標準レシピ[※]の約1.3倍となり、4.7地震(図中:2011年宮城県沖)の比率(約1.5倍)より小さい。
- 芝(2022)においても3.16地震の短周期レベルが求められており、スケーリング則との比率は4.7地震より小さい(補足説明資料4章参照)。

※: 標準レシピ: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシピ)で参照している笹谷ほか(2006)の短周期レベル



地震モーメント(M₀)と短周期レベル(A)の関係[新井ほか(2022)に一部加筆]

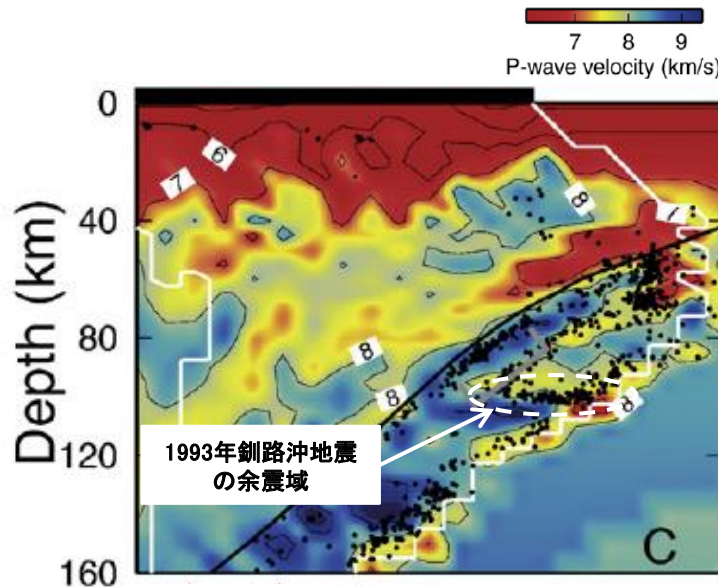
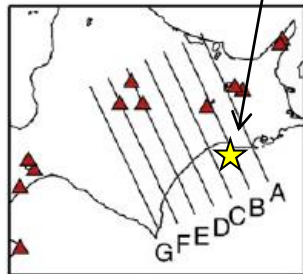
3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (4) 二重深発地震下面の地震

Nakajima et al.(2009)では、1993年釧路沖地震の余震域にも低速度異常が認められることなどを指摘している。

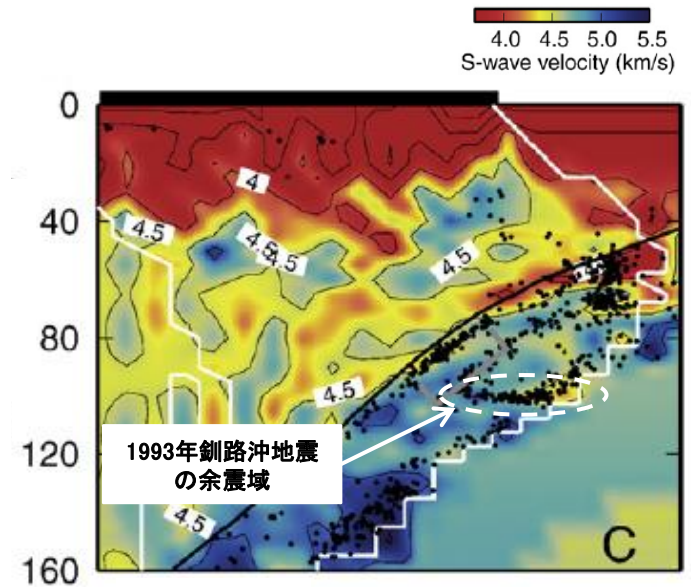
【Nakajima et al.(2009)】

- ◆ 1993年釧路沖地震の余震域には、水平方向の低速度異常が見られ、アウターライズの正断層で海洋プレート内部に取り込まれた水が関与している可能性がある。
- ◆ 1993年釧路沖地震は含水鉱物の脱水により引き起こされた可能性があり、その破壊は、含水鉱物が存在する既存弱面に沿って二重深発地震の上面方向に進展したと考えられる。

1993年釧路沖地震(M7.5)



測線Cの V_p トモグラフィーと震源分布



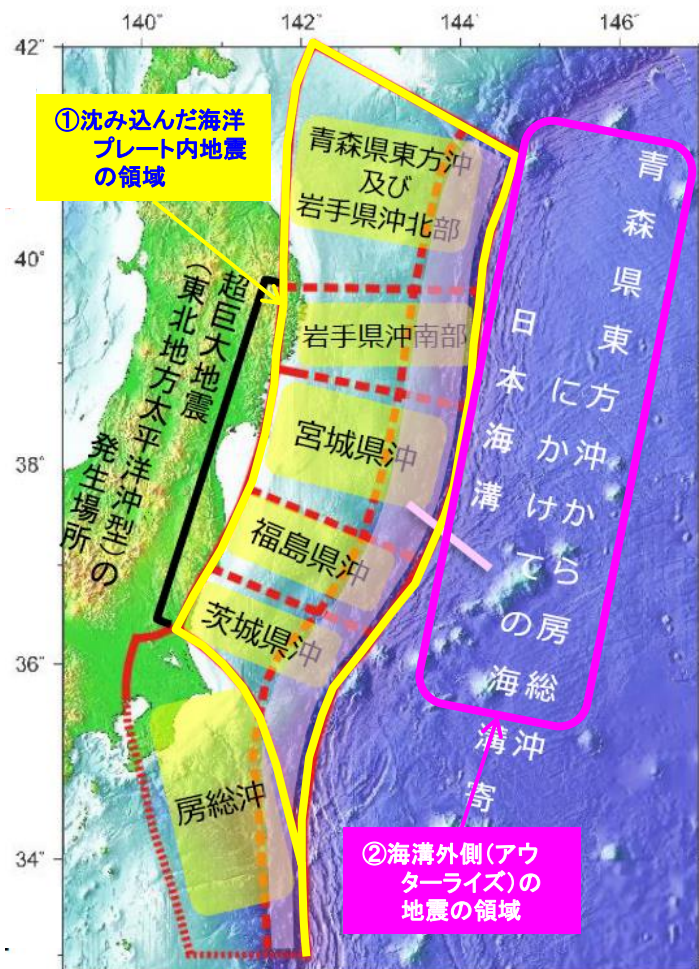
測線Cの V_s トモグラフィーと震源分布

〔Nakajima et al.(2009) に一部加筆〕

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (5) 地震調査研究推進本部の知見

【地震調査研究推進本部(2019) 日本海溝沿いの地震活動の長期評価】

- 地震調査研究推進本部では、2011年東北地方太平洋沖地震後の新たな知見を取り入れて長期評価を見直している。東北地方の太平洋沖には海洋プレート内地震としてのシナリオ地震は想定されておらず、領域震源ごとに定めた地震規模に基づき地震動の確率評価を行っている。



地震調査研究推進本部(2019)

【①沈み込んだ海洋プレート内地震】

- ✓ M7.0～7.5程度の地震としては、1923年以降2011年3月11日までに3～4回発生している。
- ✓ 1968年十勝沖地震(M7.9, プレート間地震)の最大余震(M7.5)が発生している*。
- ✓ 繰り返しが確認されていないことから、青森県東方沖から茨城県沖のどこかでM7.0～7.5程度の地震が発生するものとして評価する。
- ✓ なお、隣接する千島海溝では、1994年北海道東方沖地震(M8.2)が発生しており、日本海溝沿いでも同様の地震が発生する可能性は否定できない。

【②海溝外側(アウターライズ)の地震】

- ✓ 1933年三陸沖の地震が発生していることから、M8.2前後と評価する。

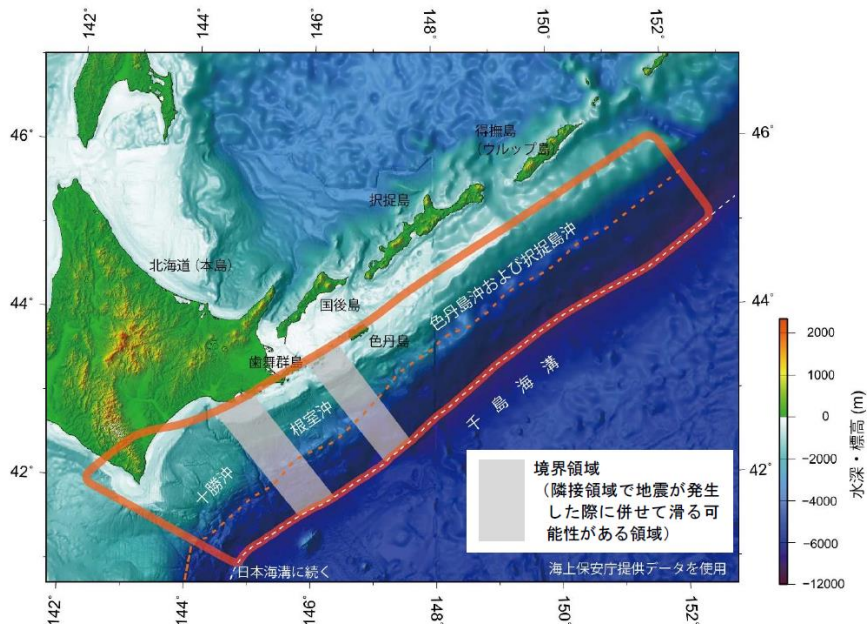
*:Izutani(2011)によれば、本震の影響を上回るものではない(補足説明資料1章2参照)。

日本海溝沿いの評価対象領域(一部加筆)

3.3 敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴 (5) 地震調査研究推進本部の知見

【地震調査研究推進本部(2017a) 千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第三版)】

- 過去に巨大な津波を引き起こす地震が発生していた可能性が指摘されているため、これまでに得られた調査観測・研究の成果を取り入れ、評価を改訂している。
- 海洋プレート内地震としてのシナリオ地震は想定されておらず、領域震源ごとに定めた地震規模に基づき地震動の確率評価を行っている。



千島海溝沿いの評価対象領域

地震調査研究推進本部(2017a)

【①沈み込んだ海洋プレート内のやや浅い地震(深さ50km程度)】

✓ 1839年以降, 1958年択捉島南東沖の地震(M8.1)及び1994年北海道東方沖地震(M8.2)が発生している。

【②沈み込んだ海洋プレート内のやや深い地震(深さ100km程度)】

✓ 1900年以降, 1924年北海道東方沖の地震(M7.5), 1978年択捉島付近の地震(M7.2)及び1993年釧路沖地震(M7.5)が発生している。

【③海溝軸外側(アウターライズ)の地震】

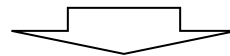
✓ 領域外で2007年ウルップ島沖の地震(M8.2), 隣接する領域で1933年三陸沖の地震(M8.1)が発生している。

3.4 まとめ

3.16地震反映

■敷地周辺の海洋プレート内地震の特徴(東北地方と北海道の比較)

- 東北地方と北海道では、海洋プレート内地震の地震活動の特徴に違いがある。
 - ① 東北地方(東北日本弧)では二重深発地震のうち上面の地震活動(DC型)が優勢であるのに対し、北海道(千島弧)では、下面の地震活動(DE型)が優勢である。
 - ② 過去の地震から、東北地方では、沈み込んだ海洋プレート内地震としては、M7.4を超える地震は発生していない。一方、北海道では、深い領域で1993年釧路沖地震(M7.5)、浅い領域で1994年北海道東方沖地震(M8.2)が発生している。
- 東北地方と北海道のテクトニクスについて、Kita et al.(2010)等により以下の知見が得られている。
 - ① 北海道と東北地方では、海洋プレートの応力中立面の位置が有意に異なっている。応力中立面は、東北地方では海洋プレート上面から深さ21km付近であるのに対し、北海道では深さ9km付近と浅い。北海道は過去に大地震が発生した下面の領域が大きく、東北地方に比べて大きな地震が発生する可能性が考えられる。
 - ② この応力中立面の位置が異なる原因は、北海道下では太平洋プレートが斜め沈み込みをしていることが要因として推定される。
 - ③ また、東北地方に比べて、北海道で発生する海洋プレート内地震の応力降下量は大きい傾向がある。
- 地震調査研究推進本部(2017a, 2019)では、海洋プレート内地震としてのシナリオ地震は想定していない。



北海道で発生する地震は東北地方で発生する地震に比べ敷地からの距離が遠いものの、地震規模や応力降下量が大きい傾向があることから、**東北地方と北海道の両方に同じタイプの地震を想定し、敷地に与える影響を比較した上で、検討用地震を選定する。**

4. 海洋プレート内地震の検討用地震の選定

- 4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針
- 4. 2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震
- 4. 3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震
- 4. 4 沖合いのやや浅い地震(東北)
- 4. 5 二重深発地震下面の地震(北海道) 北海道DE型地震
- 4. 6 沖合いのやや浅い地震(北海道)
- 4. 7 アウターライズ地震
- 4. 8 検討用地震の選定 まとめ(検討対象地震の地震動評価)

4.1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(1) 基本方針と検討のフロー

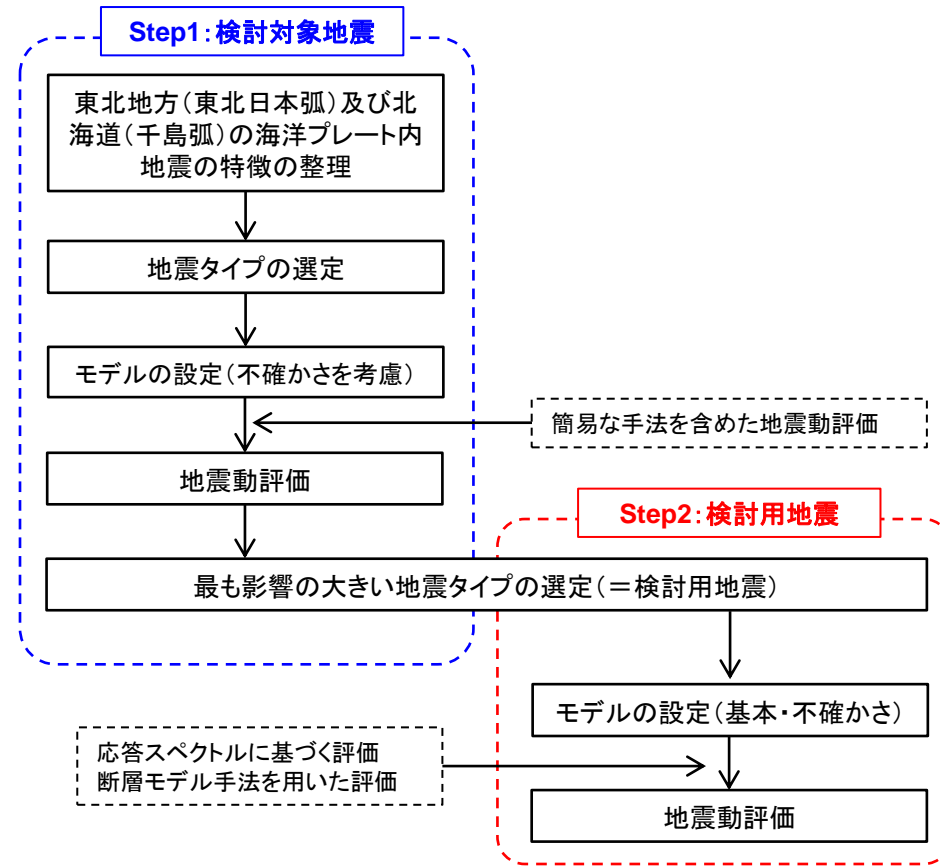
【審査ガイドの要求】

- ・審査ガイドでは、プレート間地震、海洋プレート内地震の検討用地震の震源特性パラメータの設定においては、地震規模、震源領域についての検討要求に加え、特に**海洋プレート内地震では、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要求している。**

【検討用地震選定の基本方針】

- ・海洋プレート内地震の地震規模及び震源位置については、変動地形学・地質学的データによる評価が難しいこと等から保守的な評価が必要なこと、また、応力降下量(短周期レベル)についても決定論的に設定することは困難であり保守的な評価が必要となることから、検討用地震選定の対象となる**検討対象地震**の**パラメータ設定においても、①地震規模、②震源位置、③応力降下量(短周期レベル)について不確かさを考慮したケースを設定した上で、敷地に対し最も影響の大きい地震を選定する。**
- ・検討対象地震の地震動評価では、例えば内陸地殻内地震であれば地震規模と震源距離をパラメータとした距離減衰式を採用するのが一般的であり、選定における大小関係比較は平均的なスペクトル特性に基づいていること、また、**海洋プレート内地震の場合、短周期レベルの違いが応答スペクトルに与える影響を評価出来る手法を採用する必要があること等**を踏まえ、地震動評価は以下のいずれかの手法を採用する。

- ①断層モデル手法で得られる平均応答スペクトル※
- ②断層モデル手法で得られる平均応答スペクトルのNoda et al.(2002)を用いた補正(規模補正等)
- ③敷地において適切な観測記録が得られている場合には、観測記録のNoda et al.(2002)を用いた補正(距離補正等)



海洋プレート内地震の地震動評価フロー

※: 平均応答スペクトル 断層モデル手法を用いた地震動評価では、各小領域の破壊伝播の揺らぎを考慮した複数ケースを算定しており、平均応答スペクトルは複数の算定結果を平均化したもの

4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(2) 海洋プレート内地震の地震諸元設定に当たっての特徴

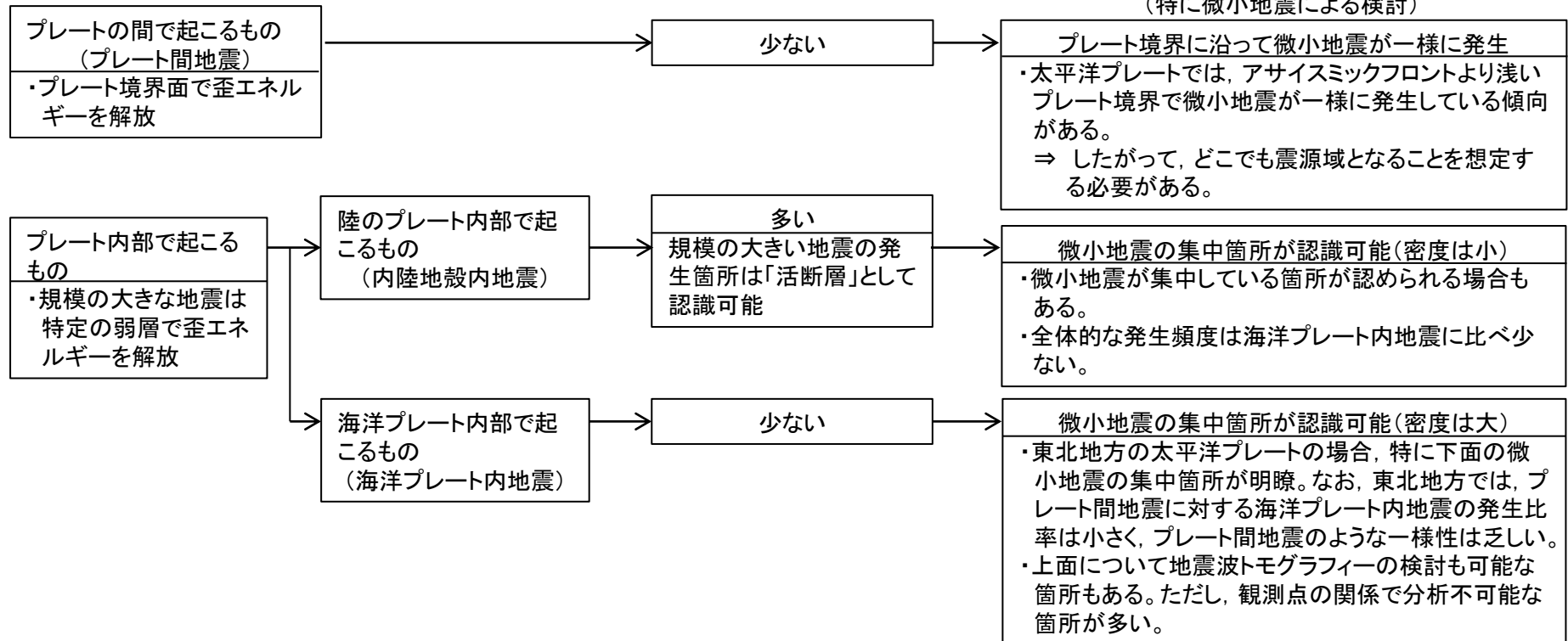
【海洋プレート内地震の特徴(プレート間地震, 内陸地殻内地震との比較)】

- ①海洋プレート内地震は、内陸地殻内地震と同様にプレート内部の弱層で発生する地震である。東北地方では、微小地震の分布はプレート間地震のように一様に分布している訳ではなく、**海洋プレート内地震の発生が集中する箇所**の識別が可能。したがって、タイプによって想定位置の特定は可能。しかし、**沖合いなど観測の精度が落ちる箇所もあり、観測の精度に応じたより保守的な評価が必要**。
- ②また、内陸地殻内地震と比べ、海洋プレート内地震の場合、**変動地形学・地質学的データ**による評価が難しいため、**この点からもより保守的な評価が必要**。例えば、活断層からは地震規模の推定が可能であるが、海洋プレート内地震の場合、**直接的な地震規模の推定は困難なため、保守的な評価が必要**。

【地震のタイプとその特徴】

【変動地形学・地質学的データ】

【地球物理学的データ】 (特に微小地震による検討)



4.1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(3) 東北地方と北海道に想定する地震 ①地震規模, 想定位置, 短周期レベル

【想定する地震規模】

東通原子力発電所の立地を考慮し、東北地方(東北日本弧)及び北海道(千島弧)の海洋プレート内地震の特徴を踏まえ、敷地周辺に発生する海洋プレート内地震のタイプ別に以下の通り考慮する。

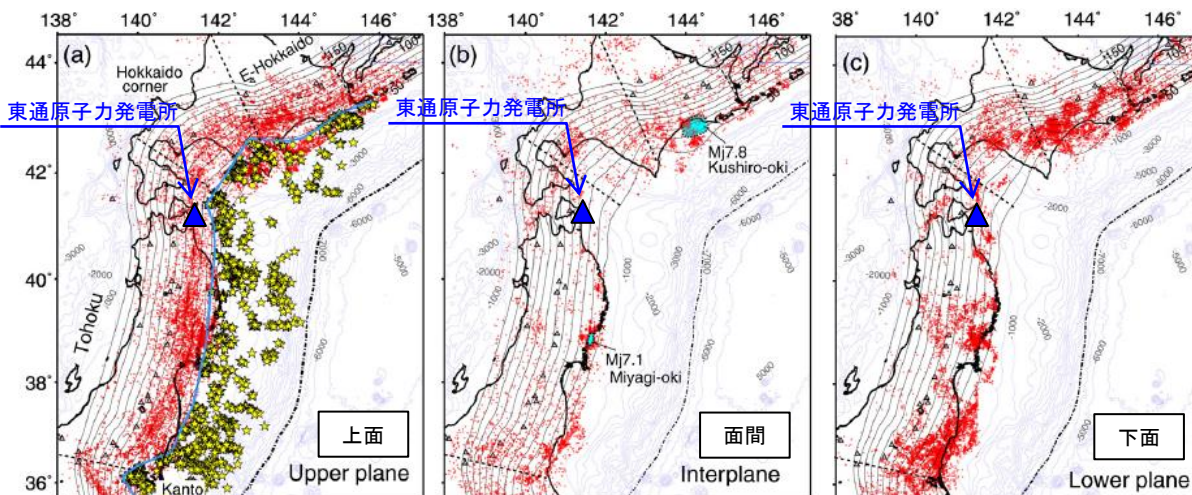
- **基本ケース**は、東北地方及び北海道のそれぞれの各領域において、これまで知られている**最大規模の地震**を考慮する。
- **不確かさ**として、**地球物理学的データ**により想定される規模*もしくは**東北地方・北海道の領域の区別なく最大規模の地震**を考慮する。

【想定する位置】

- 海洋プレート内に流体によると思われる低速度域(例えば、4.7地震や1993年釧路沖地震)が詳しく知られている場合や、面間地震が分布する場合には、その位置に地震を想定することが考えられる。
- しかし、敷地付近等では十分なデータ収集、分析は行われていないことを踏まえ、**基本ケース**、**不確かさケース**とも、海洋プレートの形状を考慮した上で、**地震タイプごとに敷地に最も近い位置(敷地至近)に地震を想定すること**により、保守性を確保する。

【想定する応力降下量(短周期レベル)】

- 想定する位置における応力降下量の特徴が特に認められない場合は、観測記録の残差を考慮した距離減衰式[Noda et al.(2002), p.135参照]との考え方の整合性を踏まえ、**基本ケース**としては**地震調査研究推進本部(2020)の平均的な値**を採用する。
- **不確かさ**として、北海道、東北地方別に、**各領域に発生した過去の大地震の応力降下量**を採用する。



青文字: 基本の想定で考慮する事項
青下線: 基本及び不確かさの想定で共通に考慮する事項
赤文字: 不確かさの想定で考慮する事項
※: 次頁参照

【Kita et al.(2010)】

- 面間地震は、下面の地震が発生する地域にみられる。東北北部(北緯40~41度)ではほとんど活動が見られない。
- 会合部の深さ120km以浅では、下面の活動性は非常に低い。

[Kita et al.(2010)に一部加筆]

4.1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(3) 東北地方と北海道に想定する地震 ② 東北地方 地震規模

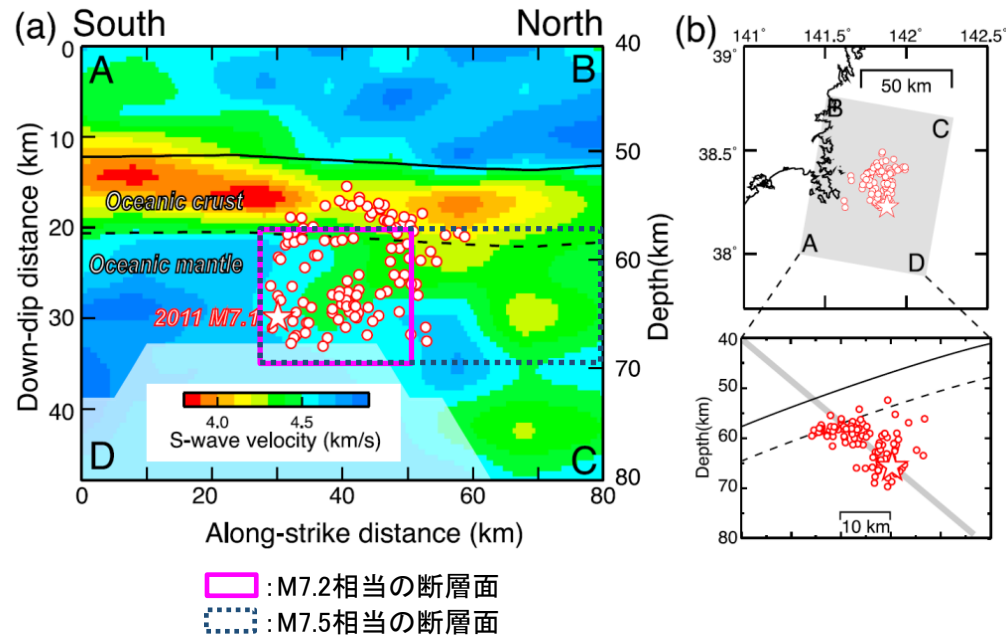
➤ 東北地方で想定する地震規模

【Nakajima et al.(2011)】からの整理

- ・4.7地震の断層面に沿ったS波速度分布から、余震分布から推定される断層面は、海洋性マントル内の低速度域に対応している。
- ・4.7地震の震源から南側の海洋性マントル内は高速度域となっており、余震の分布はない。
- ・一方、北側の海洋性マントル内の低速度域は余震分布のさらに北側にも広がっている。



- ・4.7地震の震源域の北側の低速度域の広がりを保守的に断層面として考慮した場合、地震規模M7.5相当の断層面となる。



4.7地震の震源域周辺のS波速度構造の南北断層面に沿った分布図〔Nakajima et al.(2011)〕に一部加筆〕
 白丸は再決定した余震。黒実線はプレート境界。破線は海洋プレートモホ面。

4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(3) 東北地方と北海道に想定する地震 ③地震タイプごとの特徴の整理

3.16地震反映

➤ 東北地方及び北海道の地震タイプごとの特徴を以下のとおり整理した。

東北地方と北海道における海洋プレート内地震の地震タイプごとの特徴

地震のタイプ		東北地方(東北日本弧)	北海道(千島弧)
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	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 下面に比べて活動が優勢。 ➤ Down-dip Compression(DC)型が卓越。 ➤ M7クラスとして5.26地震, 4.7地震, 2.13地震及び3.16地震が発生し, 地震規模の最大は3.16地震(M7.4)。 ➤ 4.7地震では, 震源域の北側にも低速度域を確認。 ➤ 4.7地震の短周期レベルは, 海洋プレート内地震の平均的な値*の1.5倍。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ プレート上面から応力中立面までの厚さが薄く, 規模の大きな地震が発生する二重深発地震下面に比べて地震規模は小さい。
	二重深発地震 下面の地震	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 上面に比べて分布は不均質。 ➤ Down-dip Extension(DE)型が卓越。 ➤ 地震規模の最大は, 2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)。 ➤ 同地震の短周期レベルは, 海洋プレート内地震の平均的な値*の1.6倍(後述)。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Down-dip Extension(DE)型が卓越。 ➤ 会合部付近では, 下面の活動性は低い。 ➤ 応力中立面が浅く, 地震が発生する領域が広い。 ➤ 地震規模の最大は, 1993年釧路沖地震(M7.5)。 ➤ 同地震の短周期レベルは, 海洋プレート内地震の平均的な値*の2.1倍(後述)。
	沖合いの やや浅い地震	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 地震規模の最大は, 2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)。 ➤ 同地震の短周期レベルは, 海洋プレート内地震の平均的な値*の0.6倍(後述)。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1994年北海道東方沖地震(M8.2)が発生。同地震は世界的に見ても最大級の海洋プレート内地震。 ➤ 同地震の短周期レベルは, 海洋プレート内地震の平均的な値*の2.0倍(後述)。
沈み込む 海洋プレート内地震 (アウターライズ地震)		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 世界的に見た正断層のアウターライズ地震の最大規模である1933年三陸沖の地震(M8.1)が発生。 ➤ 最近では, 2011年3月11日15時25分三陸沖の地震(M7.5)が発生。 ➤ 同地震の短周期レベルは, 海洋プレート内地震の平均的な値*の0.7倍(後述)。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 規模の大きなアウターライズ地震は知られていない。

*: 強震動予測レンジ 地震調査研究推進本部(2020)

4.1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(3) 東北地方と北海道に想定する地震 ④地震タイプごとの整理

3.16地震反映

➤ 前頁を踏まえ、東北地方及び北海道の地震タイプごとに想定する地震を以下に示す。

青文字: 基本の想定で考慮する事項
青下線: 基本及び不確かさの想定で共通に考慮する事項
赤文字: 不確かさの想定で考慮する事項

東北地方と北海道に想定する地震

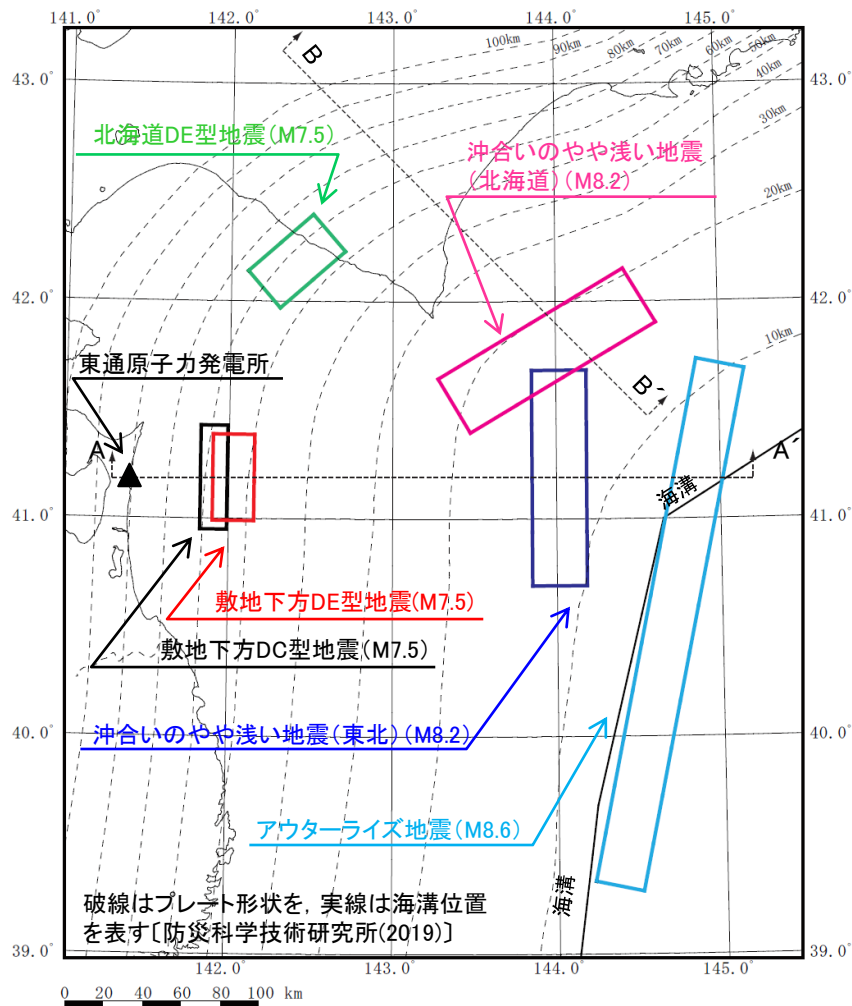
地震のタイプ	東北地方(東北日本弧)に想定する地震	北海道(千島弧)に想定する地震
沈み込んだ海洋プレート内地震	<p>敷地下方DC型地震</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケースとして敷地至近に東北地方の上面の地震の最大規模であるM7.4を想定。短周期レベルは平均的な値※の1.0倍。 ➤ 不確かさとして、4.7地震の低速度域の拡がりも踏まえ、保守的に評価した地震規模(M7.5)及び短周期レベル(平均的な値※の1.5倍)を想定。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 敷地からの距離が遠く、影響は小さいことから想定しない。
	<p>敷地下方DE型地震</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケースとして敷地至近に東北地方の下面の最大規模であるM6.8を想定。短周期レベルは平均的な値※の1.0倍。 ➤ 不確かさとして、北海道で発生した1993年釧路沖地震の地震規模M7.5を想定。東北地方の最大規模の地震の短周期レベル(平均的な値※の1.6倍)を想定。 	<p>北海道DE型地震</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケース、不確かさケースとも敷地至近の千島弧の位置に北海道の最大規模(1993年釧路沖地震)であるM7.5を想定。 ➤ 基本ケースの短周期レベルは平均的な値※の1.0倍。 ➤ 不確かさケースは、最大規模の地震の短周期レベル(平均的な値※の2.1倍)を想定。
	<p>沖合いのやや浅い地震(東北)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケースとして東北地方の沖合いのやや浅い地震の最大規模であるM7.3を同じ深さの敷地至近(敷地前面の日本海溝西側)に想定。観測記録に基づき、短周期レベルは小さい傾向(平均的な値※の0.6倍)を考慮。 ➤ 不確かさとして北海道で発生した1994年北海道東方沖地震のM8.2を想定。短周期レベルは保守性を考慮し、平均的な値※の1.0倍を想定。 	<p>沖合いのやや浅い地震(北海道)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケース、不確かさケースとも敷地至近の千島弧の位置に北海道の最大規模(1994年北海道東方沖地震)であるM8.2を想定。 ➤ 基本ケースの短周期レベルは平均的な値※の1.0倍。 ➤ 不確かさケースは、最大規模の地震の短周期レベル(平均的な値※の2.0倍)を想定。
	<p>アウターライズ地震</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 基本ケースは、敷地至近(敷地前面の日本海溝東側)に東北地方の最大規模(1933年三陸沖の地震)であるM8.1を想定。 ➤ 不確かさとして津波評価を考慮した地震規模M8.6を想定。 ➤ 文献に基づき、短周期レベルは小さい傾向を考慮(平均的な値※の0.7倍)。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 東北地方に想定するアウターライズ地震に比べ距離が遠く、影響は小さいことから想定しない。

※: 強震動予測レシピア
地震調査研究推進本部(2020)

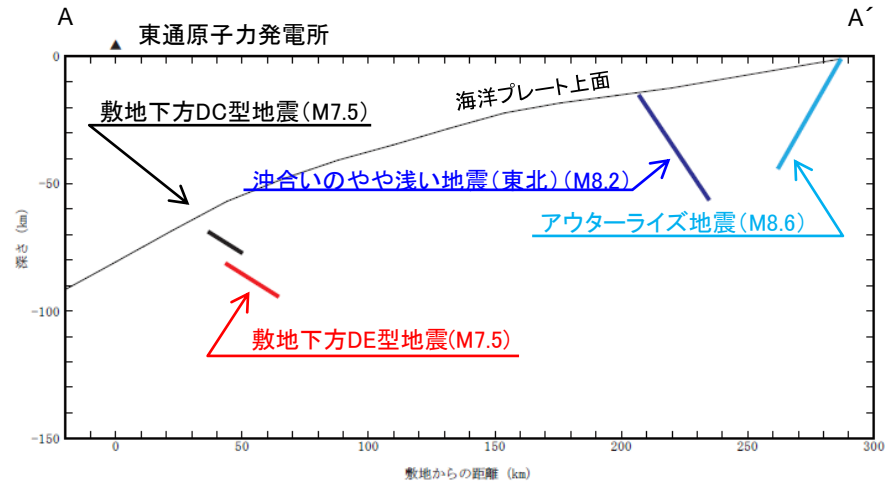
4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針 (3) 東北地方と北海道に想定する地震 ⑤断層位置

➤ 想定する地震の断層位置を示す。

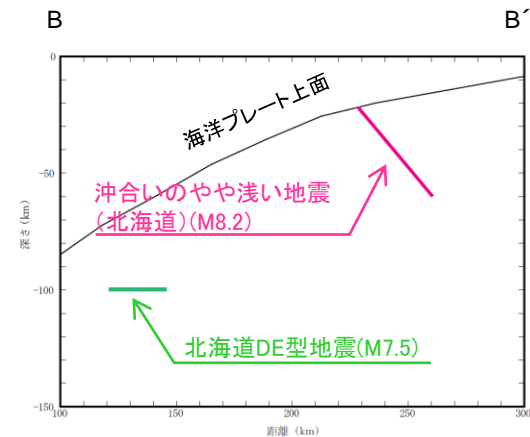
※: 想定する断層面は、最大地震規模のケースを記載した。



断層配置図(平面)



断層配置図(A-A'断面)

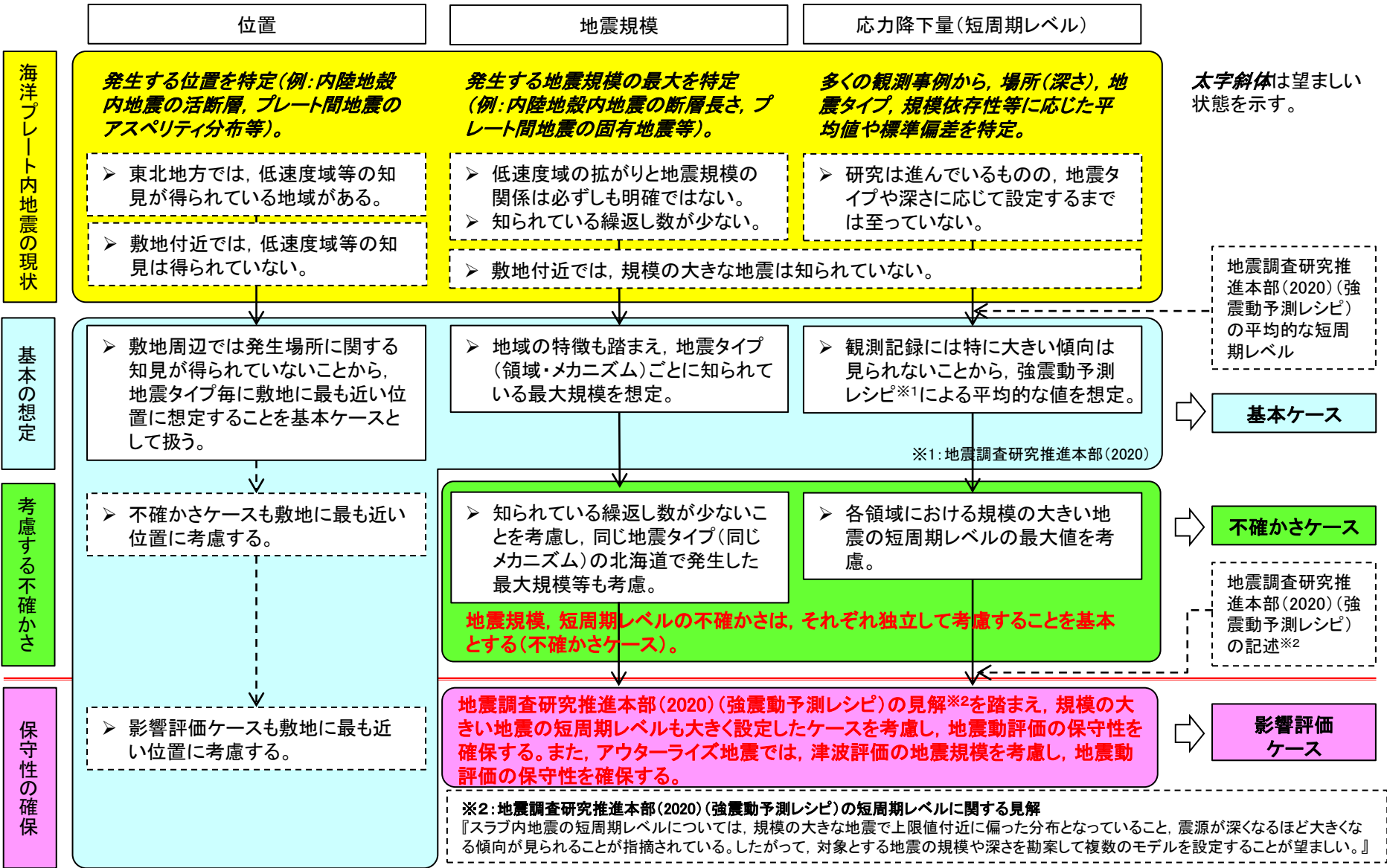


断層配置図(B-B'断面)

4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(4) 基本ケース及び不確かさの検討 ①基本方針

➤ 検討用地震の選定にあたり設定する基本ケース及び考慮する不確かさの基本方針を以下に示す。

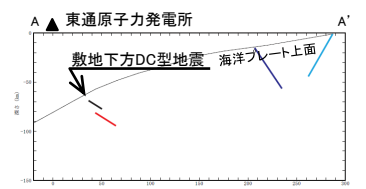
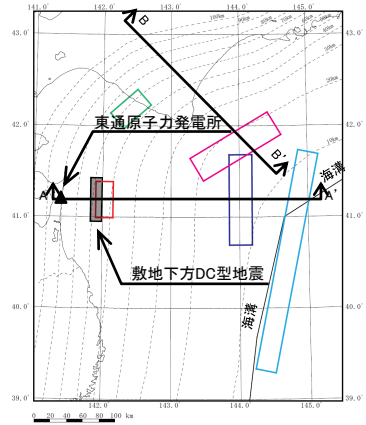
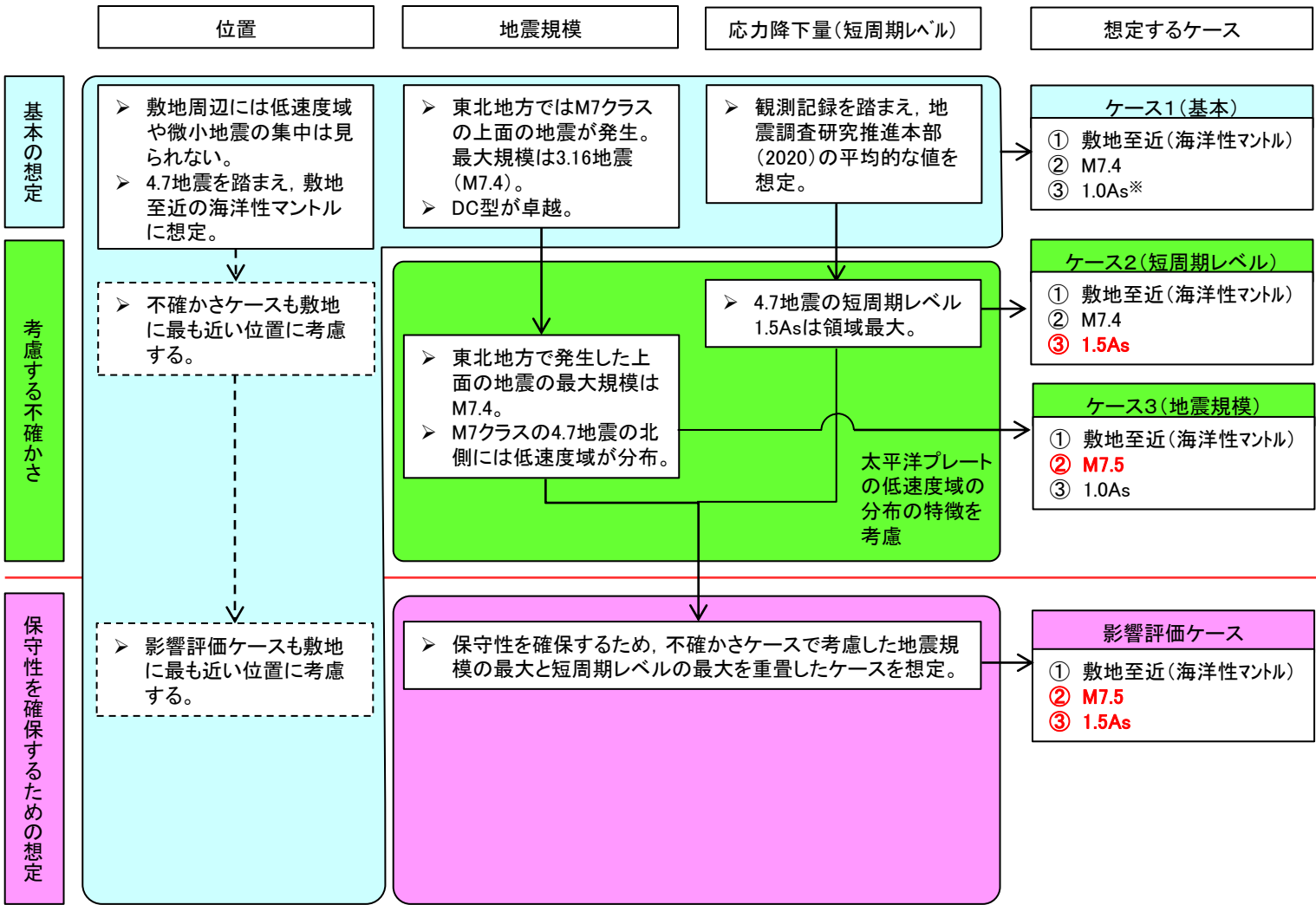


4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(4) 基本ケース及び不確かさの検討 ②二重深発地震上面の地震(東北)

3.16地震反映

➤ 二重深発地震上面の地震(東北)[敷地下方DC型地震]の基本ケース及び考慮する不確かさ等の検討フローを以下に示す。

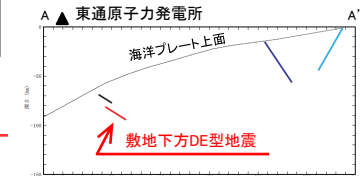
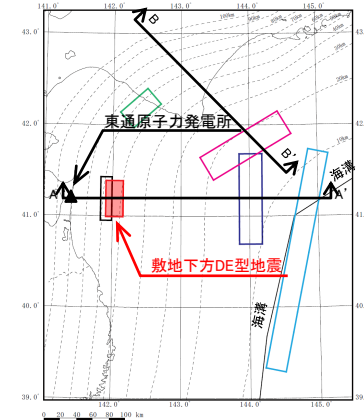
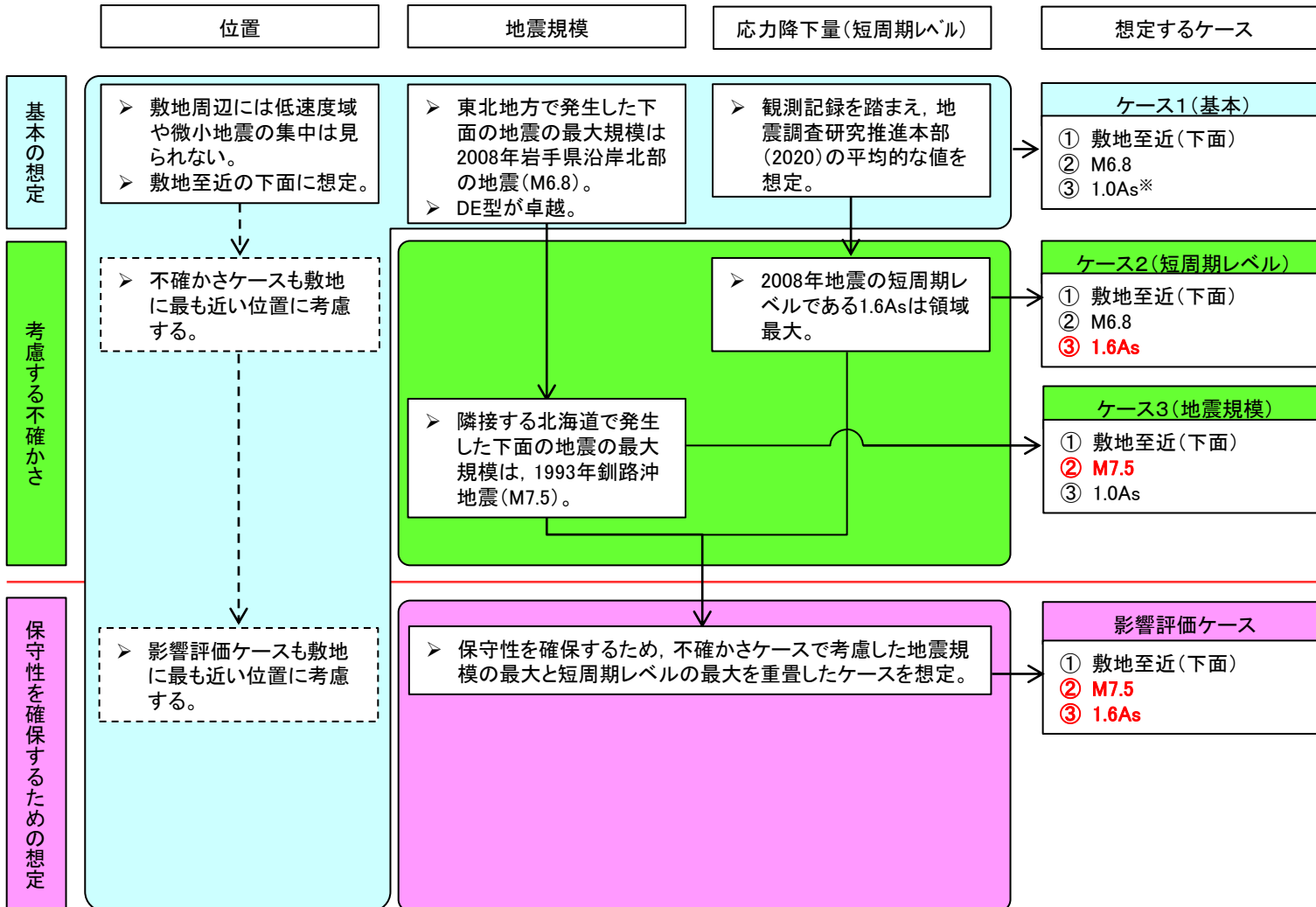


*: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシビ)の短周期レベルを1.0Asとする。

4.1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(4) 基本ケース及び不確かさの検討 ③二重深発地震下面の地震(東北)

➤ 二重深発地震下面の地震(東北)[**敷地下方DE型地震**]の基本ケース及び考慮する不確かさ等の検討フローを以下に示す。

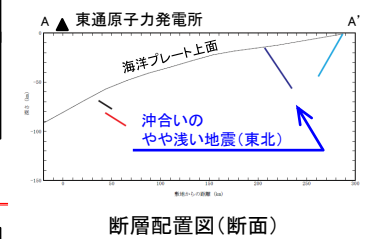
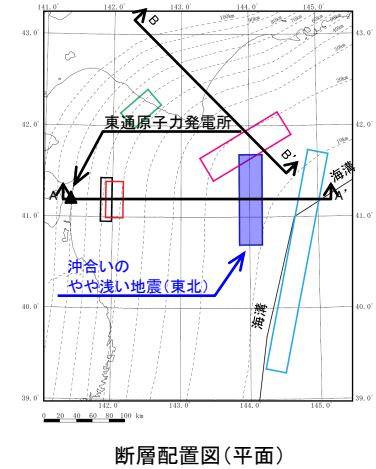
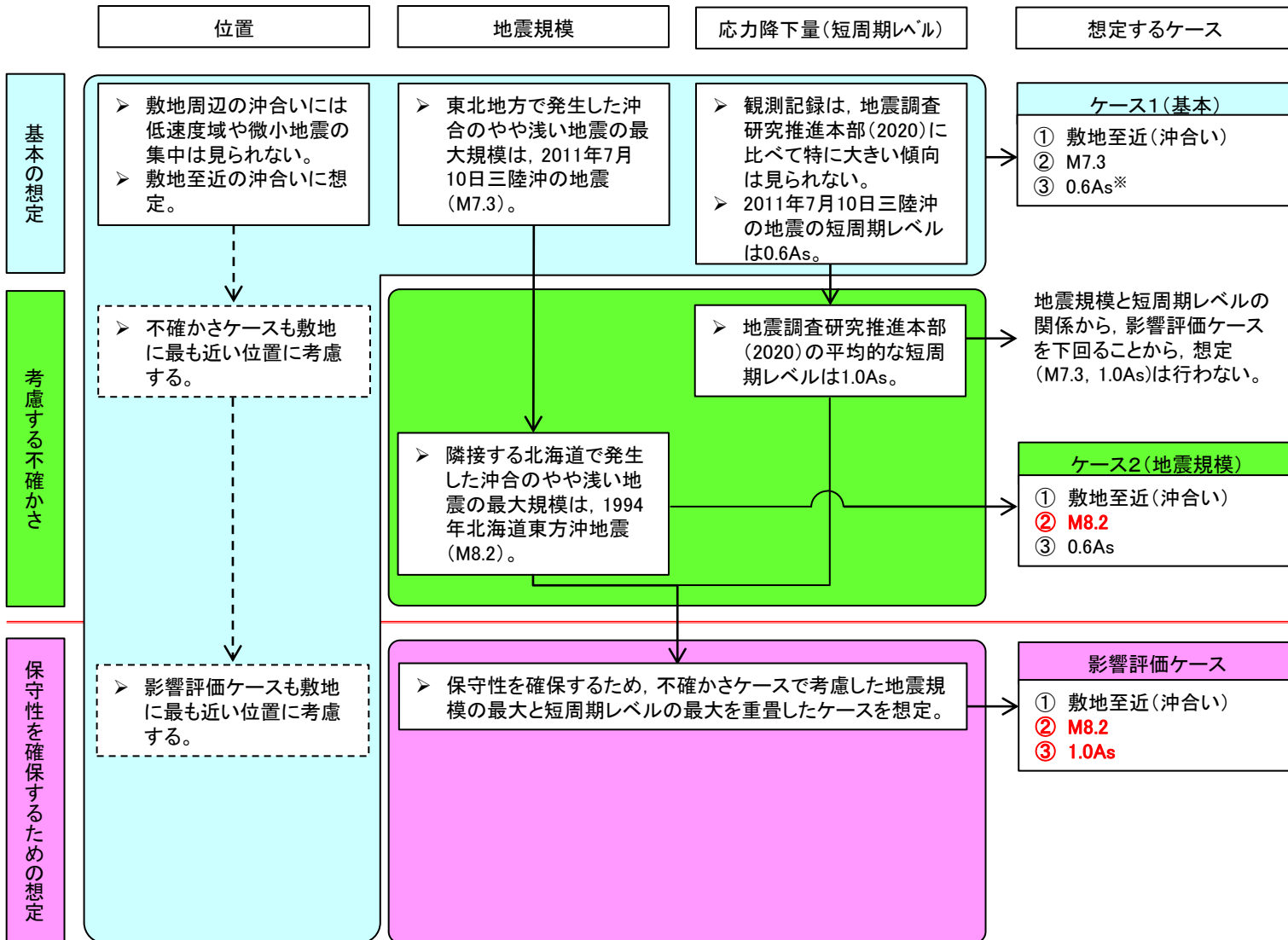


※:地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシビ)の短周期レベルを1.0Asとする。

4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(4) 基本ケース及び不確かさの検討 ④ 沖合いのやや浅い地震(東北)

➤ 沖合いのやや浅い地震(東北)の基本ケース及び考慮する不確かさ等の検討フローを以下に示す。

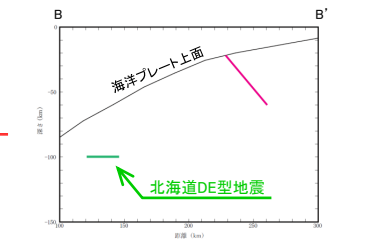
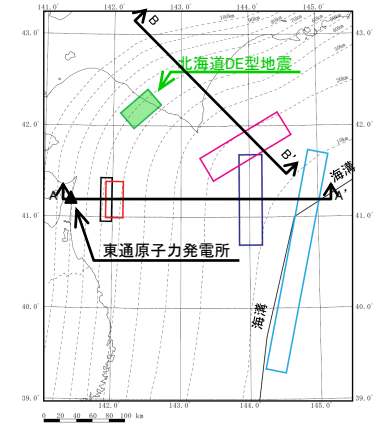
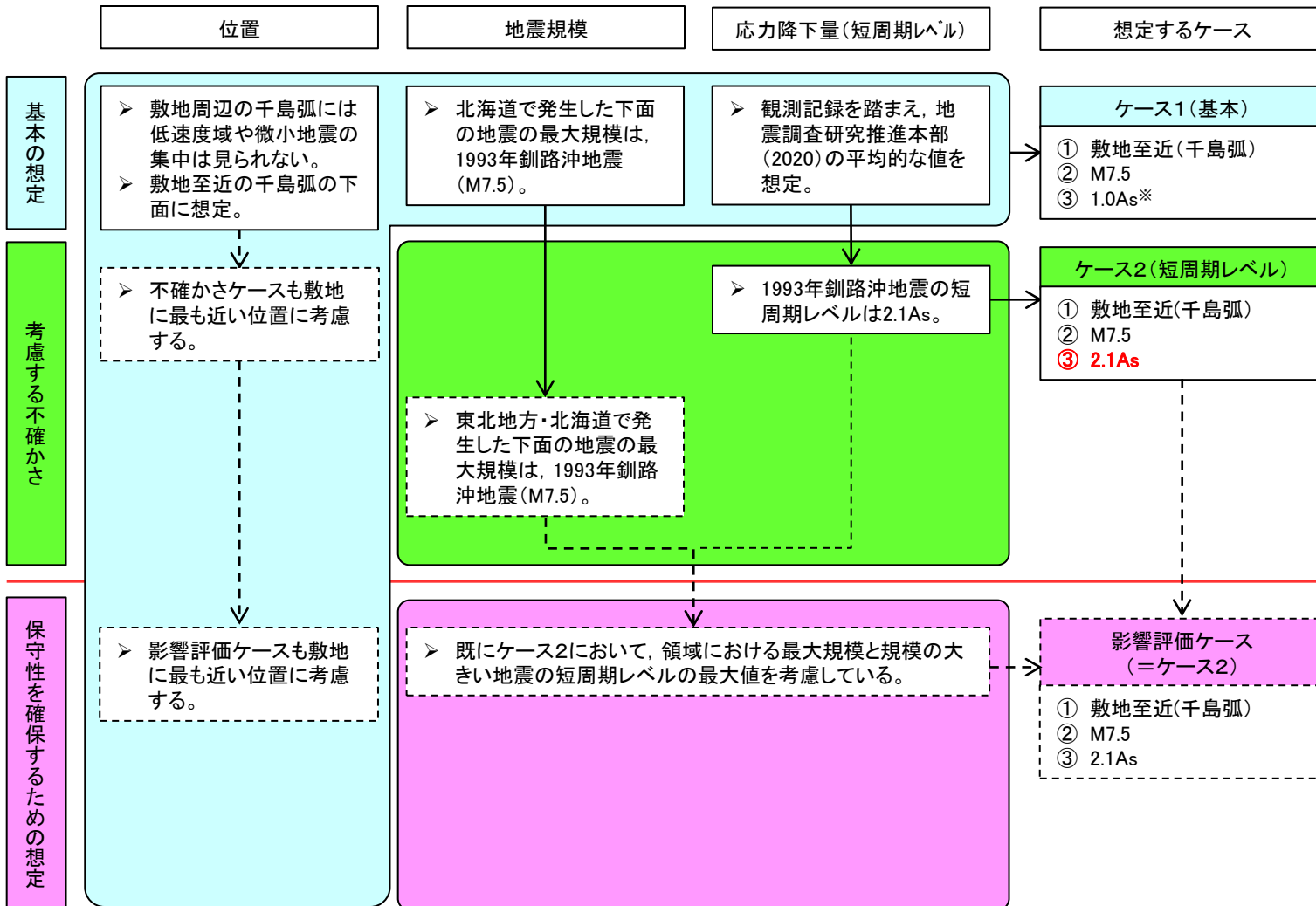


※: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシピ)の短周期レベルを1.0Asとする。

4.1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(4) 基本ケース及び不確かさの検討 ⑤二重深発地震下面の地震(北海道)

➤ 二重深発地震下面の地震(北海道)[北海道DE型地震]の基本ケース及び考慮する不確かさ等の検討フローを以下に示す。

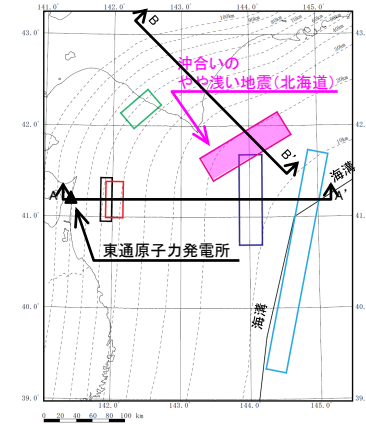
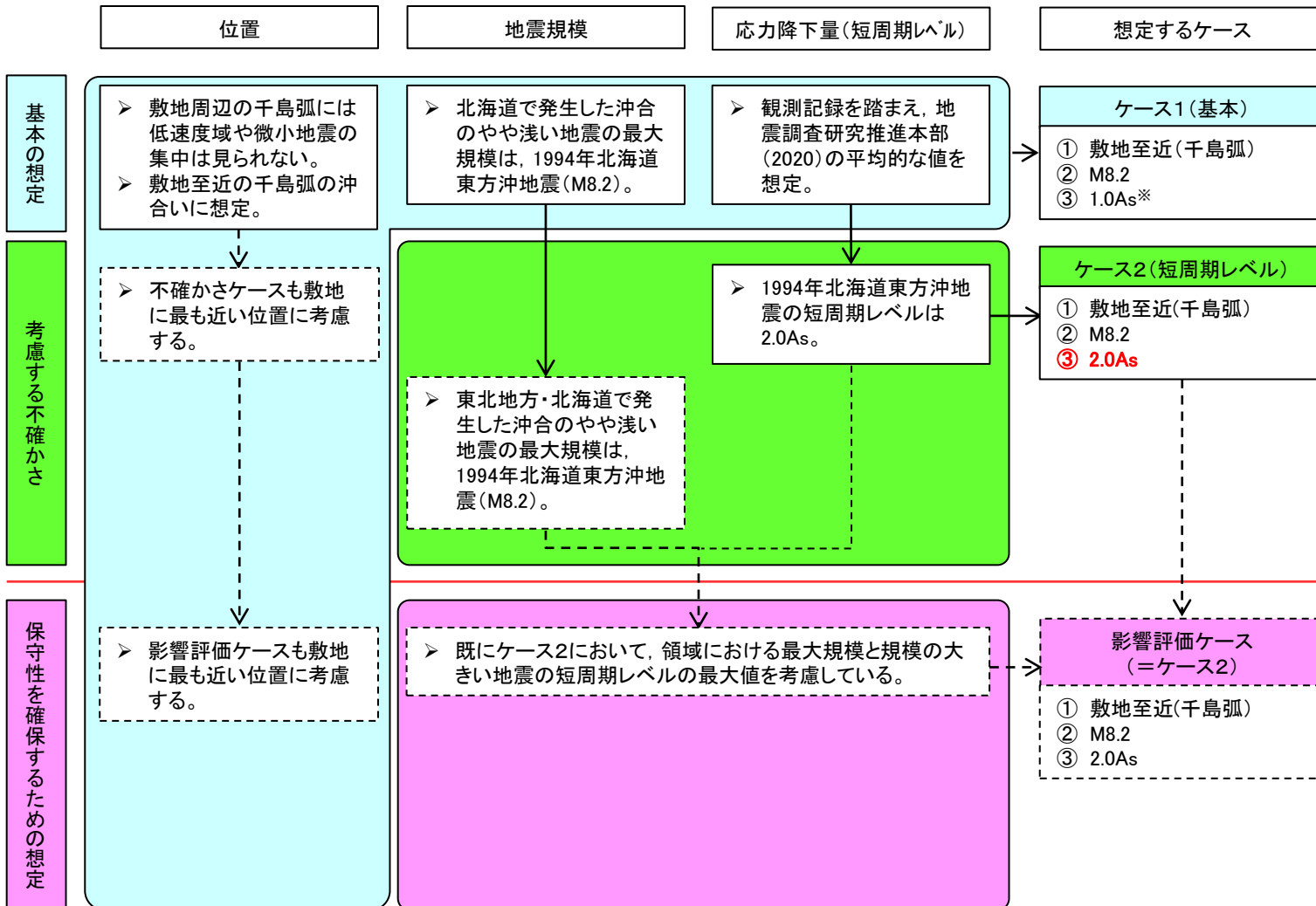


※: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシビ)の短周期レベルを1.0Asとする。

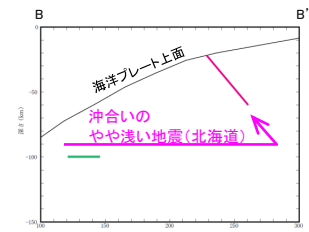
4. 1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(4) 基本ケース及び不確かさの検討 ⑥ 沖合いのやや浅い地震(北海道)

➤ 沖合いのやや浅い地震(北海道)の基本ケース及び考慮する不確かさ等の検討フローを以下に示す。



断層配置図(平面)



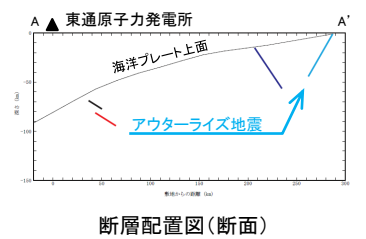
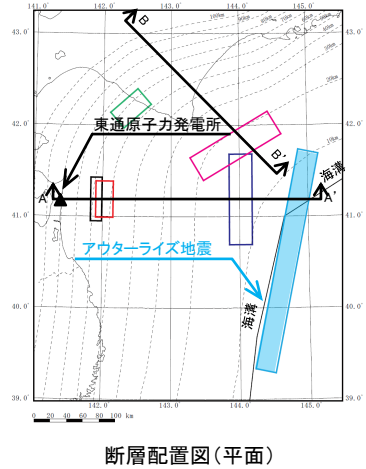
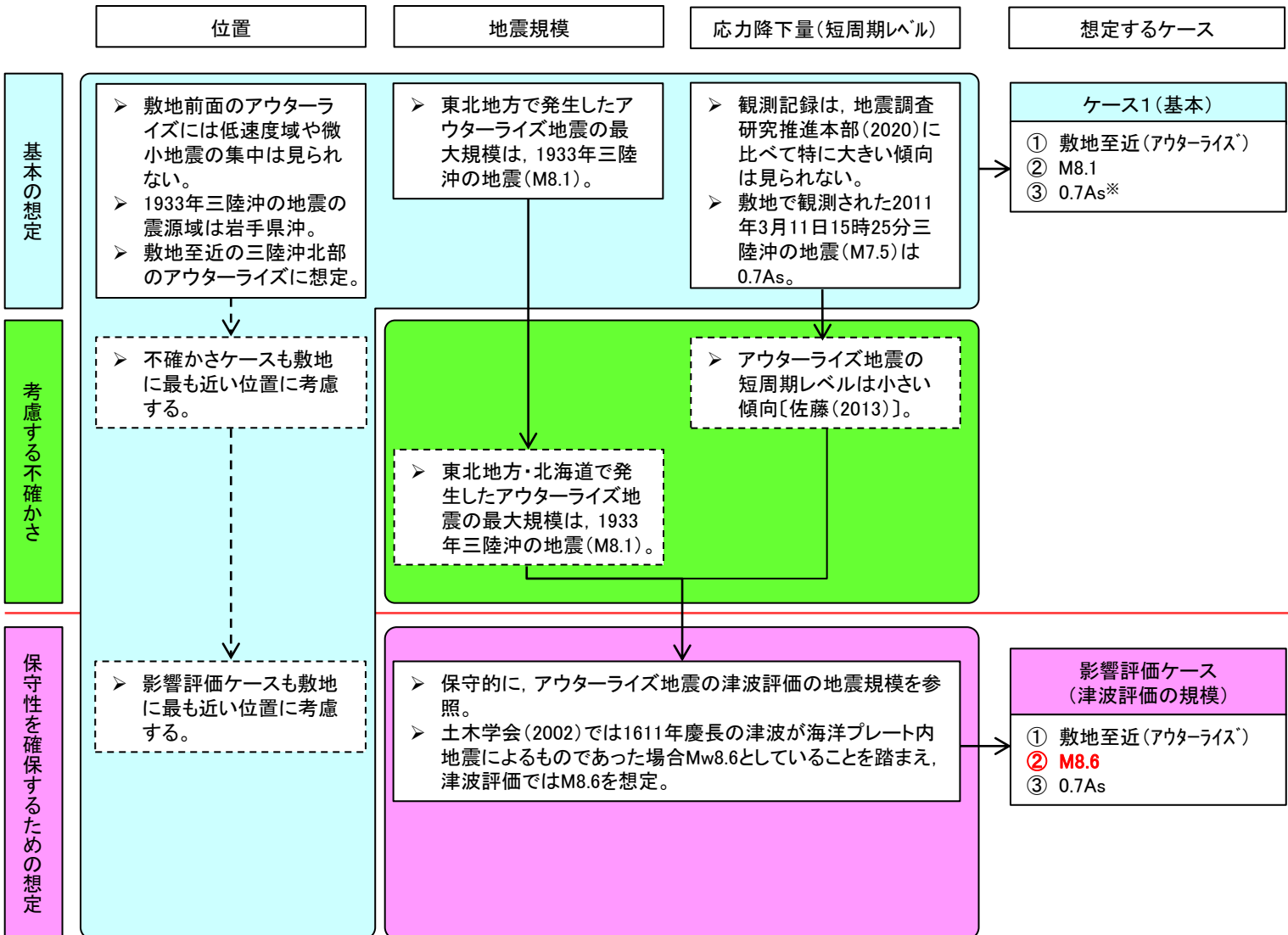
断層配置図(断面)

※: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシビ)の短周期レベルを1.0Asとする。

4.1 海洋プレート内地震の検討用地震選定の基本方針

(4) 基本ケース及び不確かさの検討 ⑦アウターライズ地震

▶ **アウターライズ地震**の基本ケース及び考慮する不確かさ等の検討フローを以下に示す。



*:地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシビ)の短周期レベルを1.0Asとする。

4.2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震 (1) 基本ケース及び不確かさの想定

3.16地震反映

- 東通原子力発電所周辺では、4.7地震の震源域にみられるような海洋プレート内の低速度域は確認されていないものの、敷地に最も近い海洋プレート内地震として上面の「敷地下方DC型地震」を想定する。
- 基本ケースは、東北地方で発生した二重深発地震上面の地震の最大規模であるM7.4(3.16地震)の地震規模とし、M7クラスの4.7地震を参考に敷地至近の海洋性マントルに想定する。断層傾斜角は、アウターライズで生成した正断層の再活動を考慮し、海洋プレートの境界面に対して60°とする。
- 破壊開始点は、破壊が敷地に向かう位置に、敷地と断層の位置関係を考慮して設定する。
- 東北地方で発生した二重深発地震上面の地震としては4.7地震の短周期レベルが最も大きいことから、不確かさとして考慮する。また、地震規模の不確かさとして、4.7地震の知見(震源域北部の低速度域の拡がり)も踏まえ、保守性も考慮したM7.5を想定する。
- 敷地において適切な観測記録が得られていないことから(補足説明資料2章2参照)、統計的グリーン関数法[釜江ほか(1991)及び入倉ほか(1997)]を用いた地震動評価を行う。

検討対象地震の想定[二重深発地震上面の地震(敷地下方DC型地震)]

	タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベル※1 (A)	備考
ケース1 (基本ケース)	DC型	M7.4	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.0As	・東北地方の最大規模の上面の地震を考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトル
ケース2 (短周期レベル)	DC型	M7.4	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.5As	・原田・釜江(2011)による4.7地震のM ₀ -Aを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトルを補正
ケース3 (地震規模)	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.0As	・4.7地震の知見(低速度域の拡がり)を踏まえ、 保守性も考慮し、M7.5を想定 ・断層モデルの平均応答スペクトルを補正
影響評価ケース	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.5As	・断層モデルの平均応答スペクトル

※1: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

■ : 考慮する不確かさ

■ : あらかじめモデルに織り込む不確かさ

↑
短周期レベルの不確かさに反映

4.7地震の地震調査研究推進本部(2020)に対する短周期レベルの倍率

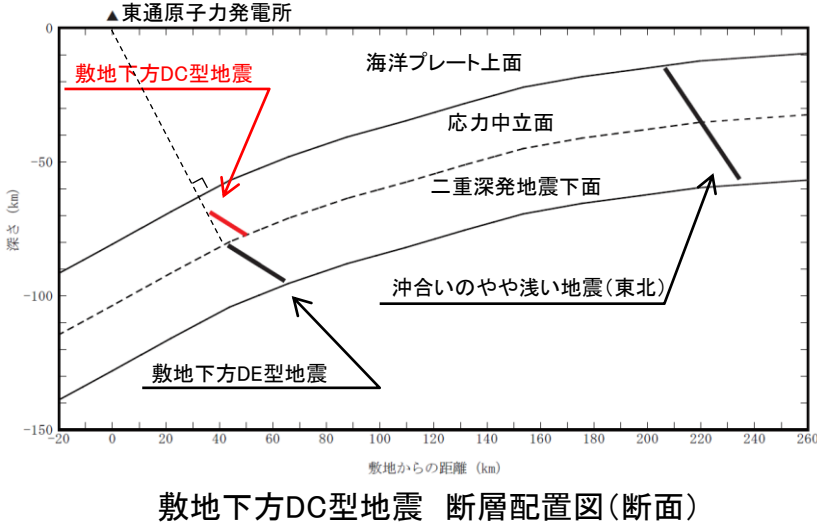
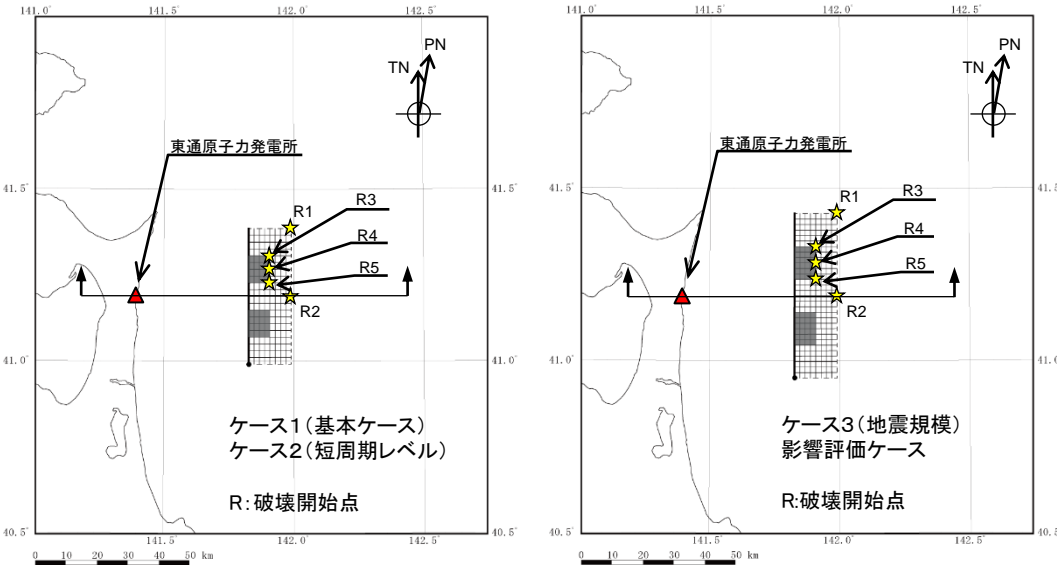
	①原田・釜江(2011)	②地震調査研究推進本部(2020)※2	①/②
短周期レベル(A) (Nm/s ²)	1.16 × 10 ²⁰	7.67 × 10 ¹⁹	1.5

※2: F-netによる地震モーメント[4.74 × 10¹⁹(Nm)]より算定

4.2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震 (1) 基本ケース及び不確かさの想定 断層モデル

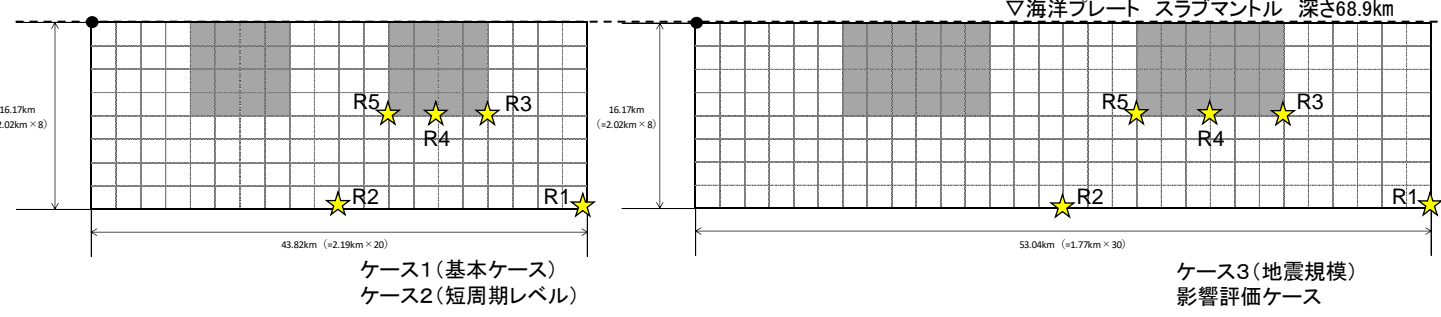
3.16地震反映

➤ 敷地下方DC型地震の断層モデルを示す。



敷地下方DC型地震 断層配置図

敷地下方DC型地震
各ケースの地震規模と等価震源距離



敷地下方DC型地震 展開図

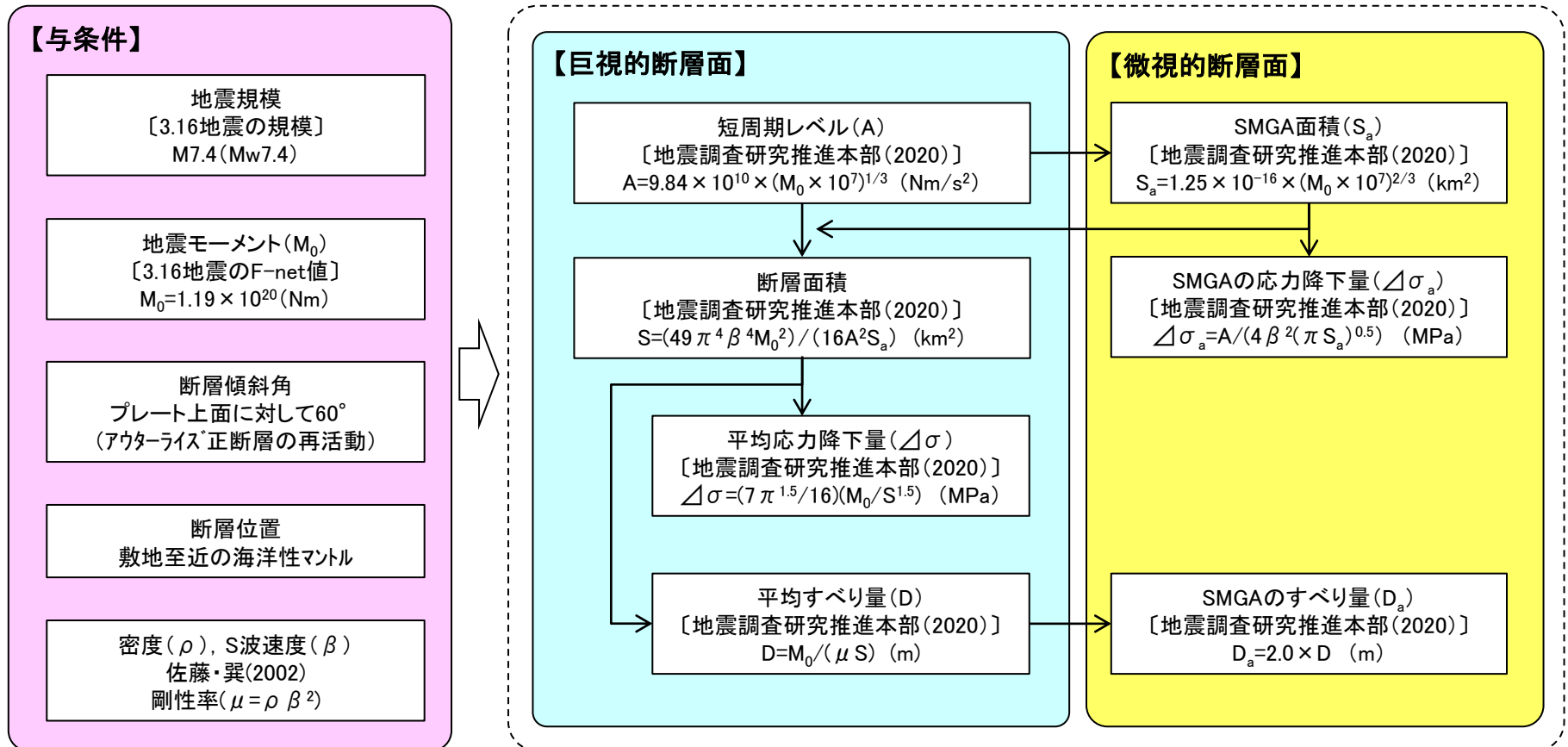
	地震規模	等価震源距離
ケース1	M7.4	83(km)
ケース2		
ケース3	M7.5	84(km)
影響評価ケース		

R:破壊開始点
■:強震動生成域(SMGA)

4.2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震 (2)断層パラメータ 設定フロー①

3.16地震反映

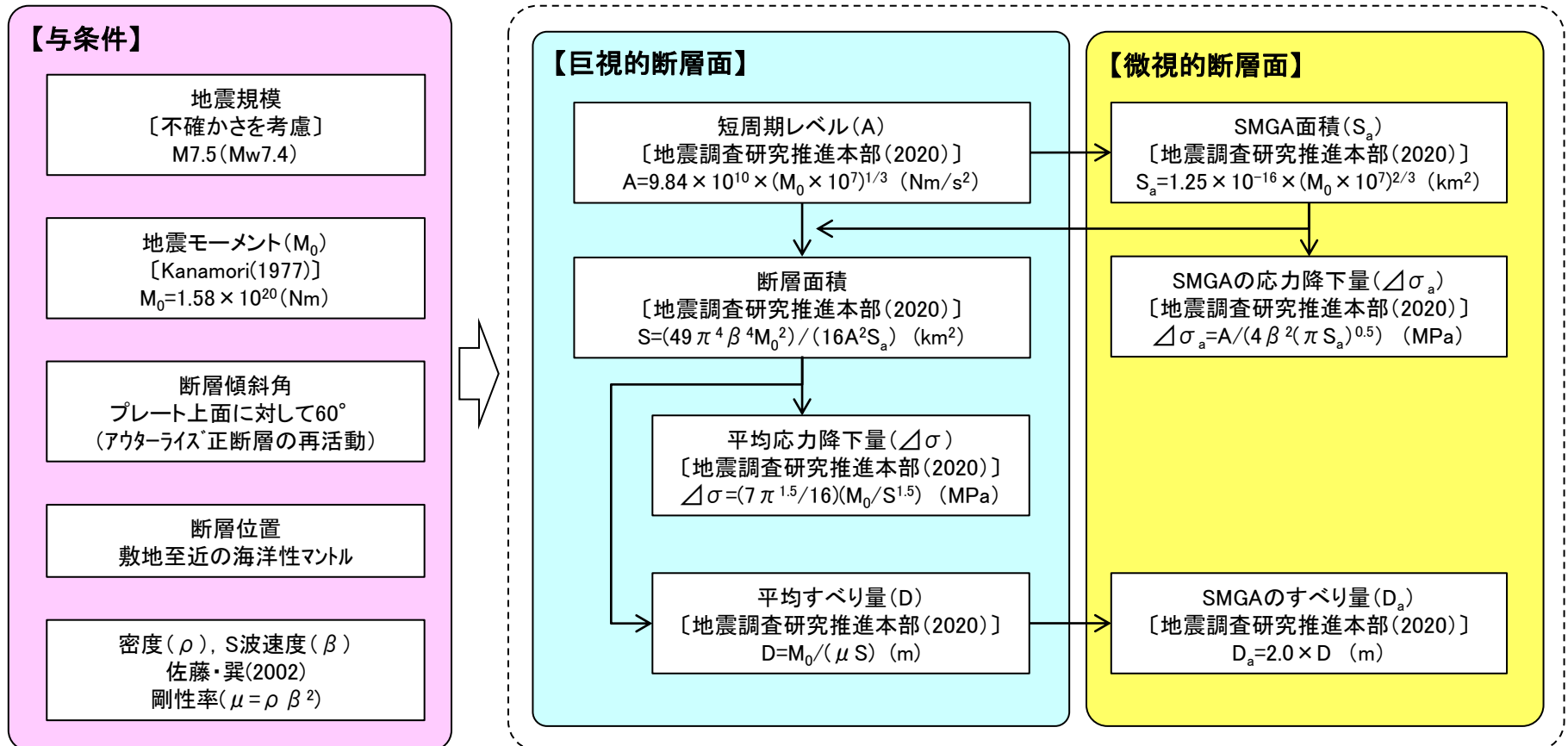
- 敷地下方DC型地震[基本ケース及びケース2(短周期レベルの不確かさ)]の断層パラメータ設定フローを示す。
- 地震規模及び地震モーメントは、東北地方の上面で発生した最大規模である3.16地震(M7.4)の値を用いる。
- 設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



※:ケース2(短周期レベルの不確かさ)では、A及び $\Delta\sigma_a$ を1.5倍にする。

4.2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震 (2)断層パラメータ 設定フロー②

- 敷地下方DC型地震[ケース3(地震規模の不確かさ)及び影響評価ケース]の断層パラメータ設定フローを示す。
- 地震規模は, 4.7地震及びその知見を踏まえM7.5(Mw7.4)とし, 地震モーメントは, 不確かさを考慮した地震規模から算定する。
- 設定は, 地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



※:影響評価ケースでは, A及び $\Delta\sigma_a$ を1.5倍にする。

4.2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震 (2)断層パラメータ

3.16地震反映

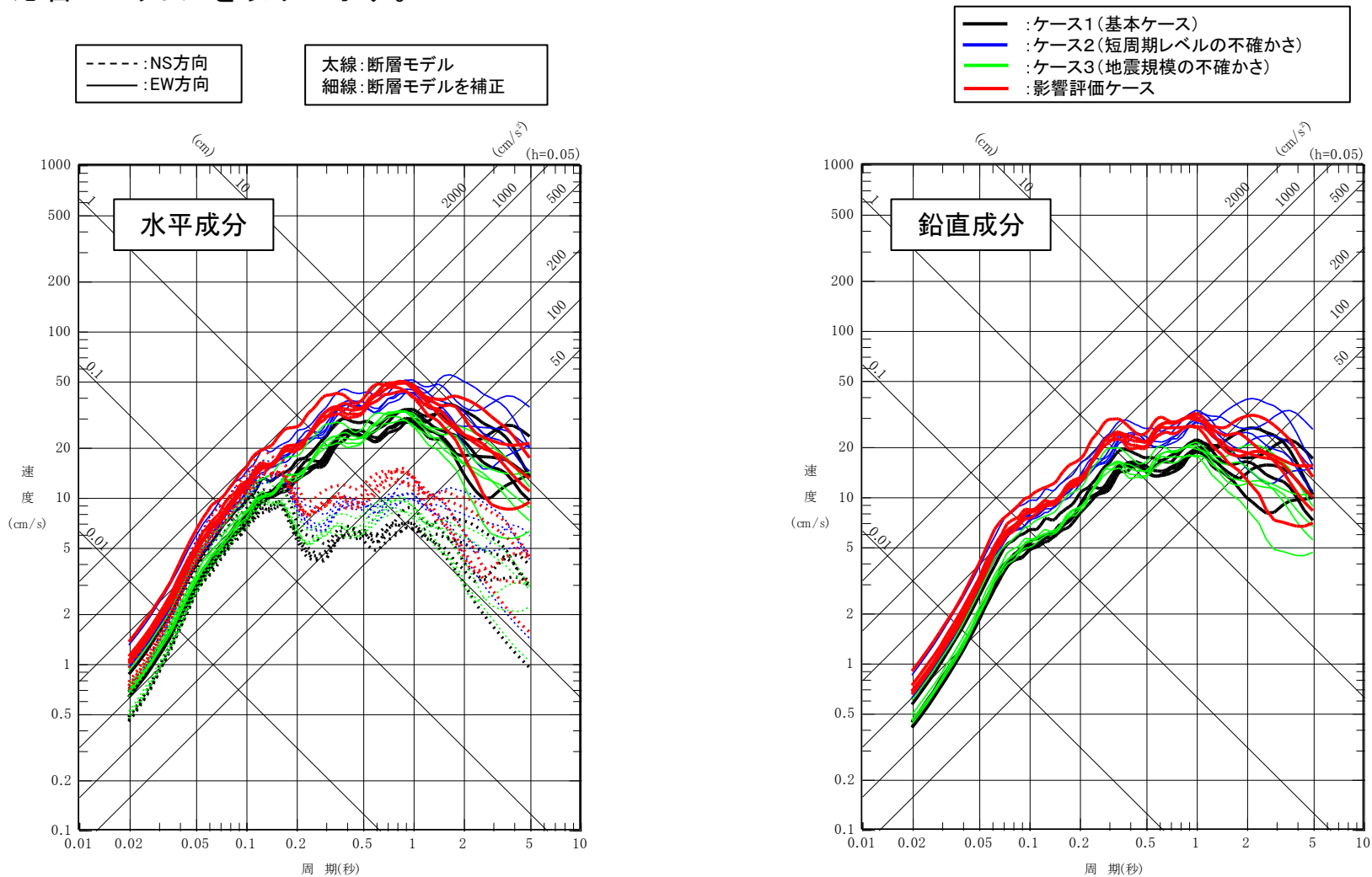
➤ 敷地下方DC型地震の各ケースの断層パラメータを以下に示す。

断層パラメータ		記号	単位	設定方法	ケース1 (基本)	ケース2 (短周期レベル)	ケース3 (地震規模)	影響評価ケース
巨視的断層面	地震規模(モーメントマグニチュード)	(Mw)	—	3.16地震の規模, 4.7地震の知見に基づく規模	7.4(7.4)	←	7.5(7.4)	←
	走向	θ	°	海溝軸を考慮	0	←	←	←
	断層傾斜角	δ	°	海洋プレート上面に対し60°	32	←	←	←
	断層長さ	L	km	断層面積より設定	43.82	←	53.04	←
	断層幅	W	km	断層面積より設定	16.17	←	←	←
	断層面積	S	km ²	$S=(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16A^2S_a)$	709	←	858	←
	断層上端深さ	—	km	海洋プレートの沈み込みを考慮	68.9	←	←	←
	地震モーメント	M_0	Nm	3.16地震のF-net, $M_0=10^{(1.5M_w+9.1)}$	1.19×10^{20}	←	1.58×10^{20}	←
	剛性率	μ	N/m ²	$\mu = \rho \beta^2$	4.80×10^{10}	←	←	←
	密度	ρ	g/cm ³	佐藤・巽(2002)	3.0	←	←	←
	S波速度	β	km/s ²	佐藤・巽(2002)	4.0	←	←	←
	平均すべり量	D	m	$D=M_0/(\mu S)$	3.50	←	3.85	←
	平均応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.37	←	←	←
	破壊伝播速度	V_r	km/s	$V_r=0.72\beta$ [Geller(1976)]	2.88	←	←	←
	短周期レベル	A	Nm/s ²	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	1.04×10^{20}	1.56×10^{20}	1.15×10^{20}	1.72×10^{20}
高周波遮断周波数	f_{max}	Hz	2008年岩手県沿岸北部の地震シミュレーション	18	←	←	←	
SMGA	地震モーメント	M_{0a}	Nm	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	4.71×10^{19}	←	6.28×10^{19}	←
	面積	S_a	km ²	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	140	←	170	←
	平均すべり量	D_a	m	$D_a=2D$	7.00	←	7.70	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$	MPa	$\Delta\sigma_a=A/(4\beta^2(\pi S_a)^{0.5})$	77.6	116.4	77.6	116.4
各SMGA	地震モーメント	M_{0ai}	Nm	$M_{0ai}=M_{0a}/n$, n:SMGAの個数	2.36×10^{19}	←	3.14×10^{19}	←
	面積	S_{ai}	km ²	$S_{ai}=S_a/n$, n:SMGAの個数	70	←	85	←
	平均すべり量	D_{ai}	m	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	7.00	←	7.70	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_{ai}$	MPa	$\Delta\sigma_{ai}=\Delta\sigma_a$	77.6	←	77.6	116.4
背景領域	地震モーメント	M_{0b}	Nm	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	7.19×10^{19}	←	9.57×10^{19}	←
	面積	S_b	km ²	$S_b=S-S_a$	568	←	688	←
	平均すべり量	D_b	m	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	2.63	←	2.90	←
	実効応力	$\Delta\sigma_b$	MPa	$\Delta\sigma_b=(D_b/W_b)/(D_a/W_a)\Delta\sigma_a$	14.6	21.9	14.6	21.9
Q値	Q	—	佐藤・巽(2002)	$114^{0.92}$	←	←	←	

4.2 二重深発地震上面の地震(東北) 敷地下方DC型地震 (3) 検討対象地震の地震動評価

3.16地震反映

➤ 敷地下方DC型地震について、断層モデルによる複数の合成波から求めた各ケース(破壊開始点ごと)の平均応答スペクトルを以下に示す。



敷地下方DC型地震(検討対象地震)の地震動評価(平均応答スペクトル)

4.3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震 (1) 基本ケース及び不確かさの想定

- 東通原子力発電所周辺では、規模の大きな下面の地震は知られておらず、発生場所を示す低速度域も知られていないものの、海洋プレート内地震の下面の地震として「敷地下方DE型地震」を想定する。
- 基本ケースは、東北地方のDE型地震の最大規模である2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)の地震規模とし、敷地至近の海洋プレート下面に想定する。断層傾斜角は、アウターライズで生成した正断層の再活動を考慮し、海洋プレートの境界面に対して60°とする。
- 破壊開始点は、破壊が敷地に向かう位置に、敷地と断層の位置関係を考慮して設定する。
- 東北地方で発生した二重深発地震下面の地震としては最大規模の2008年岩手県沿岸北部の地震の短周期レベルを不確かさとして考慮する。また、北海道で発生した1993年釧路沖地震を踏まえ地震規模の不確かさを考慮する。
- 敷地において適切な観測記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法[釜江ほか(1991)及び入倉ほか(1997)]を用いた地震動評価を行う。

検討対象地震の想定〔二重深発地震下面の地震(敷地下方DE型地震)〕

	タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベル※1 (A)	備考
ケース1 (基本ケース)	DE型	M6.8	敷地至近 (応力中立面)	断層上端 中央	1.0As	・2008年岩手県沿岸北部の地震のMを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトル
ケース2 (短周期レベル)	DE型	M6.8	敷地至近 (応力中立面)	断層上端 中央	1.6As	・2008年岩手県沿岸北部の地震のM ₀ -Aを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトルを補正
ケース3 (地震規模)	DE型	M7.5	敷地至近 (応力中立面)	断層上端 均等	1.0As	・1993年釧路沖地震を踏まえM7.5 ・断層モデルの平均応答スペクトルを補正
影響評価ケース	DE型	M7.5	敷地至近 (応力中立面)	断層上端 均等	1.6As	・断層モデルの平均応答スペクトル

※1:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

■ :考慮する不確かさ □ :あらかじめモデルに織り込む不確かさ

↑ 短周期レベルの不確かさに反映

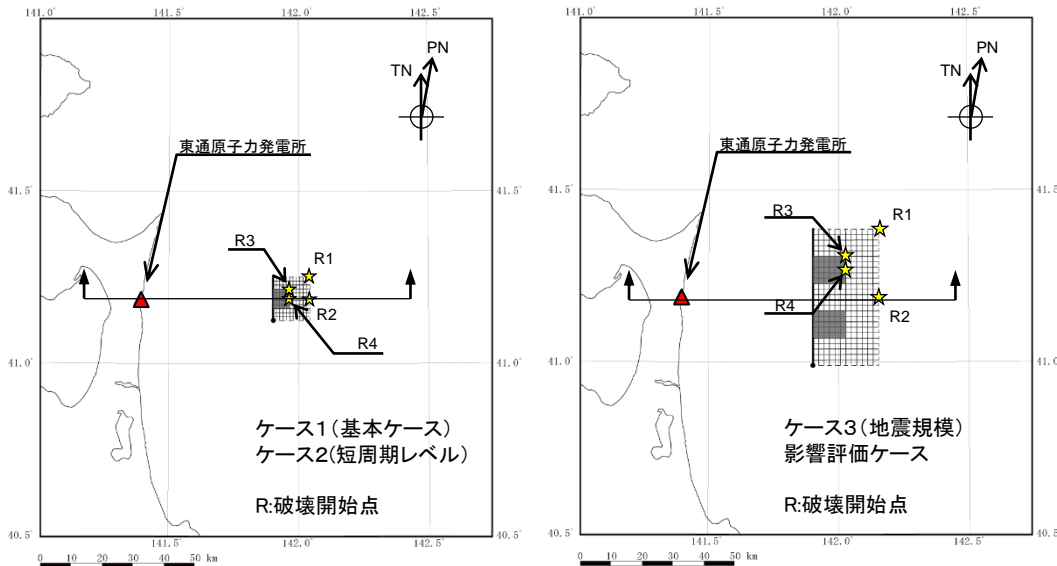
2008年岩手県沿岸北部の地震の地震調査研究推進本部(2020)に対する短周期レベルの倍率

	①佐藤(2013)	②地震調査研究推進本部(2020)※2	①/②
短周期レベル(A) (Nm/s ²)	8.96 × 10 ¹⁹	5.47 × 10 ¹⁹	1.6

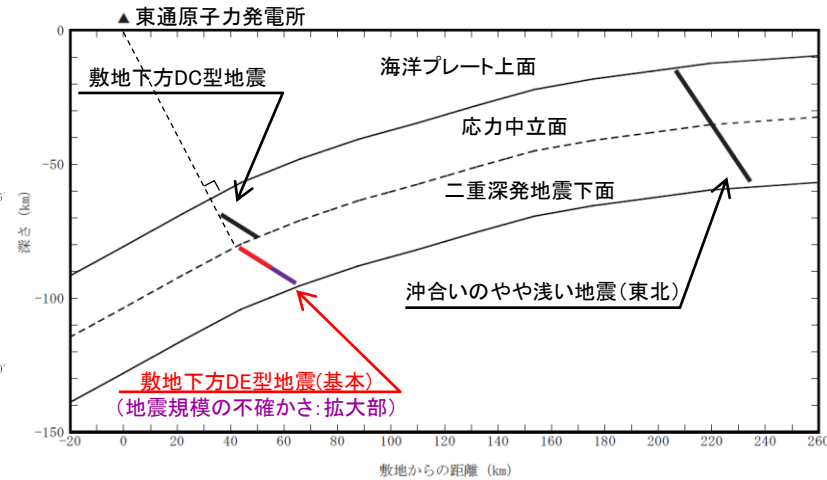
※2:F-netによる地震モーメント[1.72 × 10¹⁹(Nm)]より算定

4.3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震 (1) 基本ケース及び不確かさの想定 断層モデル

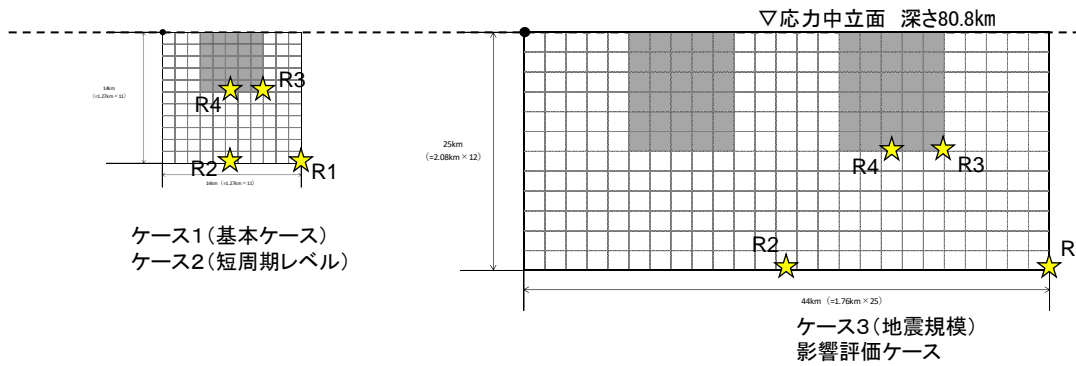
➤ 敷地下方DE型地震の断層モデルを示す。



敷地下方DE型地震 断層配置図



敷地下方DE型地震 断層配置図(断面)



敷地下方DE型地震 展開図

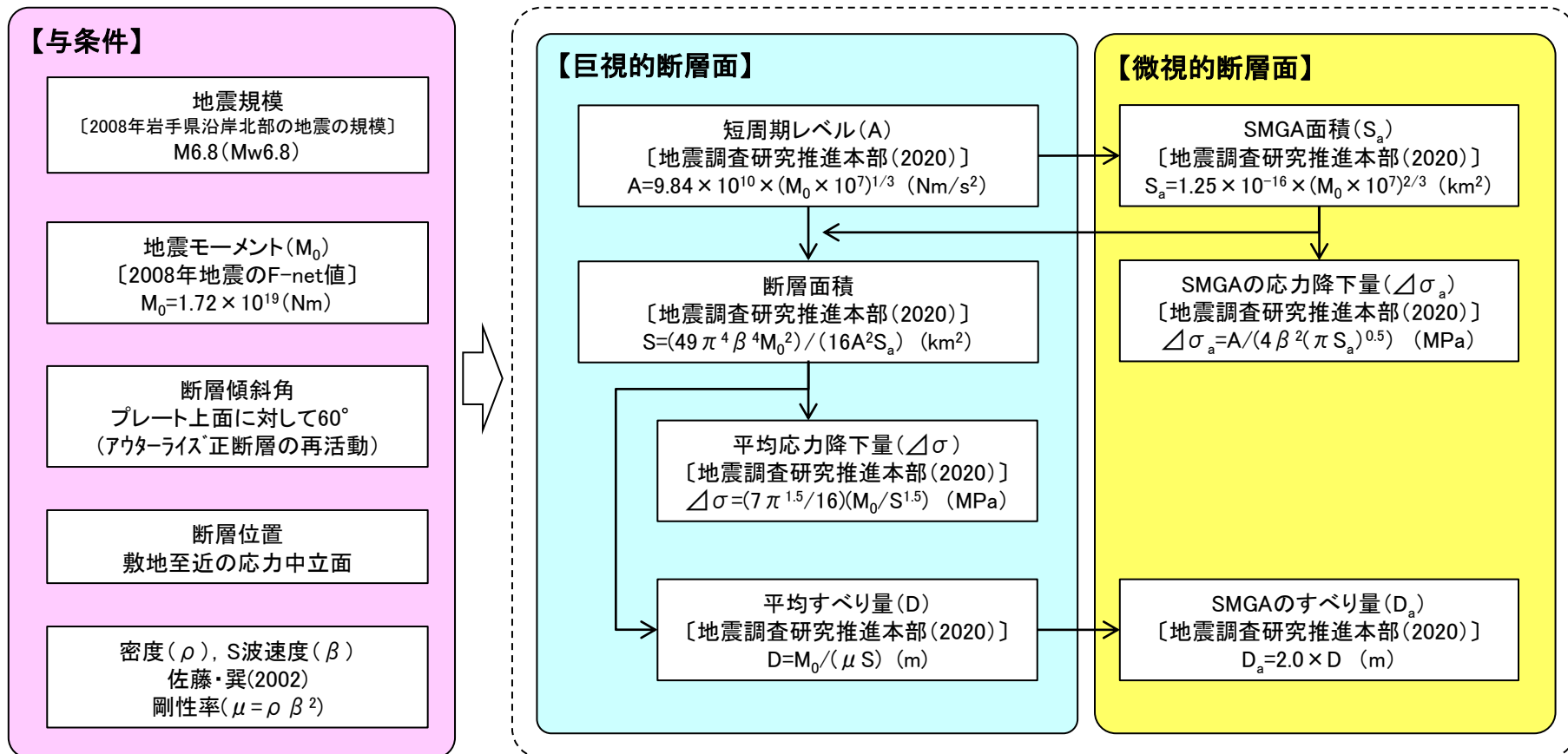
R:破壊開始点
■: 強震動生成域 (SMGA)

敷地下方DE型地震
各ケースの地震規模と等価震源距離

	地震規模	等価震源距離
ケース1	M6.8	95 (km)
ケース2		
ケース3	M7.5	99 (km)
影響評価 ケース		

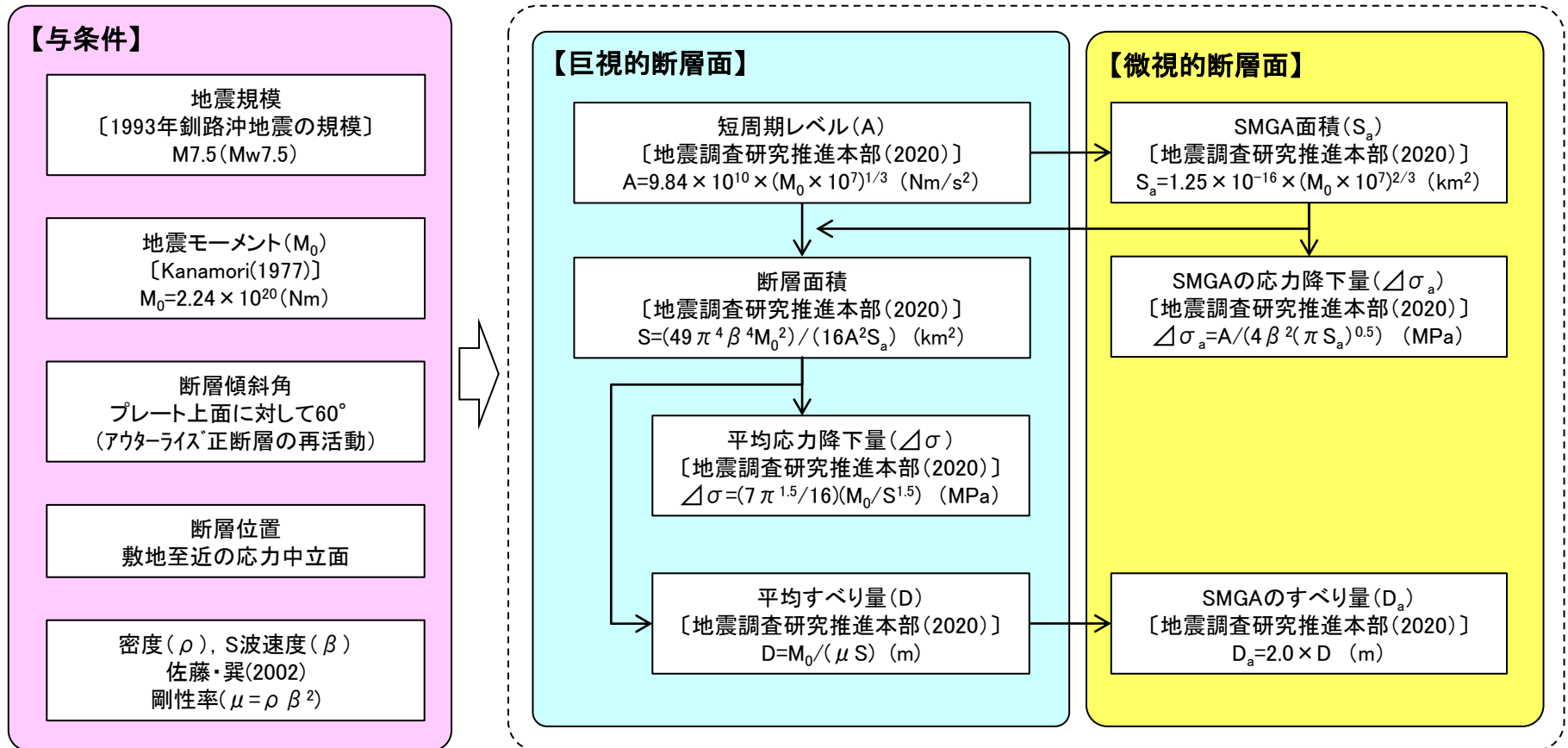
4.3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震 (2)断層パラメータ 設定フロー①

- 敷地下方DE型地震〔基本ケース及びケース2(短周期レベルの不確かさ)〕の断層パラメータ設定フローを示す。
- 地震規模及び地震モーメントは、東北地方で発生した最大規模である2008年岩手県沿岸北部の地震の値を用いる。
- 設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



4.3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震 (2)断層パラメータ 設定フロー②

- 敷地下方DE型地震[ケース3(地震規模の不確かさ)及び影響評価ケース]の断層パラメータ設定フローを示す。
- 地震モーメントは、不確かさを考慮した地震規模から算定する。
- 設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



※:影響評価ケースでは、A及び $\Delta\sigma_a$ を1.6倍にする。

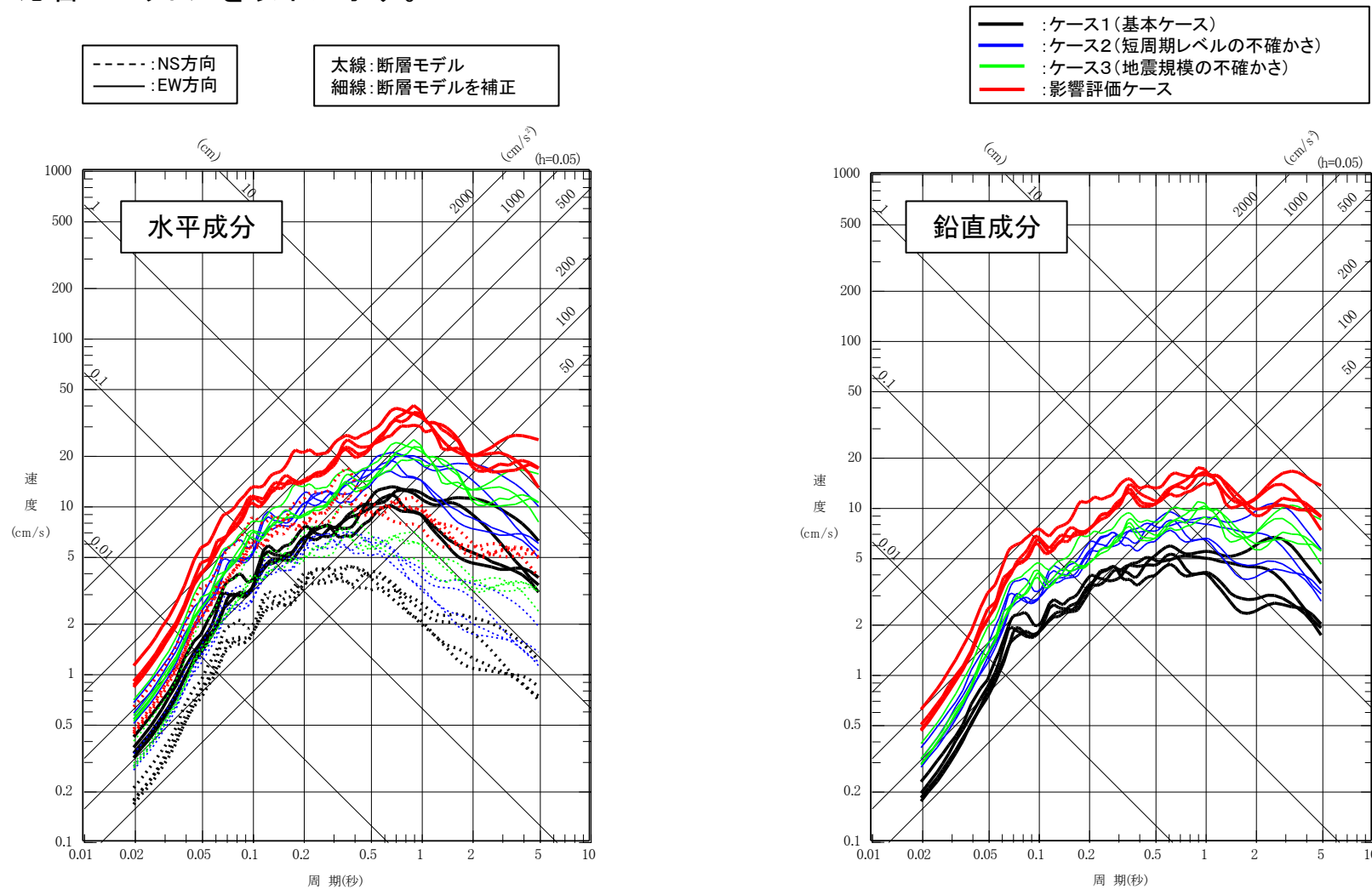
4.3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震 (2)断層パラメータ

➤ 敷地下方DE型地震の各ケースの断層パラメータを以下に示す。

断層パラメータ	記号	単位	設定方法	ケース1 (基本)	ケース2 (短周期レベル)	ケース3 (地震規模)	影響評価ケース	
巨視的断層面	地震規模(モーメントマグニチュード)	(Mw)	—	2008年地震, 1993年釧路沖地震の地震規模	6.8(6.8)	←	7.5(7.5)	←
	走向	θ	°	海溝軸を考慮	0	←	←	←
	断層傾斜角	δ	°	海洋プレート上面に対し60°	32	←	←	←
	断層長さ	L	km	断層面積より設定	14.0	←	44	←
	断層幅	W	km	断層面積より設定	14.0	←	25	←
	断層面積	S	km ²	$S=(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16A^2S_a)$	195	←	1080	←
	断層上端深さ	—	km	海洋プレートの沈み込みを考慮	80.8	←	←	←
	地震モーメント	M_0	Nm	2008年地震のF-net, $M_0=10^{(1.5M_w+9.1)}$	1.72×10^{19}	←	2.24×10^{20}	←
	剛性率	μ	N/m ²	$\mu = \rho \beta^2$	4.80×10^{10}	←	←	←
	密度	ρ	g/cm ³	佐藤・巽(2002)	3.0	←	←	←
	S波速度	β	km/s ²	佐藤・巽(2002)	4.0	←	←	←
	平均すべり量	D	m	$D=M_0/(\mu S)$	1.84	←	4.32	←
	平均応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.37	←	←	←
	破壊伝播速度	V_r	km/s	$V_r=0.72\beta$ [Geller(1976)]	2.88	←	←	←
	短周期レベル	A	Nm/s ²	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	5.47×10^{19}	8.76×10^{19}	1.29×10^{20}	2.06×10^{20}
高周波遮断周波数	f_{max}	Hz	2008年岩手県沿岸北部の地震シミュレーション	18	←	←	←	
S M G A	地震モーメント	M_{0a}	Nm	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	6.81×10^{18}	←	8.87×10^{19}	←
	面積	S_a	km ²	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	39	←	214	←
	平均すべり量	D_a	m	$D_a=2D$	3.67	←	8.64	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$	MPa	$\Delta\sigma_a=A/(4\beta^2(\pi S_a)^{0.5})$	77.6	124.1	77.6	124.1
各 S M G A	地震モーメント	M_{0ai}	Nm	$M_{0ai}=M_{0a}/n$, n:SMGAの個数	(空白)	(空白)	4.44×10^{19}	←
	面積	S_{ai}	km ²	$S_{ai}=S_a/n$, n:SMGAの個数	(空白)	(空白)	107	←
	平均すべり量	D_{ai}	m	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	(空白)	(空白)	8.64	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_{ai}$	MPa	$\Delta\sigma_{ai}=\Delta\sigma_a$	(空白)	(空白)	77.6	124.1
背景領域	地震モーメント	M_{0b}	Nm	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	1.04×10^{19}	←	1.35×10^{20}	←
	面積	S_b	km ²	$S_b=S-S_a$	156	←	866	←
	平均すべり量	D_b	m	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	1.38	←	3.25	←
	実効応力	$\Delta\sigma_b$	MPa	$\Delta\sigma_b=(D_b/W_b)/(D_a/W_a)\Delta\sigma_a$	13.3	21.3	14.6	23.4
Q値	Q	—	佐藤・巽(2002)	$114^{FD.92}$	←	←	←	

4.3 二重深発地震下面の地震(東北) 敷地下方DE型地震 (3) 検討対象地震の地震動評価

➤ 敷地下方DE型地震について、断層モデルによる複数の合成波から求めた各ケース(破壊開始点ごと)の平均応答スペクトルを以下に示す。



敷地下方DE型地震(検討対象地震)の地震動評価(平均応答スペクトル)

4.4 沖合いのやや浅い地震(東北)

(1) 基本ケース及び不確かさの想定

- ▶ 東北地方では、規模の大きなやや浅い地震は知られていないものの、敷地前面に「**沖合いのやや浅い地震(東北)**」を想定する。
- ▶ 基本ケースとしては、東北地方で発生した沖合のやや浅い地震である2011年7月10日三陸沖の地震のM7.3を敷地前面の同じ深さに想定する。不確かさケースとしては、東通原子力発電所が立地する領域とは異なるものの、北海道(千島弧)で発生した1994年北海道東方沖地震のM8.2を考慮し、2011年7月10日三陸沖の地震の震源深さが断層中央(応力中立面)となるよう想定する。
- ▶ 断層傾斜角は、アウターライズで生成した正断層の再活動を考慮し、海洋プレートの境界面に対して60°とする。
- ▶ 破壊開始点は、破壊が敷地に向かう位置に、敷地と断層の位置関係を考慮して設定する。
- ▶ 基本ケースの短周期レベルは、2011年7月10日三陸沖の地震の短周期レベルを参考に設定する。さらに、同地震の短周期レベルは地震調査研究推進本部(2020)と比べて小さいことから、地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを不確かさとして考慮する。
- ▶ 地震動評価は、基本ケース(M7.3)は2011年7月10日三陸沖の地震の敷地で観測された記録の距離補正によって、不確かさケース(M8.2)については、統計的グリーン関数法[釜江ほか(1991)及び入倉ほか(1997)]を用いた地震動評価を行う。

検討対象地震の想定[**沖合いのやや浅い地震(東北)**]

	タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベル※1 (A)	備考
ケース1 (基本ケース)	逆断層	M7.3	敷地前面 (海溝西側)	断層中央	0.6As	・東北地方で最大規模の2011年7月10日三陸沖の地震のMと震源深さ及びM ₀ -Aを考慮 ・観測記録の距離補正により評価
ケース2 (地震規模)	逆断層	M8.2	敷地前面 (海溝西側)	断層中央	0.6As	・1994年北海道東方沖地震のMを考慮 ・2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)の震源深さ及びM ₀ -Aを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトルを補正
影響評価ケース	逆断層	M8.2	敷地前面 (海溝西側)	断層中央	1.0As	・地震調査研究推進本部(2020)のM ₀ -Aを保守的に設定 ・断層モデルの平均応答スペクトル

※1: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

■ : 考慮する不確かさ □ : あらかじめモデルに織り込む不確かさ

2011年7月10日三陸沖の地震の地震調査研究推進本部(2020)に対する短周期レベルの倍率

↑
2011年7月10日三陸沖の地震の短周期レベルは、地震調査研究推進本部(2020)と比べて小さいことから、不確かさとして保守性を考慮

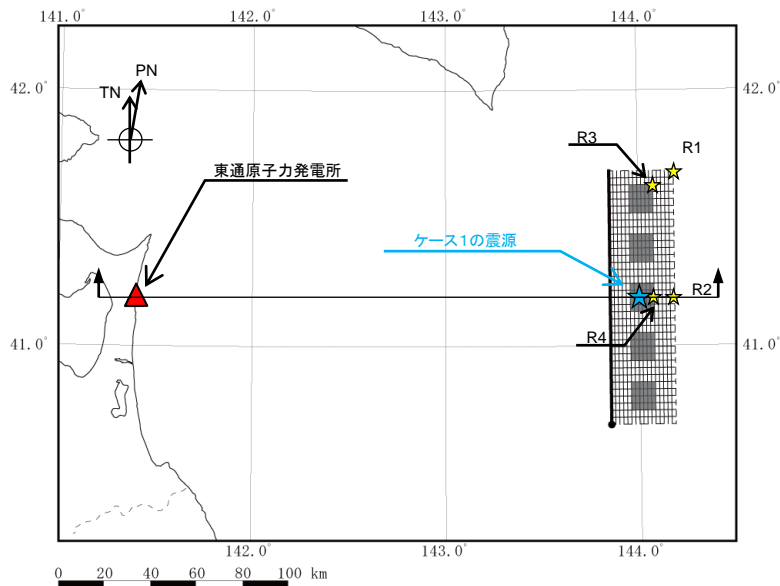
	①スペクトルインバージョン※2	②地震調査研究推進本部(2020)※3	①/②
短周期レベル(A) (Nm/s ²)	3.95 × 10 ¹⁹	7.10 × 10 ¹⁹	0.6

※2: 補足説明資料1章3を参照

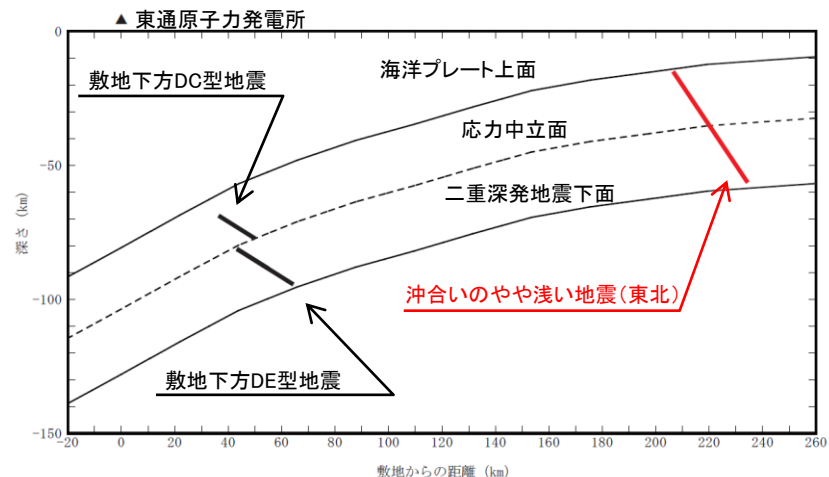
※3: F-netによる地震モーメント[3.75 × 10¹⁹(Nm)]より算定

4.4 沖合いのやや浅い地震(東北) (1) 不確かさケースの断層モデル

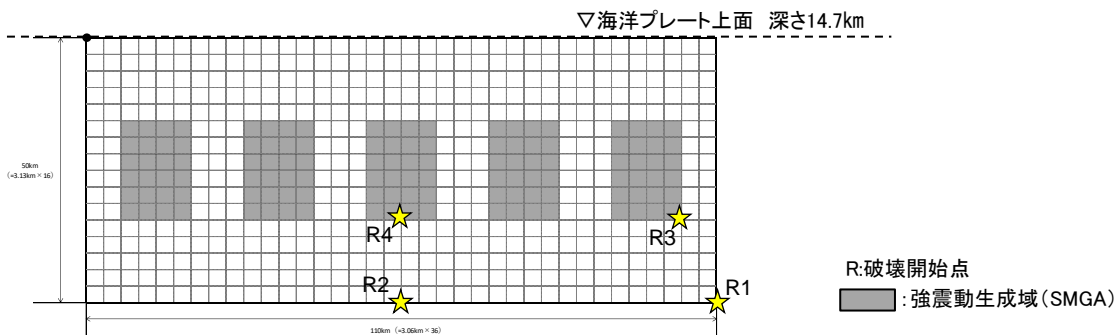
➤ 沖合いのやや浅い地震(東北)の断層モデルを示す。



沖合いのやや浅い地震(東北) 断層配置図 R:破壊開始点



沖合いのやや浅い地震(東北) 断層配置図(断面)



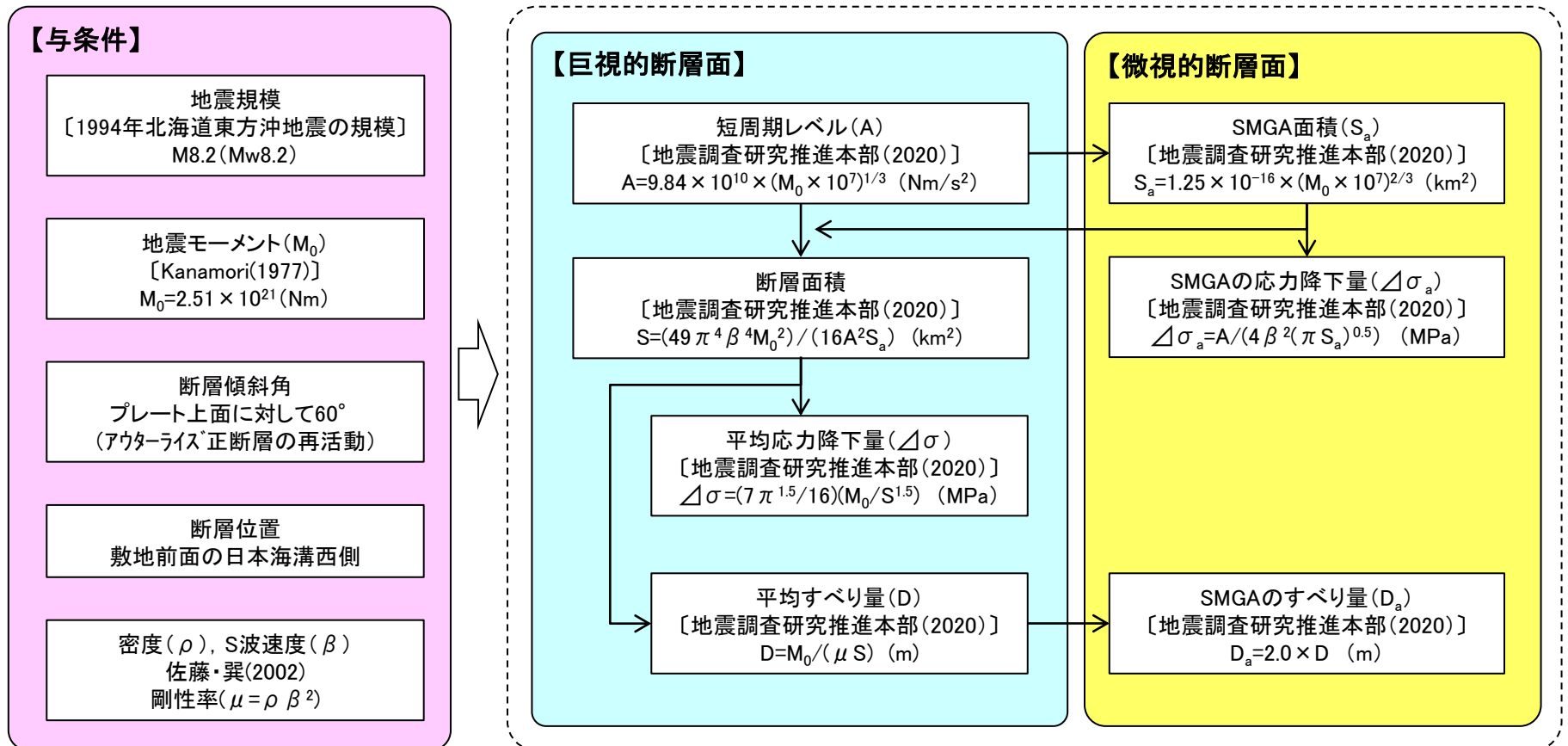
沖合いのやや浅い地震(東北) 展開図 ケース2及び影響評価ケース

沖合いのやや浅い地震(東北)
各ケースの地震規模と等価震源距離

	地震規模	等価震源距離
ケース1	M7.3	226 (km)
ケース2	M8.2	226 (km)
影響評価 ケース		

4.4 沖合いのやや浅い地震(東北) (2)断層パラメータ 設定フロー

- ▶ 沖合いのやや浅い地震(東北)[ケース2(地震規模)及び影響評価ケース]の断層パラメータ設定フローを示す。
- ▶ 地震モーメントは、不確かさを考慮した地震規模から算定する。設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



※:ケース2(地震規模)では、A及び $\Delta\sigma_a$ を0.6倍にする。

4.4 沖合いのやや浅い地震(東北) (2)断層パラメータ

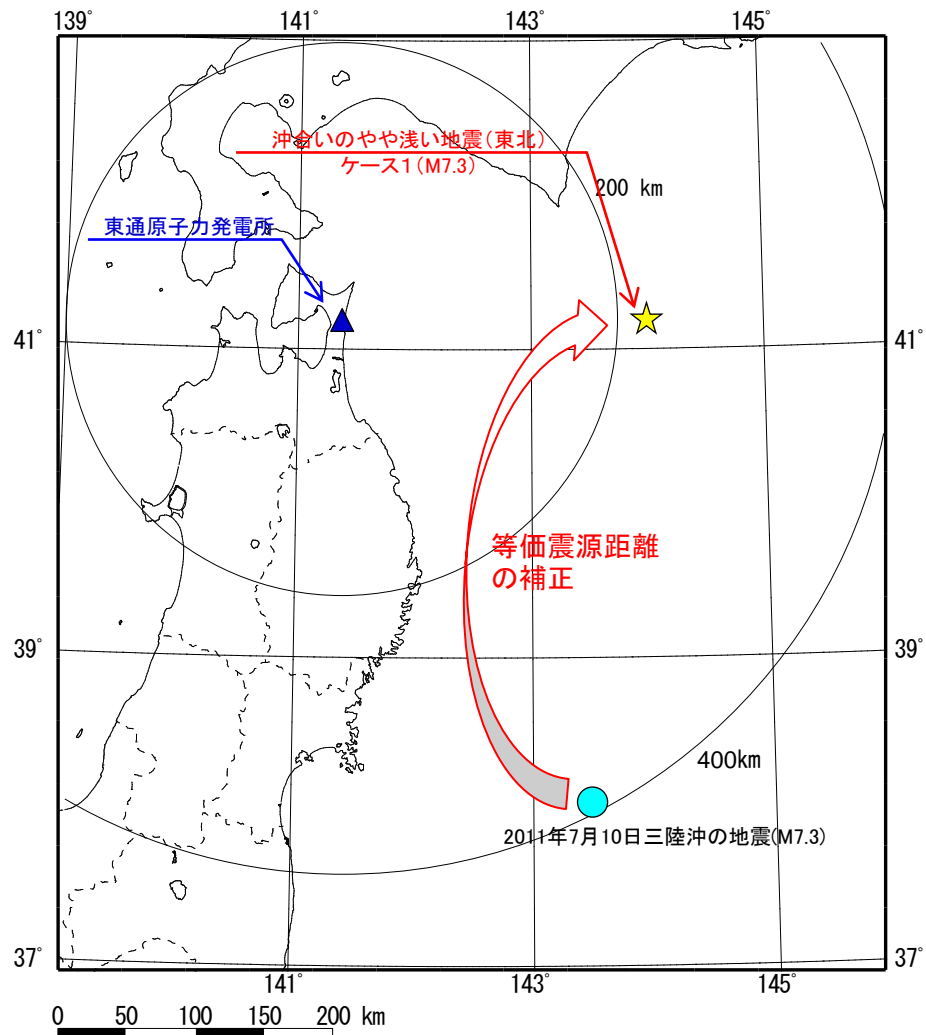
➤ 沖合いのやや浅い地震(東北)の断層パラメータを以下に示す。

断層パラメータ		記号	単位	設定方法	ケース2 (地震規模)	影響評価ケース
巨視的断層面	地震規模(モーメントマグニチュード)	(Mw)	—	1994年北海道東方沖地震の地震規模	8.2(8.2)	←
	走向	θ	°	海溝軸を考慮	0	←
	断層傾斜角	δ	°	海洋プレート上面に対し60°	56	←
	断層長さ	L	km	断層面積より設定	110.0	←
	断層幅	W	km	断層面積より設定	50.0	←
	断層面積	S	km ²	$S=(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16A^2S_a)$	5412	←
	断層上端深さ	—	km	2011年7月10日三陸沖の地震を考慮	14.7	←
	地震モーメント	M_0	Nm	$M_0=10^{(1.5Mw+9.1)}$	2.51×10^{21}	←
	剛性率	μ	N/m ²	$\mu = \rho \beta^2$	4.80×10^{10}	←
	密度	ρ	g/cm ³	佐藤・巽(2002)	3.0	←
	S波速度	β	km/s ²	佐藤・巽(2002)	4.0	←
	平均すべり量	D	m	$D=M_0/(\mu S)$	9.67	←
	平均応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.37	←
	破壊伝播速度	V_r	km/s	$V_r=0.72\beta$ [Geller(1976)]	2.88	←
短周期レベル	A	Nm/s ²	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	1.73×10^{20}	2.88×10^{20}	
高周波遮断周波数	f_{max}	Hz	2008年岩手県沿岸北部の地震シミュレーション	18	←	
SMGA	地震モーメント	M_{0a}	Nm	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	9.95×10^{20}	←
	面積	S_a	km ²	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	1072	←
	平均すべり量	D_a	m	$D_a=2D$	19.34	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$	MPa	$\Delta\sigma_a=A/(4\beta^2(\pi S_a)^{0.5})$	46.6	77.6
各SMGA	地震モーメント	M_{0ai}	Nm	$M_{0ai}=M_{0a}/n$, n:SMGAの個数	1.99×10^{20}	←
	面積	S_{ai}	km ²	$S_{ai}=S_a/n$, n:SMGAの個数	214	←
	平均すべり量	D_{ai}	m	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	19.34	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_{ai}$	MPa	$\Delta\sigma_{ai}=\Delta\sigma_a$	46.6	77.6
背景領域	地震モーメント	M_{0b}	Nm	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	1.52×10^{21}	←
	面積	S_b	km ²	$S_b=S-S_a$	4340	←
	平均すべり量	D_b	m	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	7.28	←
	実効応力	$\Delta\sigma_b$	MPa	$\Delta\sigma_b=(D_b/W_b)/(D_a/W_a)\Delta\sigma_a$	6.6	11.0
Q値		Q	—	佐藤・巽(2002)	$114^{0.92}$	←

4.4 沖合いのやや浅い地震(東北)

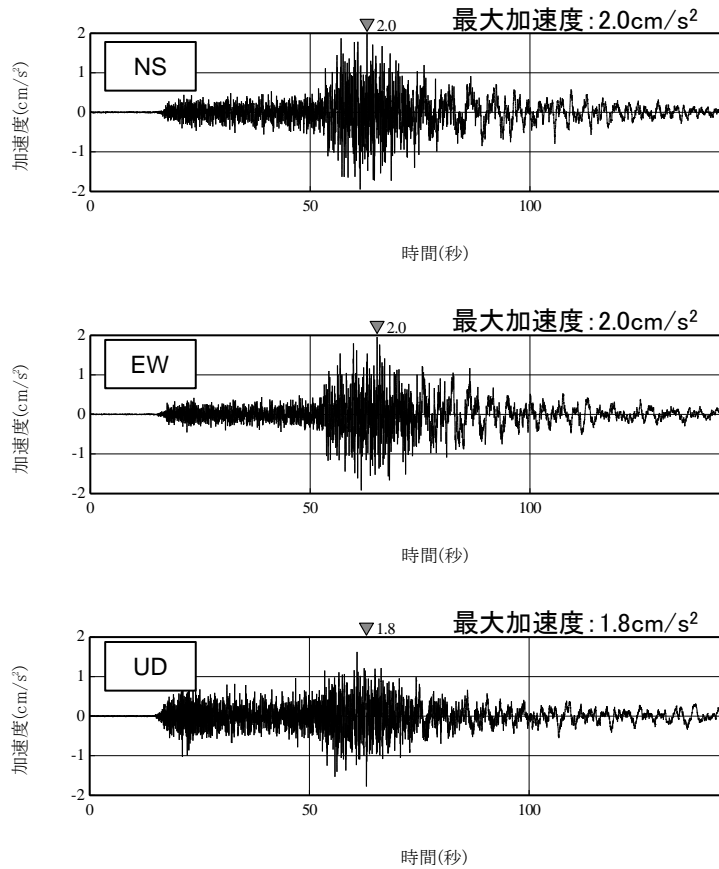
(3) 沖合いのやや浅い地震(東北)と観測地震の震央位置

➤ 沖合いのやや浅い地震(東北)と2011年7月10日三陸沖の地震の震央位置を以下に示す。

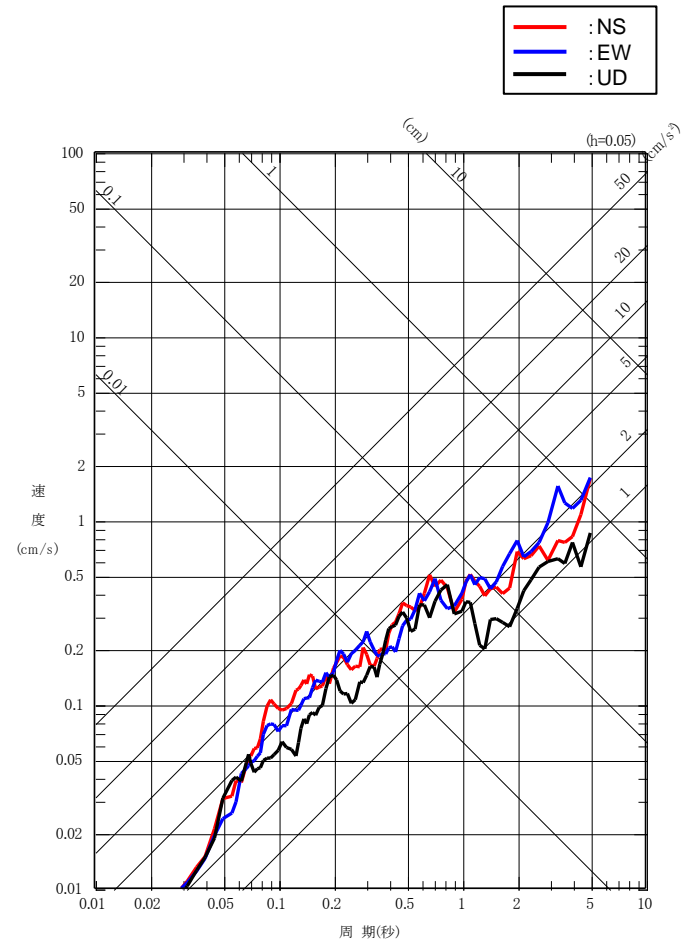


4. 4 沖合いのやや浅い地震(東北) (4)2011年7月10日三陸沖の地震の観測記録

➤ 沖合いのやや浅い地震(東北)の基本ケースの検討に用いる2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)の敷地における観測記録を以下に示す。



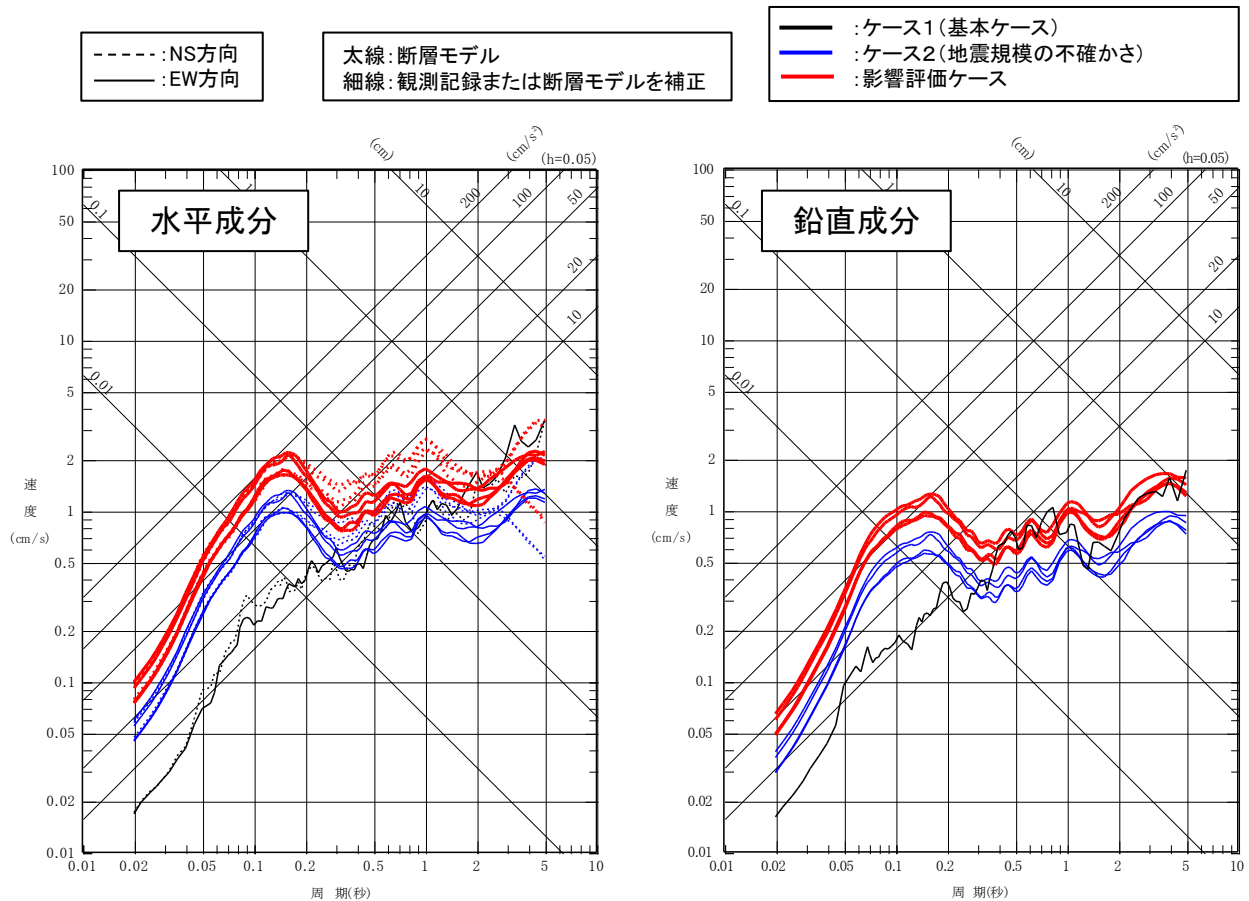
2011年7月10日三陸沖の地震の時刻歴波形
(自由地盤T.P.+2.0m観測点のはぎとり波, PN基準)



2011年7月10日三陸沖の地震の応答スペクトル
(自由地盤T.P.+2.0m観測点のはぎとり波, PN基準)

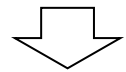
4. 4 沖合いのやや浅い地震(東北) (5) 検討対象地震の地震動評価

- 沖合いのやや浅い地震(東北)の各ケースの地震動評価結果を以下に示す。
- ケース1(基本ケース)は、自由地盤岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)で得られた2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)の観測記録についてNoda et al.(2002)の比率を用いて補正を行った。
- ケース2及び影響評価ケースは、各破壊開始点について、断層モデルによる複数の合成波から平均応答スペクトルを求めた。



観測記録の補正

【観測地震】	
2011年7月10日三陸沖の地震	
地震規模	M7.3
等価震源距離	396(km)



ケース1(基本ケース)	
地震規模	M7.3
等価震源距離	226(km)

※ : 補正した項目

沖合いのやや浅い地震(東北)(検討対象地震)の地震動評価

ケース1(基本ケース)の応答スペクトル=観測記録の応答スペクトル×Noda et al.(2002)の比率

4.5 二重深発地震下面の地震(北海道) 北海道DE型地震 (1) 基本ケース及び不確かさの想定

- 東通原子力発電所の周辺の北海道(千島弧)には、1993年釧路沖地震の震源域にみられる海洋プレート内の低速度域は確認されていないものの、北海道で発生する二重深発地震下面の地震として、「北海道DE型地震」を想定する。
- 基本ケースは、北海道で発生したDE型地震の最大規模である1993年釧路沖地震(M7.5)の地震規模とし、敷地に最も近い千島弧に想定する。震源深さは、1993年釧路沖地震と同じとする。
- 断層傾斜角は、アウターライズで生成した正断層の再活動及び1993年釧路沖地震を考慮する。
- 破壊開始点は、破壊が敷地に向かう位置に設定する。
- Morikawa and Sasatani(2004)及び笹谷ほか(2006)に基づき、1993年釧路沖地震の短周期レベルを不確かさとして考慮する。1993年釧路沖地震は、下面の地震としては東北地方及び北海道の最大であることから、地震規模の不確かさは考慮しない。
- 敷地において適切な観測記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法[釜江ほか(1991)及び入倉ほか(1997)]を用いた地震動評価を行う。

検討対象地震の想定〔北海道 二重深発地震下面の地震(北海道DE型地震)〕

	タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベル※1 (A)	備考
ケース1 (基本ケース)	DE型	M7.5	敷地至近千島弧 (下面)	断層中央	1.0As	・1993年釧路沖地震のM及び震源深さを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトルを補正
ケース2※2 (短周期レベル)	DE型	M7.5	敷地至近千島弧 (下面)	断層中央	2.1As	・1993年釧路沖地震のM ₀ -Aを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトル

※1:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

※2:ケース2は、影響評価ケースと同等の不確かさを考慮。

■ :考慮する不確かさ

■ :あらかじめモデルに織り込む不確かさ

短周期レベルの不確かさに反映

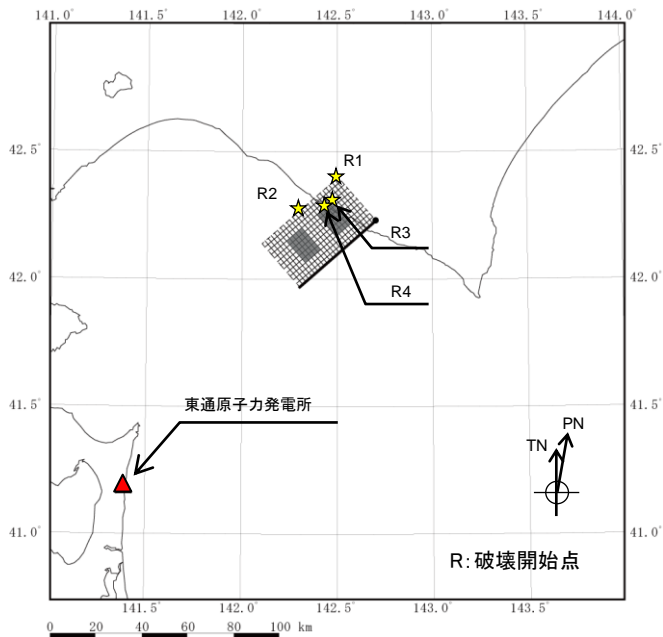
1993年釧路沖地震の地震調査研究推進本部(2020)に対する短周期レベルの倍率

	①Morikawa and Sasatani(2004), 笹谷ほか(2006)	②地震調査研究推進本部(2020)※3	①/②
短周期レベル(A) (Nm/s ²)	3.12 × 10 ²⁰	1.46 × 10 ²⁰	2.1

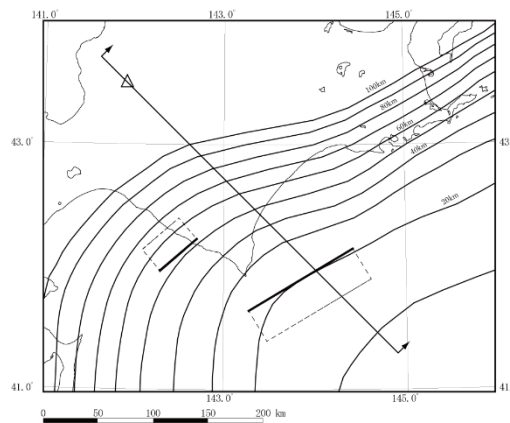
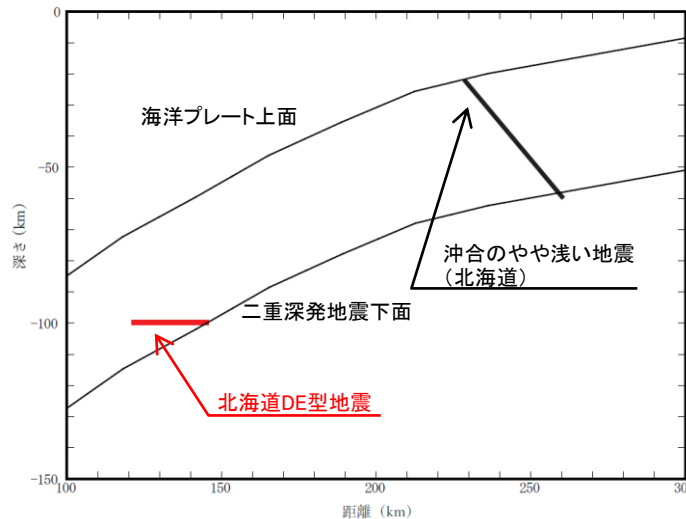
※3: Takeo et al.(1993)による地震モーメント[3.3 × 10²⁰(Nm)]より算定

4.5 二重深発地震下面の地震(北海道) 北海道DE型地震 (1)基本ケース及び不確かさの想定 断層モデル

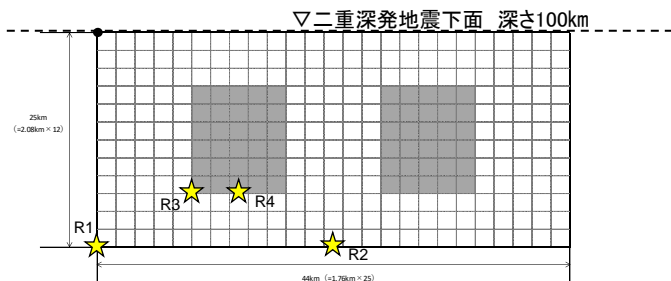
▶ 北海道DE型地震の断層モデルを示す。



北海道DE型地震 断層配置図



北海道DE型地震
断層配置図(断面)



北海道DE型地震 展開図

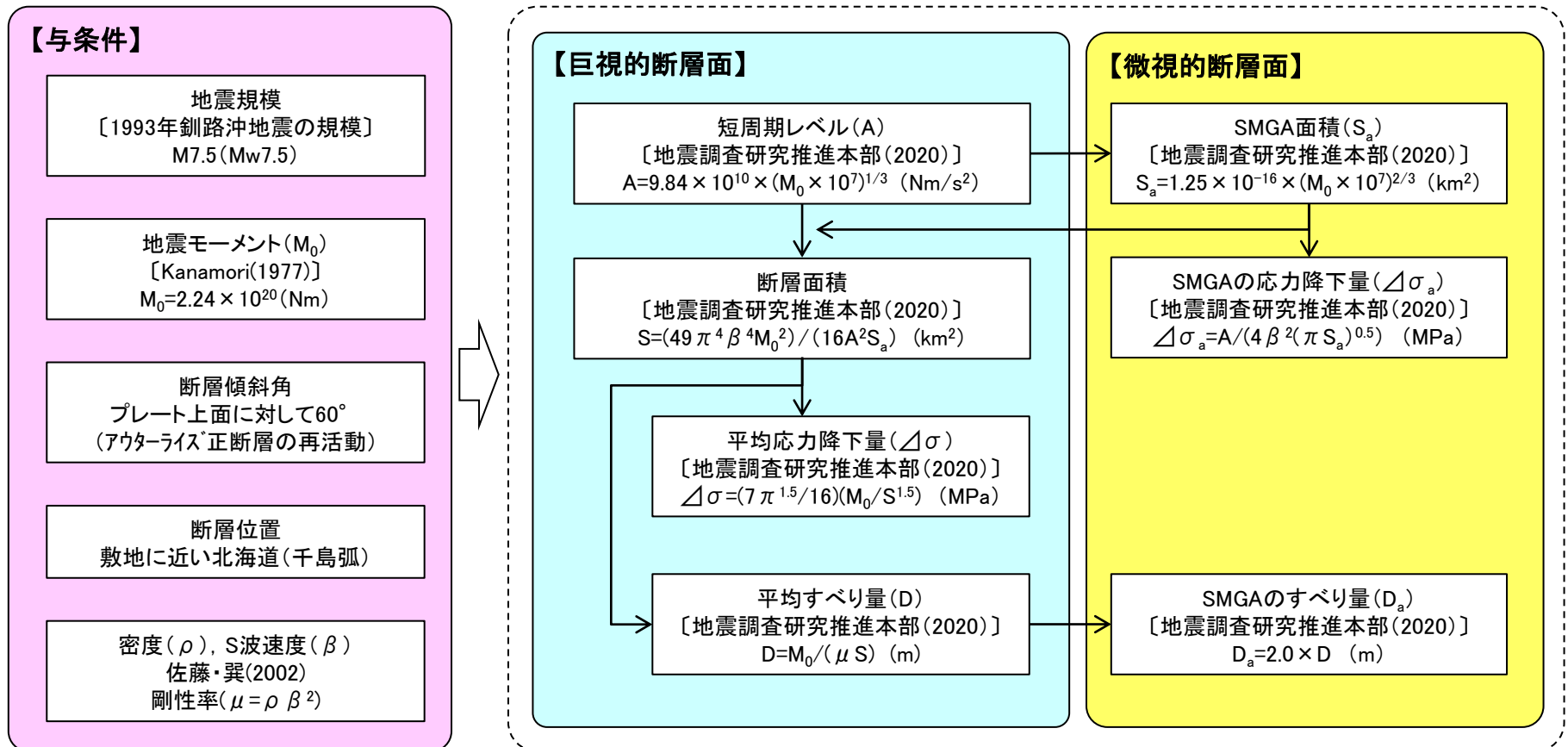
R:破壊開始点
■:強震動生成域(SMGA)

北海道DE型地震
各ケースの地震規模と等価震源距離

	地震規模	等価震源距離
ケース1	M7.5	171 (km)
ケース2		

4.5 二重深発地震下面の地震(北海道) 北海道DE型地震 (2)断層パラメータ 設定フロー

- ▶ 北海道DE型地震〔基本ケース及びケース2(短周期レベルの不確かさ)〕の断層パラメータ設定フローを示す。
- ▶ 設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



※:ケース2(短周期レベル)では、ケース1(基本ケース)のA及び $\Delta\sigma_a$ を2.1倍にする。

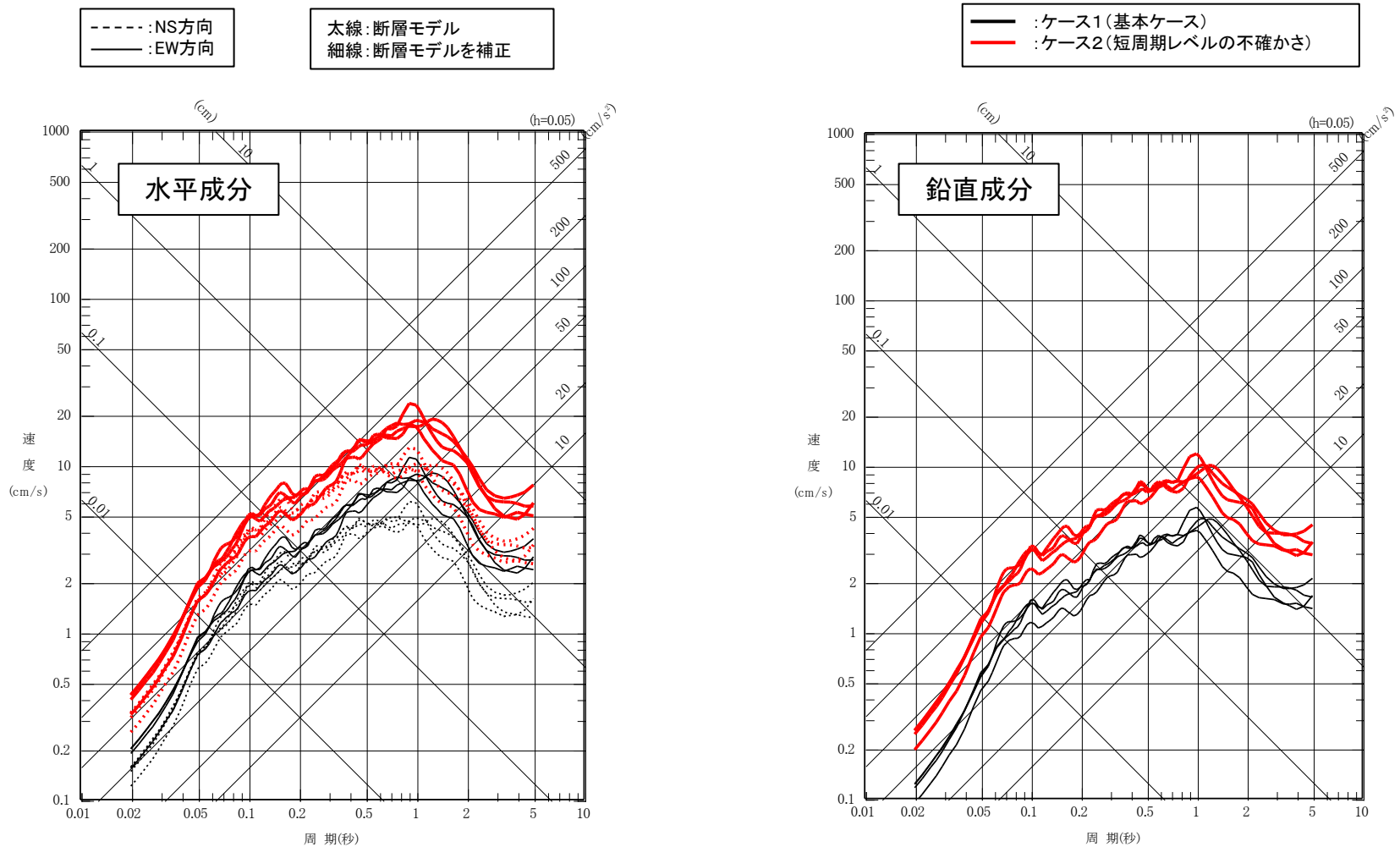
4.5 二重深発地震下面の地震(北海道) 北海道DE型地震 (2)断層パラメータ

➤ 北海道DE型地震の断層パラメータを以下に示す。

断層パラメータ		記号	単位	設定方法	ケース1 (基本)	ケース2 (短周期レベル)
巨視的断層面	地震規模(モーメントマグニチュード)	(Mw)	—	1993年釧路沖地震の地震規模	7.5(7.5)	←
	走向	θ	°	海溝軸を考慮	229	←
	断層傾斜角	δ	°	海洋プレート上面に対し30°, 1993年釧路沖地震	0	←
	断層長さ	L	km	断層面積より設定	44.0	←
	断層幅	W	km	断層面積より設定	25.0	←
	断層面積	S	km ²	$S=(49 \pi^4 \beta^4 M_0^2)/(16A^2 S_a)$	1080	←
	断層上端深さ	—	km	1993年釧路沖地震を参考	100	←
	地震モーメント	M_0	Nm	$M_0=10^{(1.5M_w+9.1)}$	2.24×10^{20}	←
	剛性率	μ	N/m ²	$\mu = \rho \beta^2$	4.80×10^{10}	←
	密度	ρ	g/cm ³	佐藤・巽(2002)	3.0	←
	S波速度	β	km/s ²	佐藤・巽(2002)	4.0	←
	平均すべり量	D	m	$D=M_0/(\mu S)$	4.32	←
	平均応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	$\Delta\sigma=(7 \pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.37	←
	破壊伝播速度	V_f	km/s	$V_f=0.72 \beta$ [Geller(1976)]	2.88	←
短周期レベル	A	Nm/s ²	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	1.29×10^{20}	2.70×10^{20}	
高周波遮断周波数	f_{max}	Hz	2008年岩手県沿岸北部の地震シミュレーション	18	←	
SMGA	地震モーメント	M_{0a}	Nm	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	8.87×10^{19}	←
	面積	S_a	km ²	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	214	←
	平均すべり量	D_a	m	$D_a=2D$	8.64	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$	MPa	$\Delta\sigma_a=A/(4 \beta^2 (\pi S_a)^{0.5})$	77.6	162.9
各SMGA	地震モーメント	M_{0ai}	Nm	$M_{0ai}=M_{0a}/n$, n:SMGAの個数	4.44×10^{19}	←
	面積	S_{ai}	km ²	$S_{ai}=S_a/n$, n:SMGAの個数	107	←
	平均すべり量	D_{ai}	m	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	8.64	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_{ai}$	MPa	$\Delta\sigma_{ai}=\Delta\sigma_a$	77.6	162.9
背景領域	地震モーメント	M_{0b}	Nm	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	1.35×10^{20}	←
	面積	S_b	km ²	$S_b=S-S_a$	866	←
	平均すべり量	D_b	m	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	3.25	←
	実効応力	$\Delta\sigma_b$	MPa	$\Delta\sigma_b=(D_b/W_b)/(D_a/W_a)\Delta\sigma_a$	14.6	30.7
Q値		Q	—	佐藤・巽(2002)	$114^{0.92}$	←

4.5 二重深発地震下面の地震(北海道) 北海道DE型地震 (3) 検討対象地震の地震動評価

- ▶ **北海道DE型地震**について、断層モデルによる複数の合成波から求めた各破壊開始点の平均応答スペクトルを以下に示す。



北海道DE型地震(検討対象地震)の地震動評価(平均応答スペクトル)

4.6 沖合いのやや浅い地震(北海道)

(1) 基本ケース及び不確かさの想定

- ▶ 北海道では、沖合いのやや浅い地震として1994年北海道東方沖地震(M8.2)が発生していることから、同タイプの地震として「**沖合いのやや浅い地震(北海道)**」を想定する。
- ▶ 地震規模は1994年北海道東方沖地震のM8.2を考慮し、敷地に最も近い千島弧に想定する。震源深さは、地震調査研究推進本部(2013)も踏まえ1994年北海道東方沖地震と同じとする。
- ▶ 断層傾斜角は、アウターライズで生成した正断層の再活動を考慮し、海洋プレートの境界面に対して60°とする。
- ▶ 破壊開始点は、破壊が敷地に向かう位置に設定する。
- ▶ Morikawa and Sasatani(2004)及び笹谷ほか(2006)に基づき、1994年北海道東方沖地震の短周期レベルを不確かさとして考慮する。1994年北海道東方沖地震は、沖合いのやや浅い地震としては東北地方及び北海道の最大であることから、地震規模の不確かさは考慮しない。
- ▶ 敷地において適切な観測記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法[釜江ほか(1991)及び入倉ほか(1997)]を用いた地震動評価を行う。

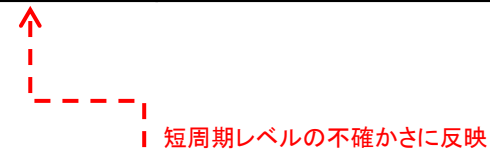
検討対象地震の想定[**沖合いのやや浅い地震(北海道)**]

	タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベル※1 (A)	備考
ケース1 (基本ケース)	逆断層	M8.2	敷地至近千島弧 (沖合い)	断層中央	1.0As	・1994年北海道東方沖地震のM及び震源深さを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトル
ケース2※2 (短周期レベル)	逆断層	M8.2	敷地至近千島弧 (沖合い)	断層中央	2.0As	・1994年北海道東方沖地震のM ₀ -Aを考慮 ・断層モデルの平均応答スペクトル

※1:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

※2:ケース2は、影響評価ケースと同等の不確かさを考慮。

 : 考慮する不確かさ : あらかじめモデルに織り込む不確かさ



1994年北海道東方沖地震の地震調査研究推進本部(2020)に対する短周期レベルの倍率

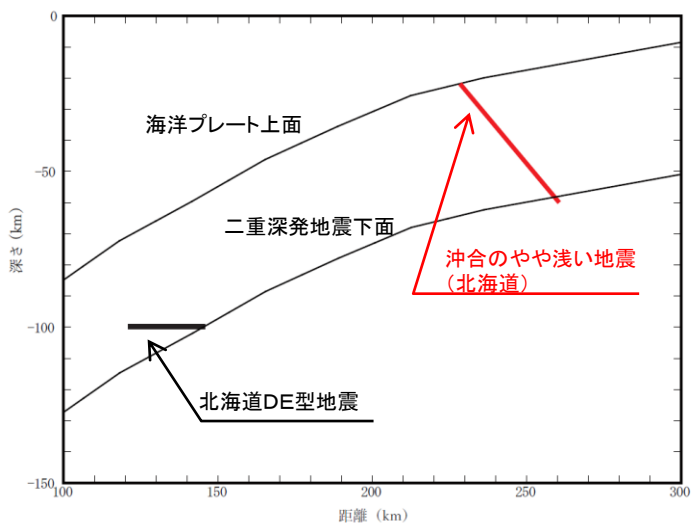
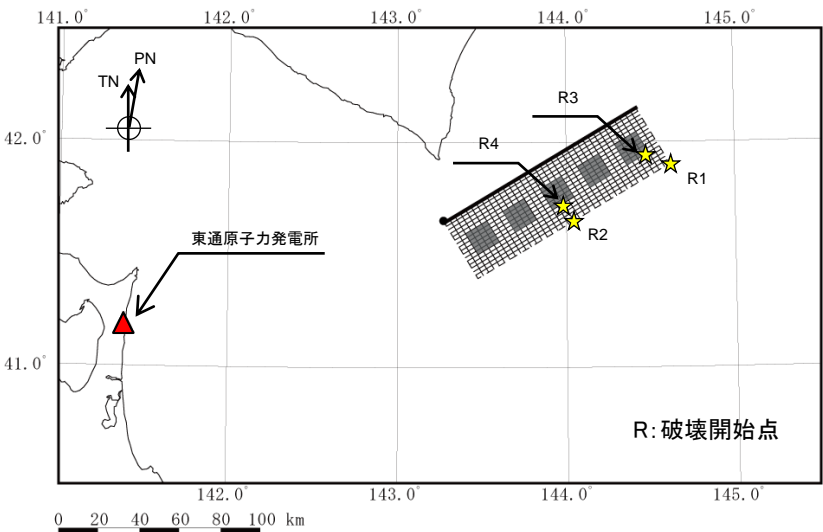
	①Morikawa and Sasatani(2004), 笹谷ほか(2006)	②地震調査研究推進本部(2020)※3	①/②
短周期レベル(A) (Nm/s ²)	5.92 × 10 ²⁰	2.92 × 10 ²⁰	2.0

※3: Kikuchi and Kanamori(1995)による地震モーメント[2.6 × 10²¹(Nm)]より算定

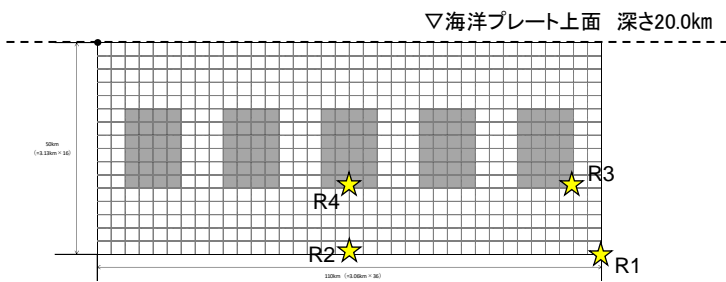
4.6 沖合いのやや浅い地震(北海道)

(1) 基本ケース及び不確かさの想定 断層モデル

➤ 沖合いのやや浅い地震(北海道)の断層モデルを示す。

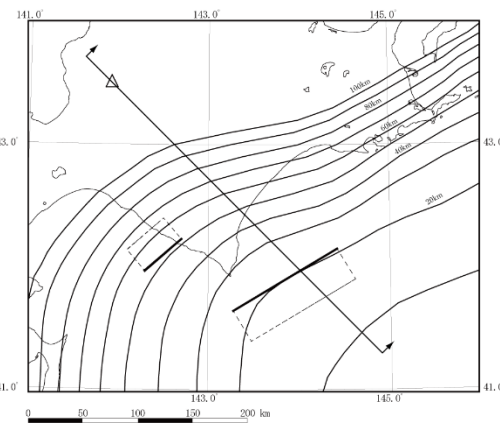


沖合いのやや浅い地震(北海道) 断層配置図



沖合いのやや浅い地震(北海道) 展開図

R:破壊開始点
■:強震動生成域(SMGA)



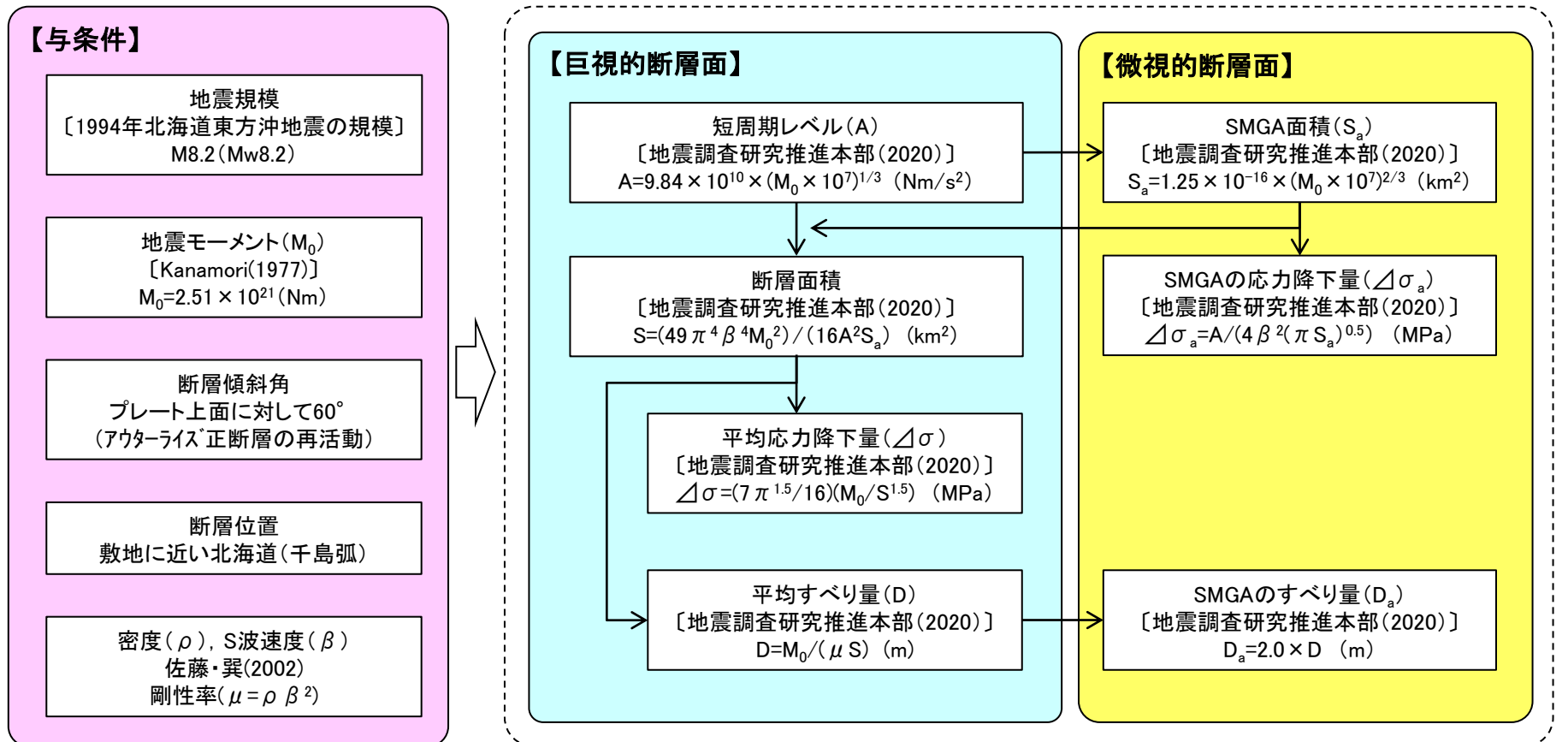
沖合いのやや浅い地震(北海道)
断層配置図(断面)

沖合いのやや浅い地震(北海道)
各ケースの地震規模と等価震源距離

	地震規模	等価震源距離
ケース1	M8.2	220 (km)
ケース2		

4.6 沖合いのやや浅い地震(北海道) (2)断層パラメータ 設定フロー

- 沖合いのやや浅い地震(北海道)[基本ケース及びケース2(短周期レベルの不確かさ)]の断層パラメータ設定フローを示す。
- 設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



※:ケース2(短周期レベル)では、ケース1(基本ケース)のA及び $\Delta\sigma_a$ を2.0倍にする。

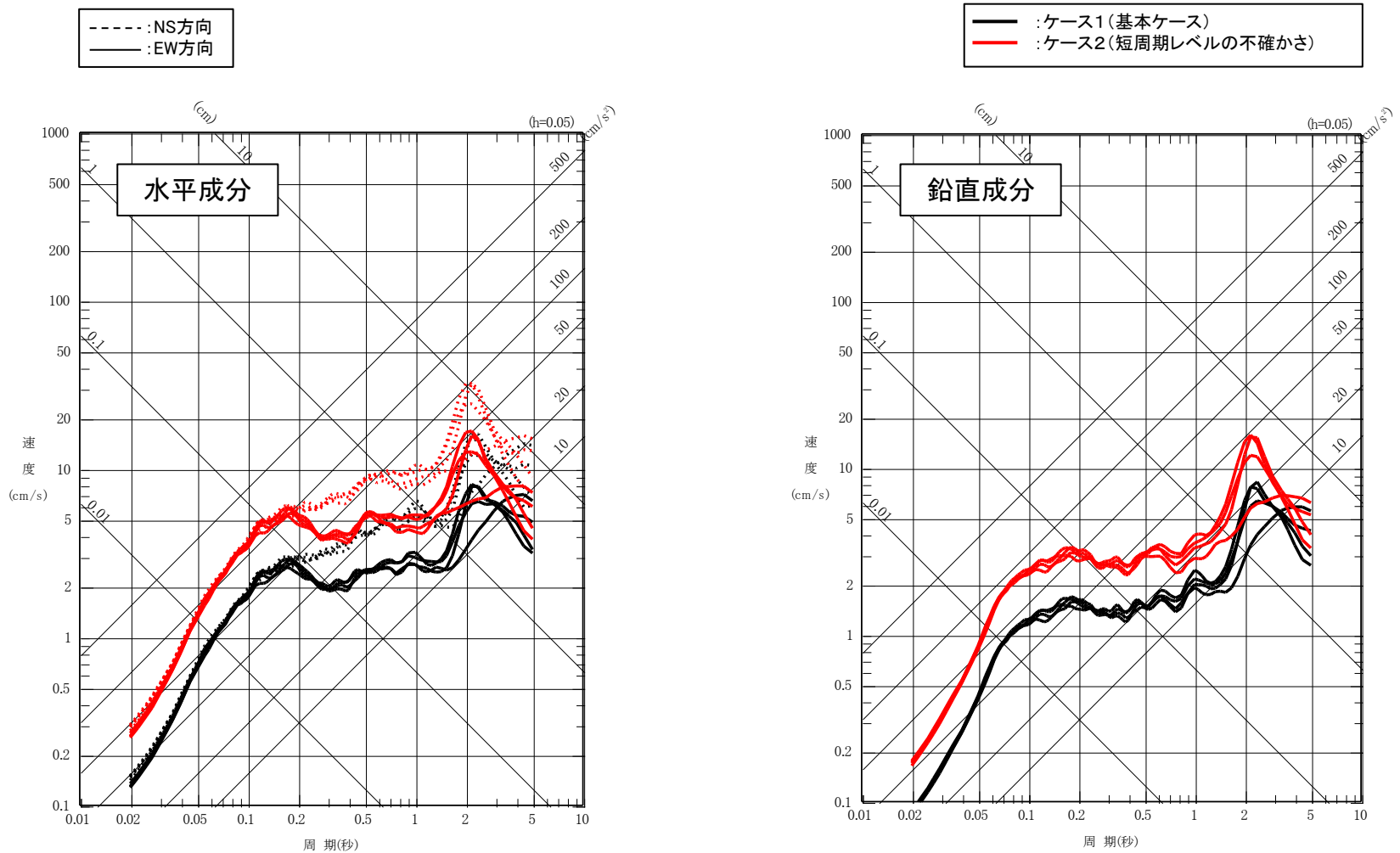
4.6 沖合いのやや浅い地震(北海道) (2)断層パラメータ

➤ 沖合いのやや浅い地震(北海道)の断層パラメータを以下に示す。

断層パラメータ	記号	単位	設定方法	ケース1 (基本)	ケース2 (短周期レベル)	
巨視的断層面	地震規模(モーメントマグニチュード)	(Mw)	—	1994年北海道東方沖地震の地震規模	8.2(8.2)	←
	走向	θ	°	海溝軸を考慮	59	←
	断層傾斜角	δ	°	海洋プレート上面に対し60°	50	←
	断層長さ	L	km	断層面積より設定	110.0	←
	断層幅	W	km	断層面積より設定	50.0	←
	断層面積	S	km ²	$S=(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16A^2S_a)$	5412	←
	断層上端深さ	—	km	1994年北海道東方沖地震を参考	20	←
	地震モーメント	M_0	Nm	$M_0=10^{(1.5M_w+9.1)}$	2.51×10^{21}	←
	剛性率	μ	N/m ²	$\mu = \rho \beta^2$	4.80×10^{10}	←
	密度	ρ	g/cm ³	佐藤・巽(2002)	3.0	←
	S波速度	β	km/s ²	佐藤・巽(2002)	4.0	←
	平均すべり量	D	m	$D=M_0/(\mu S)$	9.67	←
	平均応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.37	←
	破壊伝播速度	V_r	km/s	$V_r=0.72\beta$ [Geller(1976)]	2.88	←
短周期レベル	A	Nm/s ²	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	2.88×10^{20}	5.76×10^{20}	
高周波遮断周波数	f_{max}	Hz	2008年岩手県沿岸北部の地震シミュレーション	18	←	
SMGA	地震モーメント	M_{0a}	Nm	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	9.95×10^{20}	←
	面積	S_a	km ²	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	1072	←
	平均すべり量	D_a	m	$D_a=2D$	19.34	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$	MPa	$\Delta\sigma_a=A/(4\beta^2(\pi S_a)^{0.5})$	77.6	155.2
各SMGA	地震モーメント	M_{0ai}	Nm	$M_{0ai}=M_{0a}/n$, n:SMGAの個数	1.99×10^{20}	←
	面積	S_{ai}	km ²	$S_{ai}=S_a/n$, n:SMGAの個数	214	←
	平均すべり量	D_{ai}	m	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	19.34	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_{ai}$	MPa	$\Delta\sigma_{ai}=\Delta\sigma_a$	77.6	155.2
背景領域	地震モーメント	M_{0b}	Nm	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	1.52×10^{21}	←
	面積	S_b	km ²	$S_b=S-S_a$	4340	←
	平均すべり量	D_b	m	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	7.28	←
	実効応力	$\Delta\sigma_b$	MPa	$\Delta\sigma_b=(D_b/W_b)/(D_a/W_a)\Delta\sigma_a$	11.0	21.9
Q値	Q	—	佐藤・巽(2002)	$114^{0.92}$	←	

4.6 沖合いのやや浅い地震(北海道) (3) 検討対象地震の地震動評価

- **沖合いのやや浅い地震(北海道)**について、断層モデルによる複数の合成波から求めた各破壊開始点の平均応答スペクトルを以下に示す。



沖合いのやや浅い地震(北海道)(検討対象地震)の地震動評価(平均応答スペクトル)

4.7 アウターライズ地震

(1) 基本ケース及び不確かさの想定

- アウターライズでは1933年三陸沖の地震(M8.1)が発生していることから、同タイプの地震として「アウターライズ地震」を想定する。
- これまで知られている正断層のアウターライズ地震の最大規模である1933年三陸沖の地震(M8.1)を基本ケースとし、敷地に最も近い海溝軸東側に想定する。
- また、土木学会(2002)では1611年慶長の津波が海洋プレート内地震によるものであった場合Mw8.6としていることを踏まえ、津波評価においてM8.6としていることから、この地震規模を影響評価ケースとして考慮する。
- M7クラス後半の地震として、2011年3月11日15時25分三陸沖の地震(M7.5)が発生しており、この地震の短周期レベル[佐藤(2013)]は、地震調査研究推進本部(2020)による平均的な短周期レベルに比べて小さいものとなっている。
- 上記地震については、敷地における観測記録が得られていることから、距離及び地震規模の補正による簡易評価を行う。

検討対象地震の想定〔アウターライズ地震〕

	タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベル※1 (A)	備考
ケース1 (基本ケース)	正断層	M8.1	敷地前面 海溝軸東側	断層中央	0.7As	<ul style="list-style-type: none"> ・1933年三陸沖の地震のMを考慮 ・2011年3月11日15時25分三陸沖の地震のM₀-Aを考慮 ・地震観測記録を補正
影響評価ケース (津波評価の規模)	正断層	M8.6	敷地前面 海溝軸東側	断層中央	0.7As	<ul style="list-style-type: none"> ・津波評価の地震規模を参考 ・2011年3月11日15時25分三陸沖の地震のM₀-Aを考慮 ・地震観測記録を補正

※1: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

■ : 考慮する不確かさ □ : あらかじめモデルに織り込む不確かさ

2011年3月11日15時25分三陸沖の地震の地震調査研究推進本部(2020)に対する短周期レベルの倍率

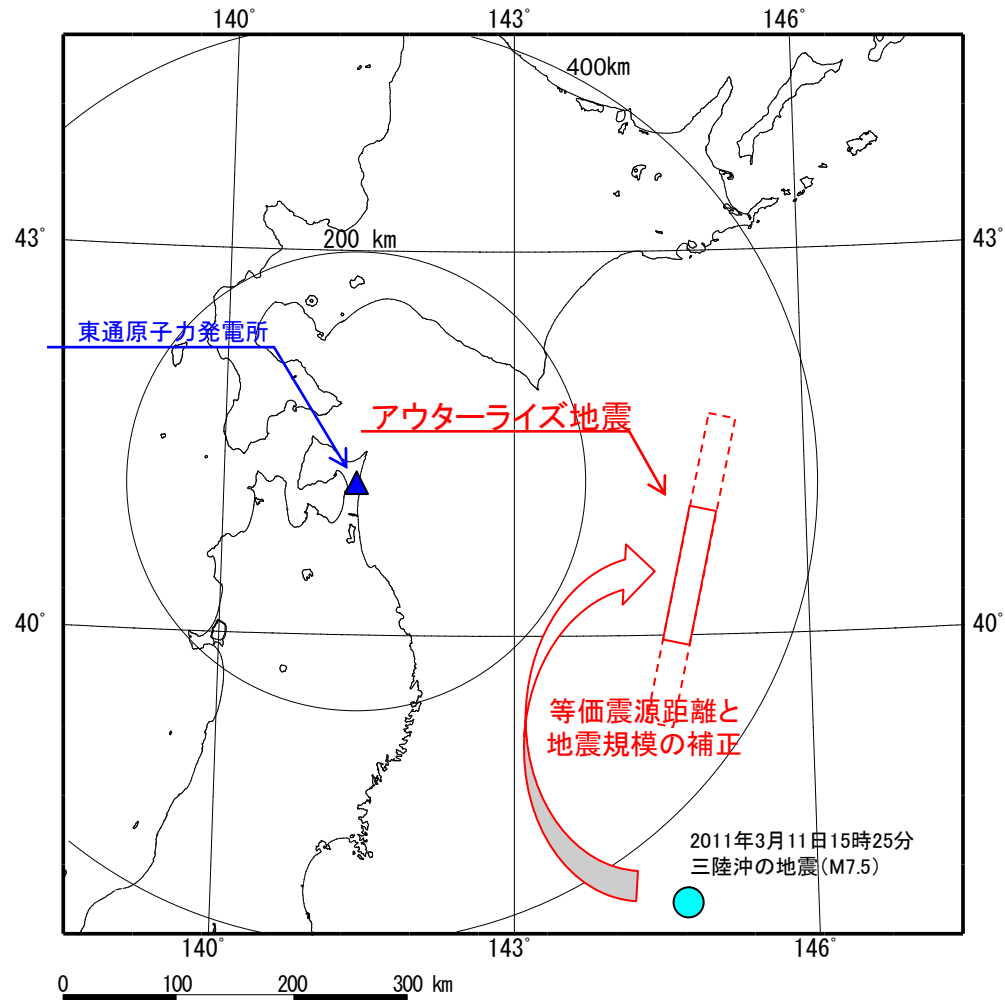
	①佐藤(2013)	②地震調査研究推進本部(2020)※2	①/②
短周期レベル(A) (Nm/s ²)	9.37 × 10 ¹⁹	1.33 × 10 ²⁰	0.7

※2: F-netによる地震モーメント[2.46 × 10²⁰(Nm)]より算定

4.7 アウターライズ地震

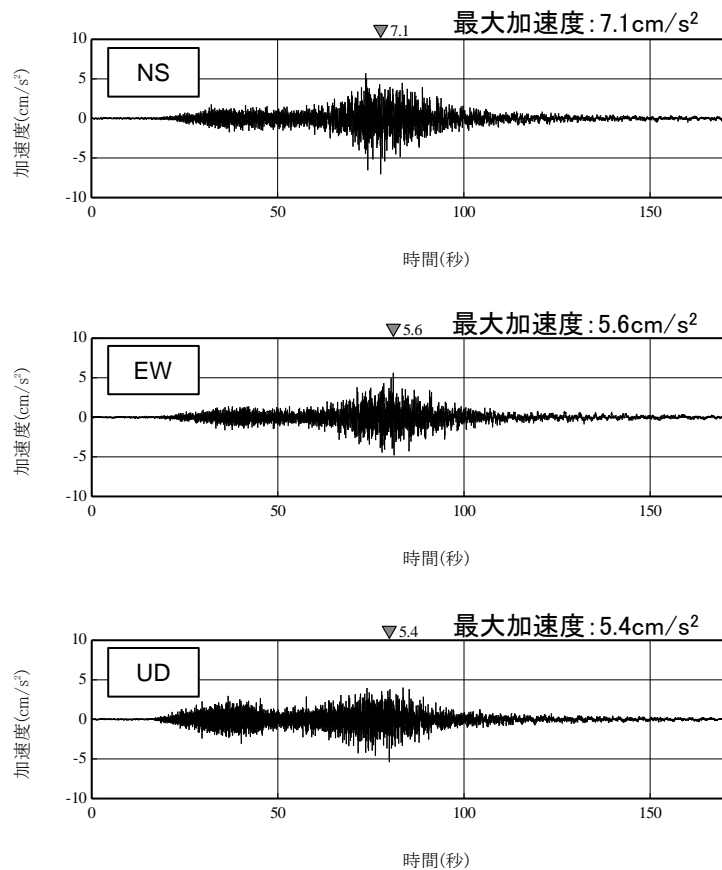
(2) アウターライズ地震と観測地震の震央位置

➤ アウターライズ地震と観測地震の震央位置を以下に示す。

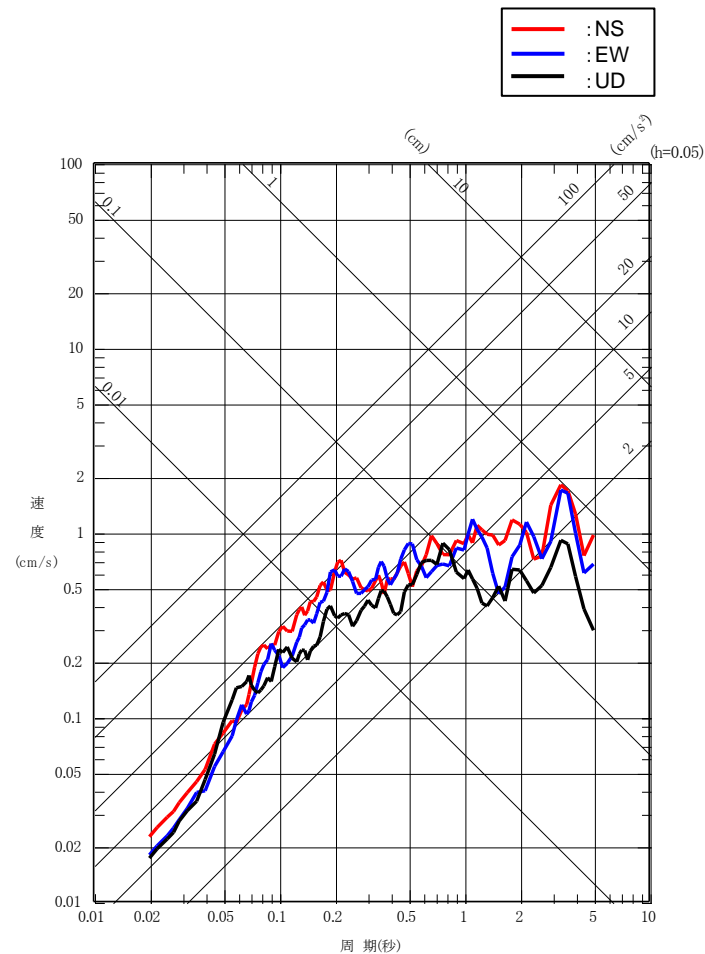


4.7 アウターライズ地震 (3)2011年3月11日三陸沖の地震の観測記録

➤ アウターライズ地震の検討に用いる2011年3月11日三陸沖の地震(M7.5)の敷地における観測記録を以下に示す。



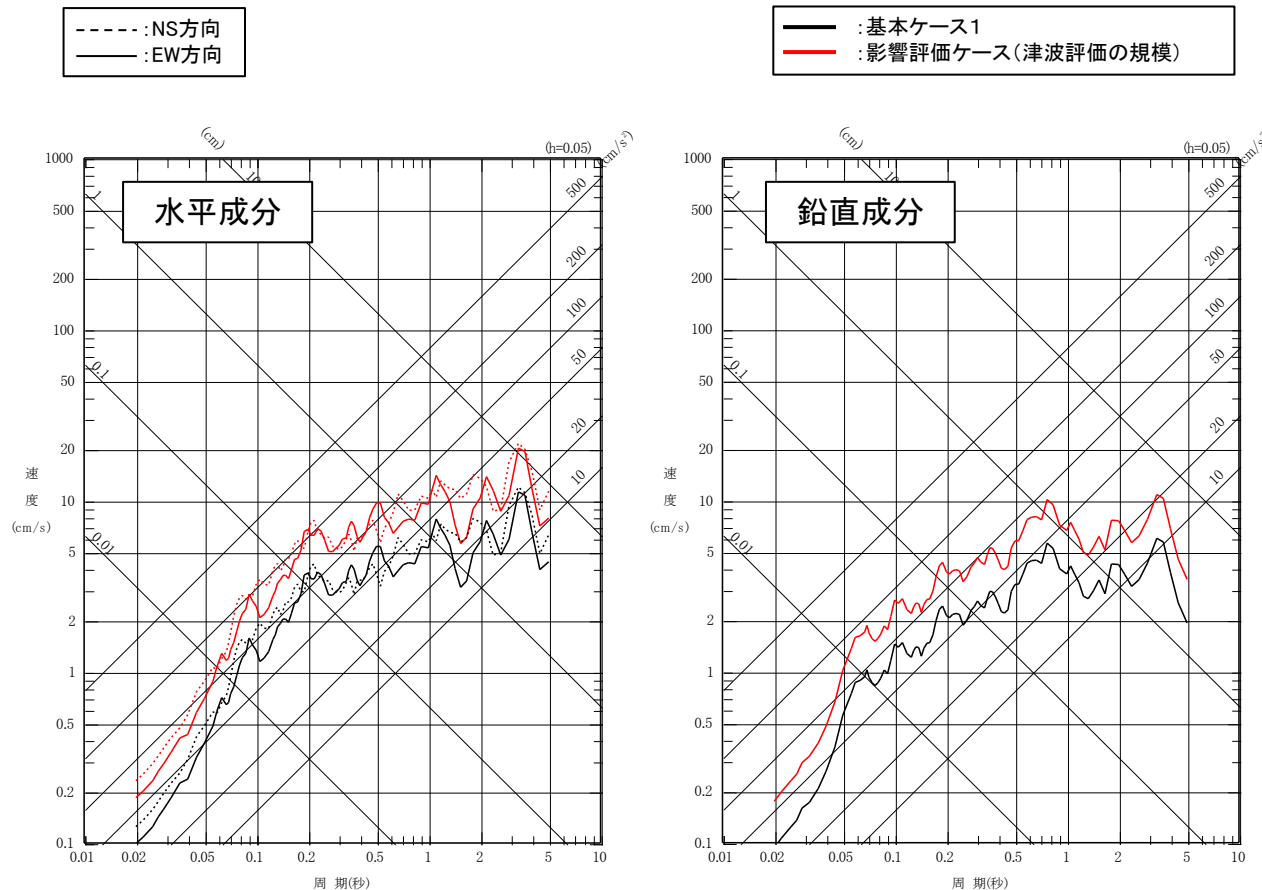
2011年3月11日三陸沖の地震の時刻歴波形
(自由地盤T.P.+2.0m観測点のはぎとり波, PN基準)



2011年3月11日三陸沖の地震の応答スペクトル
(自由地盤T.P.+2.0m観測点のはぎとり波, PN基準)

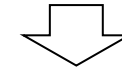
4.7 アウターライズ地震 (4) 地震動評価

- **アウターライズ地震**の地震動評価結果を以下に示す。
- 自由地盤岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)で得られた2011年3月11日三陸沖の地震(M7.5)の観測記録についてNoda et al.(2002)の比率を用いて補正を行った。

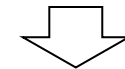


観測記録の補正

【観測地震】 2011年3月11日三陸沖の地震	
地震規模	M7.5
等価震源距離	464 (km)



ケース1(基本ケース)	
地震規模	M8.1
等価震源距離	287 (km)



規模の不確かさ

影響評価ケース(津波評価の規模)	
地震規模	M8.6
等価震源距離	287 (km)

※ : 補正した項目

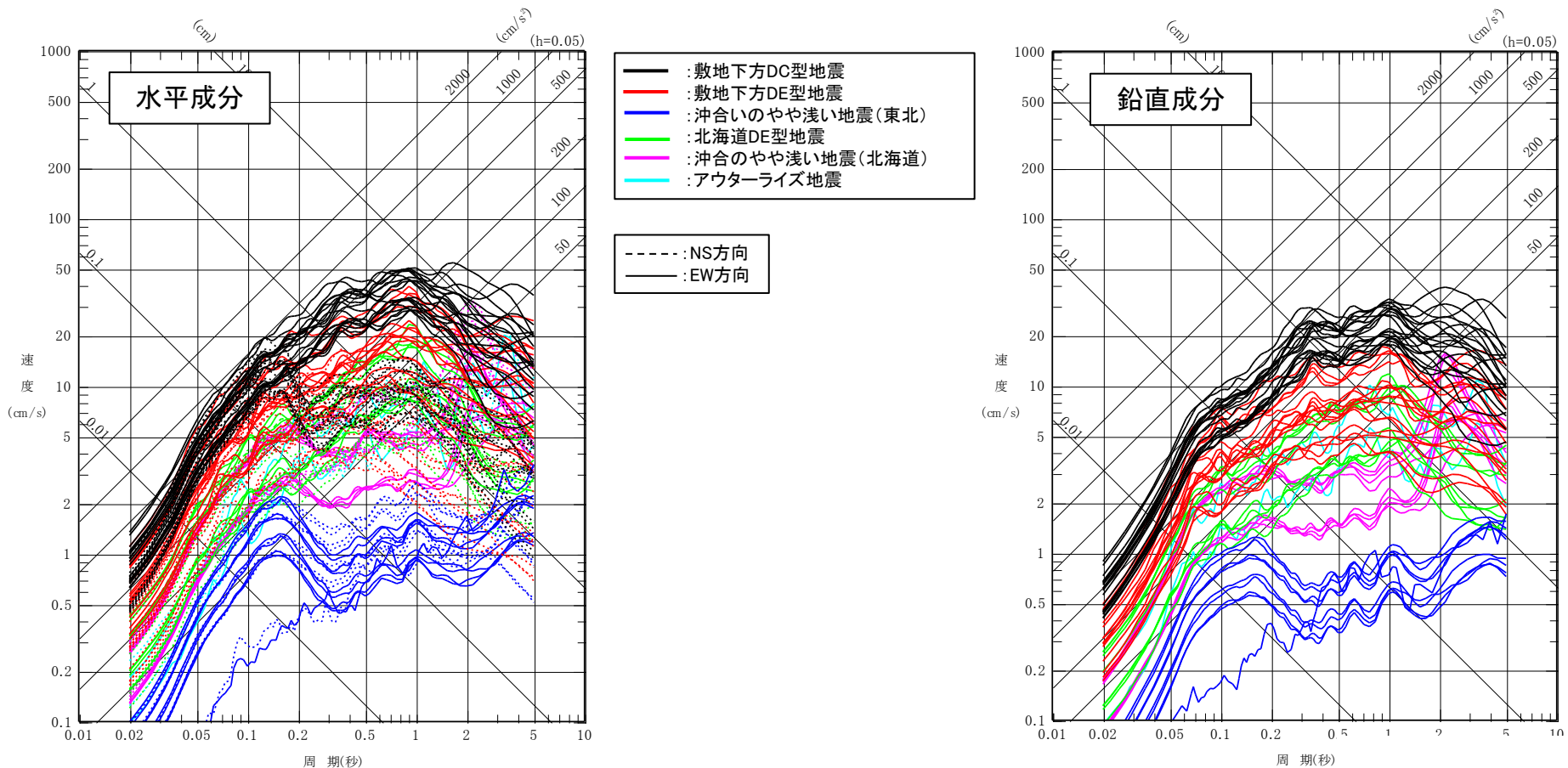
アウターライズ地震(検討対象地震)の地震動評価(PN基準)

アウターライズ地震の応答スペクトル=観測記録の応答スペクトル×Noda et al.(2002)の比率

4.8 検討用地震の選定 まとめ(検討対象地震の地震動評価)

3.16地震反映

- 各検討対象地震について、全てのケースの応答スペクトルの比較を以下に示す。
- 各検討対象地震の地震動が敷地に与える影響は特に大きいものではないこと(詳細は補足説明資料1章4及び5参照)、また、個々のケースでは一部の周期で地震タイプの違いによる凹凸があるものの、地震タイプ全体で比較した場合、[敷地下方DC型地震]が全ての周期帯において他の地震タイプを上回っていることから、この地震タイプを検討用地震として選定する。
- なお、参考に短周期レベルの影響を反映した応答スペクトル手法に基づく地震動評価を実施し、本評価結果と同様の傾向が得られていることを確認している(補足説明資料1章6参照)。



各検討対象地震の地震動評価

5. 海洋プレート内地震(検討用地震)の地震動評価

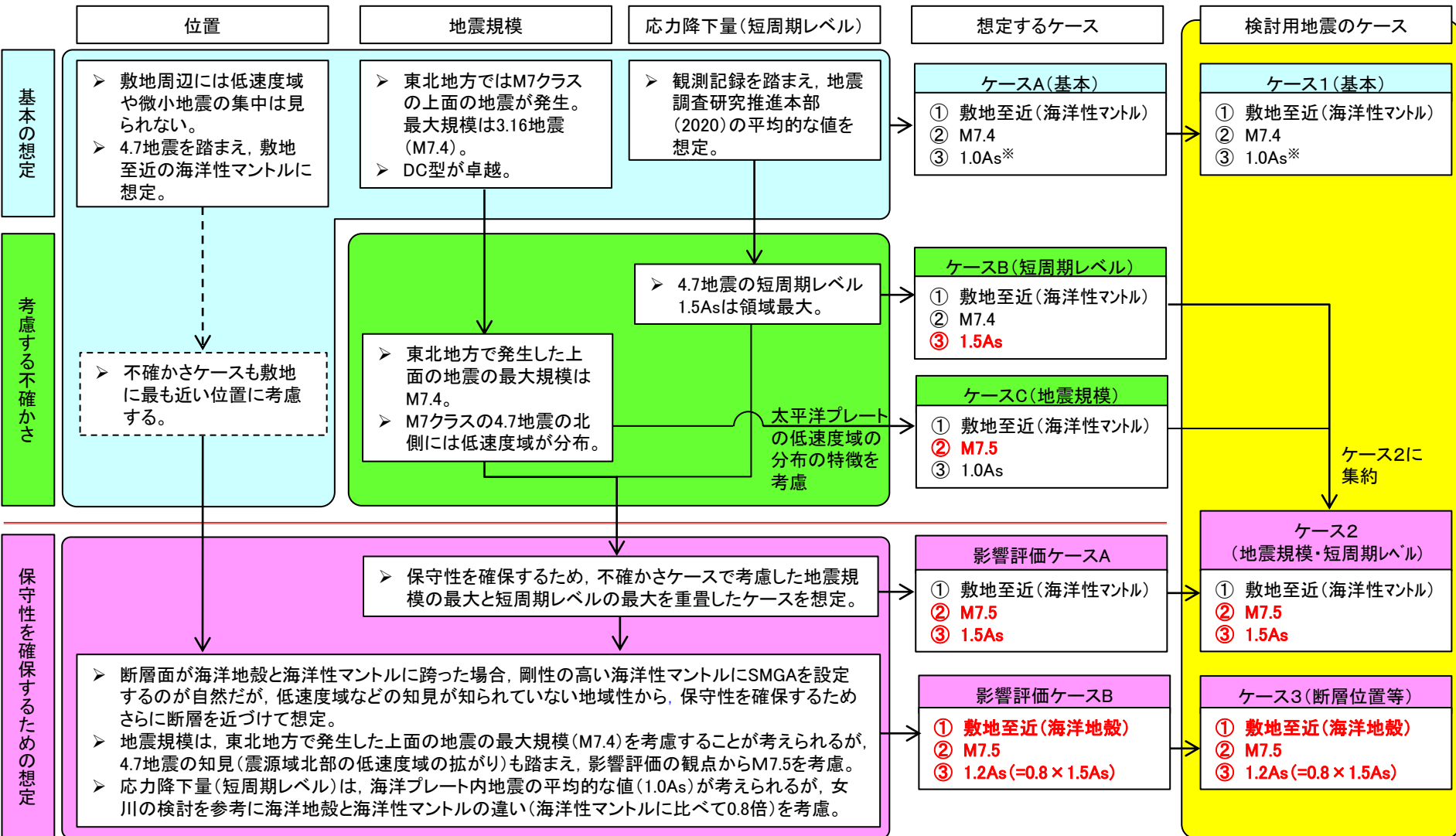
- 5. 1 海洋プレート内地震の検討用地震
- 5. 2 断層面を海洋地殻まで近づけた場合の応力降下量
- 5. 3 検討用地震の地震動評価
- 5. 4 海洋プレート内地震の地震動評価 まとめ

5.1 海洋プレート内地震の検討用地震

(1) 基本ケース及び不確かさケース ①基本方針

3.16地震反映

- ▶ 検討用地震(敷地下方DC型地震)の基本ケース及び考慮する不確かさ等の検討フローを以下に示す。
- ▶ 検討用地震の地震動評価においては、保守性の確保の観点から影響評価ケースも不確かさケースとして扱うこととする。



*: 地震調査研究推進本部(2020)(強震動予測レシピ)の短周期レベルを1.0Asとする。

5.1 海洋プレート内地震の検討用地震

(1) 基本ケース及び不確かさケース ②検討ケース

3.16地震反映

- 検討用地震として選定した「**敷地下方DC型地震**」について、検討ケースを以下に示す。

■基本ケース

- 4章(検討用地震の選定)での検討を踏まえ、**基本ケース**は、東北地方で発生した二重深発地震上面の最大規模であるM7.4とする。
- 想定位置、SMGA位置、短周期レベルは4章と同じとする。断層面は概ね敷地への延長上にあり、破壊開始点は、ディレクティブティ効果を考慮して破壊が敷地に向かう位置に複数設定する(不確かさケースでも同様とする)。

■不確かさケース

- 4章(検討用地震の選定)での検討から、地震規模と短周期レベルの不確かさを重畳させた影響評価ケースの影響が最も大きいことから、これを**不確かさケース2(地震規模・短周期レベル)**として想定する。
- また、以下の観点①、②から太平洋プレートの地殻まで破壊が広がる断層面を想定した場合に比べ海洋性マントルが破壊する場合の方が自然と考えられるものの、敷地に対する距離は近くなることを考慮し、**不確かさケース3[断層位置・地震規模・短周期レベル(以下、「断層位置等」という。)]**を想定する。その場合の地震規模は、東北地方で発生した上面の地震の最大規模であるM7.4が考えられるが、4.7地震の知見(震源域北部の低速度域の拡がり)も踏まえ、保守性も考慮したM7.5を想定する。また、応力降下量(短周期レベル)は、海洋プレート内地震の平均的な値である地震調査研究推進本部(2020)の値を用いることが考えられるが、女川原子力発電所での検討を参考に海洋性マントルと海洋地殻の物性の違いを考慮する(5章2参照)。

①地殻とマントルに跨って断層面を想定した場合、両者の物性の違い等を考慮するとSMGAはマントル内に生成されると考えられる。

②瀬野(2020)は、1978年宮城県沖地震等のプレート間地震の短周期地震動は断層面がスラブ地殻に及んだことにより生成されたものと考察している。

■地震動評価の方法

- 応答スペクトルに基づく地震動評価は、解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動の応答スペクトルを予測し、敷地の特性等を適切に反映することが可能なNoda et al.(2002)の手法を用いる。
- 断層モデルを用いた手法による地震動評価は、敷地において、敷地下方DC型地震の想定位置付近で発生した適切な観測記録が得られていないことから(補足説明資料2章2参照)、統計的グリーン関数法を用いた地震動評価を行う。

5.1 海洋プレート内地震の検討用地震

(1) 基本ケース及び不確かさケース ③認識論的不確かさと偶然的不確かさの整理

3.16地震反映

【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に基づく特定が困難なもの。

青文字: 基本ケースにあらかじめ不確かさを考慮
赤文字: 不確かさを考慮

種類	パラメータ	基本ケースでの設定 不確かさケースの設定	不確かさの考慮
認識論的 不確かさ	地震規模	M7.4	不確かさケースとして考慮 ✓ 基本ケースは、東北地方で発生した二重深発地震上面の地震の最大規模(3.16地震)であるM7.4とする。 ✓ 4.7地震では、震源域北部に低速度域の拡がり確認されており、敷地周辺の海洋プレート内には 同様の知見は確認されていないものの、保守性も考慮してM7.5を想定。
		M7.5	
	断層の位置	敷地至近 海洋性マントル内	不確かさケースとして考慮 ✓ 東北地方のDC型地震の4.7地震(M7.2)は、海洋性マントルの低速度域で発生。 ✓ 敷地周辺では、4.7地震でみられたような海洋プレート内の低速度域は知られていないものの、不確かさを考慮して 敷地至近の海洋性マントルの位置に想定。
		敷地至近 海洋地殻	✓ 海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いから、断層面を海洋性マントルに想定することが自然であるが、敷地付近の観測事例が少ないことなどを考慮し、 敷地至近の海洋地殻の位置に想定。
短周期レベル (応力降下量)	地震調査研究推進本部 (2020)の1.0倍	不確かさケースとして考慮 ✓ 敷地で得られた観測記録には短周期レベルが特に大きい傾向は確認されないことから、基本ケースは、海洋プレート内地震の平均的な値である地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルに基づき設定。 ✓ 不確かさとして、 東北地方で発生したDC型地震である4.7地震のM₀-A関係を考慮 [地震調査研究推進本部(2020)の1.5倍]。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。	
	基本ケースの1.5倍		
偶然的 不確かさ	SMGA位置	断層上端	基本ケースにあらかじめ不確かさを考慮 ✓ SMGA位置に関する知見は知られていないことから、 敷地に最も近い断層上端に考慮。 基本ケース、不確かさケースとも地震規模が大きいことを踏まえ、地震調査研究推進本部(2020)*1及び3.16地震の知見*2を参考にSMGAを2個想定。
		同上	
偶然的 不確かさ	破壊開始点	破壊が敷地に向かう位置	基本ケースにあらかじめ不確かさを考慮 ✓ 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位置)に複数考慮。
		同上	

*1: 強震動生成域の個数については、過去の地震に関する分析によるMw6未満で1個、Mw6~7で2個、Mw7~8で3個、Mw8以上で5個[笹谷ほか(2006)]を参考に設定する。
*2: 3.16地震の震源モデルは複数のSMGAが設定されている(補足説明資料4章参照)。なお、SMGAを均等に2個配置し、SMGAからの地震波が敷地で重なるよう保守的に設定している。

5.1 海洋プレート内地震の検討用地震

(1) 基本ケース及び不確かさケース ④検討ケース

3.16地震反映

- 基本ケースの地震規模は、東北で発生した二重深発地震上面の地震の最大規模である3.16地震の規模(M7.4)とする。不確かさで考慮する地震規模は、4.7地震の知見(震源域北部の低速度域の拡がり)を踏まえ、保守性も考慮したM7.5を想定する。
- 基本ケースの短周期レベルは、地震調査研究推進本部(2020)の平均的な値とする。不確かさで考慮する短周期レベルは、東北地方で発生した二重深発地震上面の最大値である4.7地震を考慮し、海洋地殻に想定する場合はさらに物性の違いを考慮する。

検討用地震の想定〔二重深発地震上面の地震(敷地下方DC型地震)〕

	タイプ	地震規模	想定位置	SMGA位置	短周期レベル※1 (A)	破壊開始点	備考
ケース1 (基本ケース)	DC型	M7.4	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.0As	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	東北地方で発生した上面の地震の最大規模を考慮
ケース2 (地震規模・短周期レベル)	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋性マントル)	断層上端 均等	1.5As	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	・原田・釜江(2011)による4.7地震のM ₀ -Aを考慮 ・4.7地震の知見(低速度域の拡がり)を踏まえ、保守性を考慮しM7.5を想定
ケース3 (断層位置等)	DC型	M7.5	敷地至近 (海洋地殻)	断層上端 均等	1.2As (0.8 × 1.5As)	破壊が敷地に向かう位置に複数想定	・4.7地震の知見(低速度域の拡がり)を踏まえ、保守性を考慮しM7.5を想定 ・断層位置を海洋地殻まで近づけて想定 ・海洋性マントルと海洋地殻の物性の違いを考慮

※1: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。

■ : 考慮する不確かさ

□ : あらかじめモデルに織り込む不確かさ

4.7地震の地震調査研究推進本部(2020)に対する短周期レベルの倍率

	①原田・釜江(2011)	②地震調査研究推進本部(2020)※2	③=①/②	④=0.8 × ③※3
短周期レベル(A) (Nm/s ²)	1.16 × 10 ²⁰	7.67 × 10 ¹⁹	1.5	1.2

※2: F-netによる地震モーメント[4.74 × 10¹⁹(Nm)]より算定

※3: 「0.8倍」は、海洋性マントルの強震動生成域に対する海洋地殻の強震動生成域の短周期レベルの比を示す(5章2参照)



5.2 断層面を海洋地殻まで近づけた場合の応力降下量

(1) 断層面を海洋地殻まで近づけた場合の応力降下量の設定

S198

■ 海洋地殻及び海洋性マントルの地震の応力降下量(短周期レベル)

(補足説明資料2章1参照)

【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】

- 地震調査研究推進本部(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)
- 地震調査研究推進本部(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地震の知見から地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルの1.5倍を考慮している。したがって、SMGAが海洋地殻内の場合は、4.7地震の**0.47倍~0.70倍**[地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルの約0.7(=1.5×0.47)~1.05倍(=1.5×0.70)]程度と考えられる。

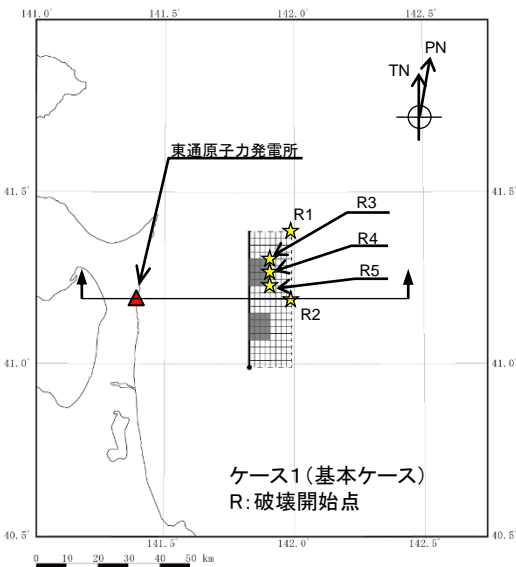
断層面を海洋地殻まで近づけた場合のSMGAの短周期レベルは、海洋地殻と海洋性マントルの物性の違いを考慮し、保守的に**4.7地震の0.8倍**[地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルの1.2倍]を考慮する。

5.3 検討用地震の地震動評価

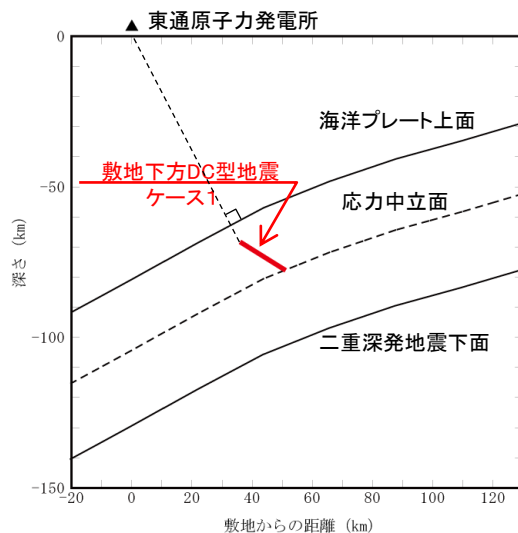
(1) 敷地下方DC型地震 断層モデル ①ケース1(基本ケース)

3.16地震反映

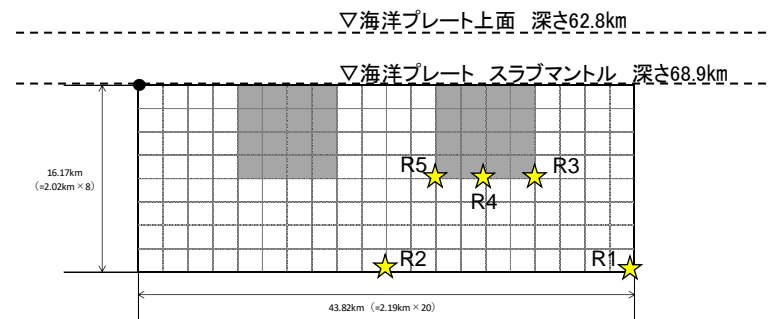
➤ 敷地下方DC型地震(ケース1)の断層モデルを示す。



断層配置図



断層配置図(断面)



ケース1(基本ケース)

展開図
R:破壊開始点
■:強震動生成域(SMGA)

破壊開始点位置は、破壊が敷地に向かう位置に、敷地と断層の位置関係を考慮して設定

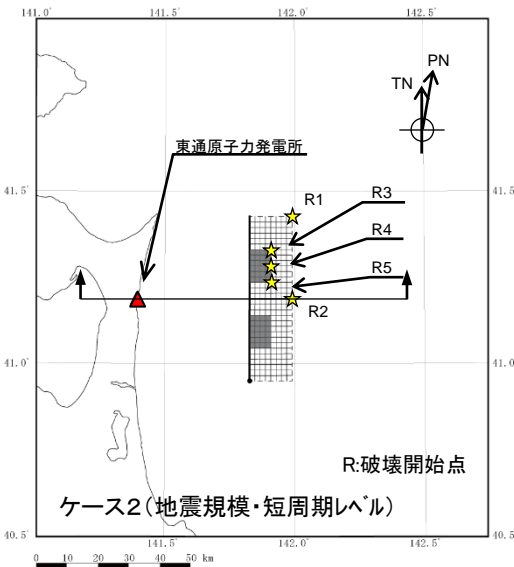
検討用地震(海洋プレート内地震)〔敷地下方DC型地震〕 ケース1(基本ケース)の主な諸元

	地震規模	断層傾斜角 (°)	地震モーメント (N・m)	短周期レベル (Nm/s ²)	断層上端深さ D(km)	等価震源距離 Xeq(km)
ケース1 (基本ケース)	M7.4	32	1.19×10^{20}	1.04×10^{20}	68.9	83

5.3 検討用地震の地震動評価

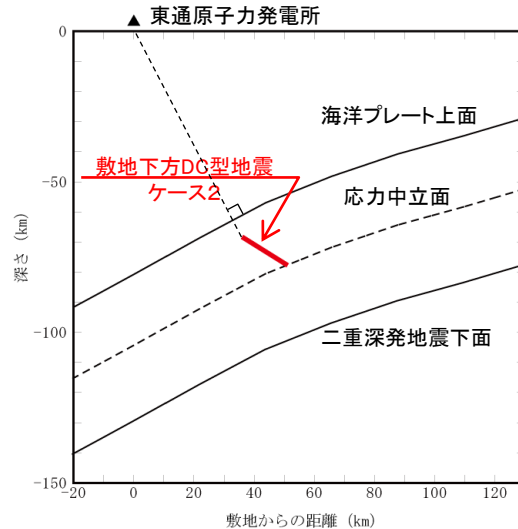
(1) 敷地下方DC型地震 断層モデル ②ケース2(地震規模・短周期レベル)

➤ 敷地下方DC型地震(ケース2)の断層モデルを示す。

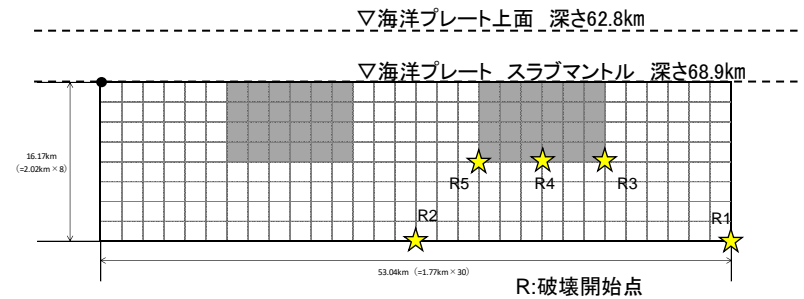


断層配置図

破壊開始点位置は、破壊が敷地に向かう位置に、敷地と断層の位置関係を考慮して設定



断層配置図(断面)



ケース2(地震規模・短周期レベル)

展開図
R:破壊開始点
■:強震動生成域(SMGA)

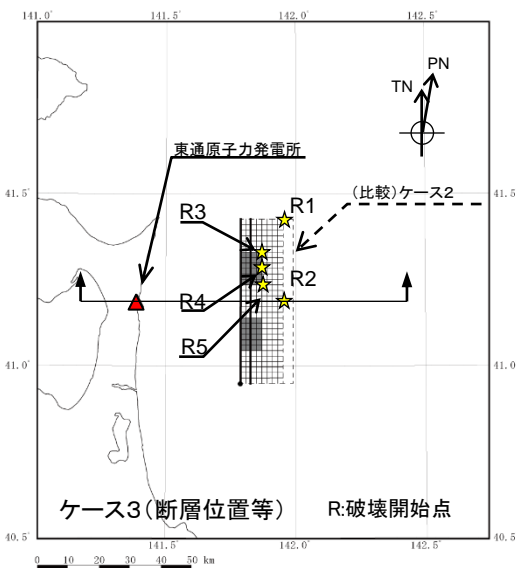
検討用地震(海洋プレート内地震)[敷地下方DC型地震] ケース2(地震規模・短周期レベル)の主な諸元

	地震規模	断層傾斜角 (°)	地震モーメント (N・m)	短周期レベル (Nm/s ²)	断層上端深さ D(km)	等価震源距離 Xeq(km)
ケース2 (地震規模・短周期レベル)	M7.5	32	1.58×10^{20}	1.72×10^{20}	68.9	84

5.3 検討用地震の地震動評価

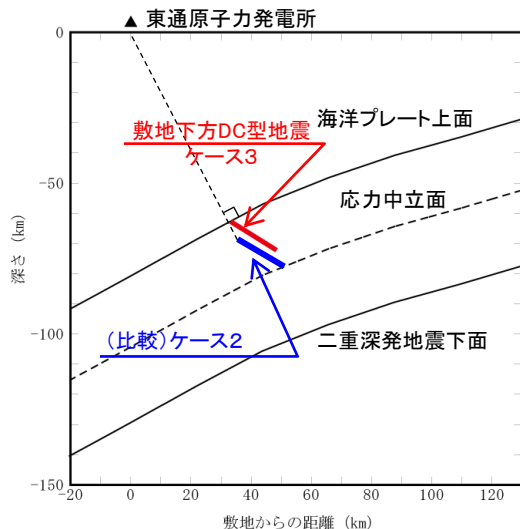
(1) 敷地下方DC型地震 断層モデル ③ケース3(断層位置等)

➤ 敷地下方DC型地震(ケース3)の断層モデルを示す。

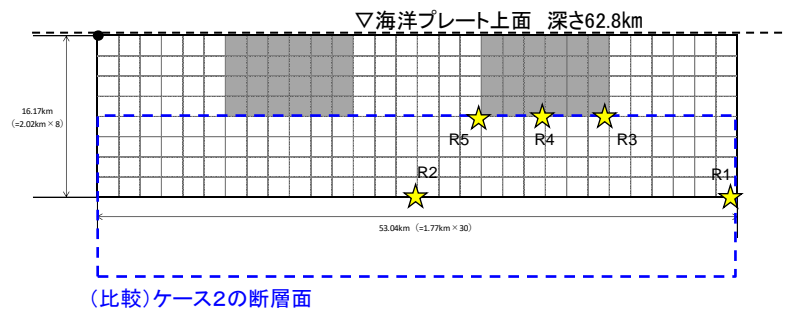


断層配置図

破壊開始点位置は、破壊が敷地に向かう位置に、敷地と断層の位置関係を考慮して設定



断層配置図(断面)



ケース3(断層位置等)

展開図
R:破壊開始点
■:強震動生成域 (SMGA)

検討用地震(海洋プレート内地震)〔敷地下方DC型地震〕 ケース3(断層位置等)の主な諸元

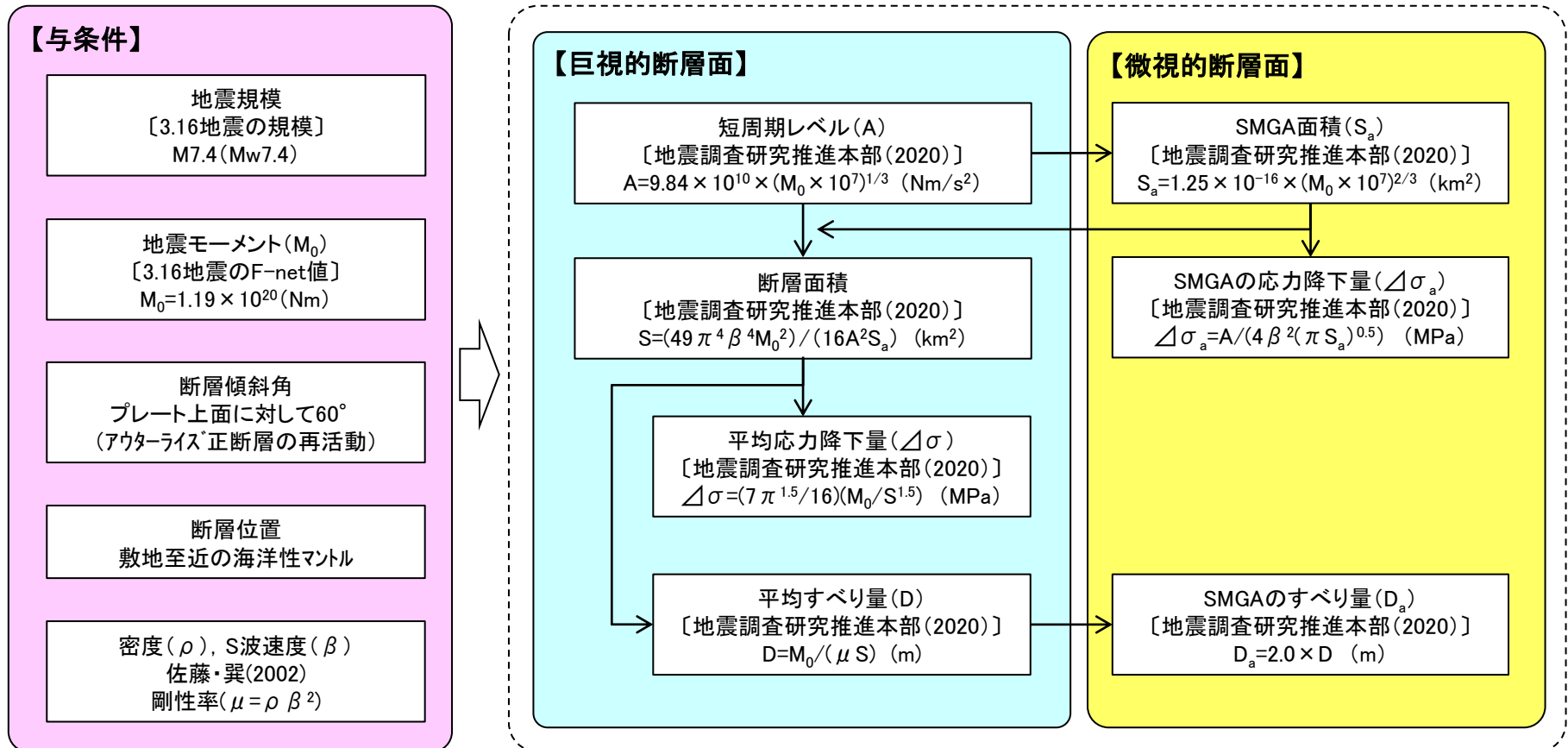
	地震規模	断層傾斜角 (°)	地震モーメント (N・m)	短周期レベル (Nm/s ²)	断層上端深さ D(km)	等価震源距離 Xeq(km)
ケース3 (断層位置等)	M7.5	32	1.58×10^{20}	1.38×10^{20}	62.8	77

5.3 検討用地震の地震動評価

(2) 敷地下方DC型地震 断層パラメータ設定フロー①

3.16地震反映

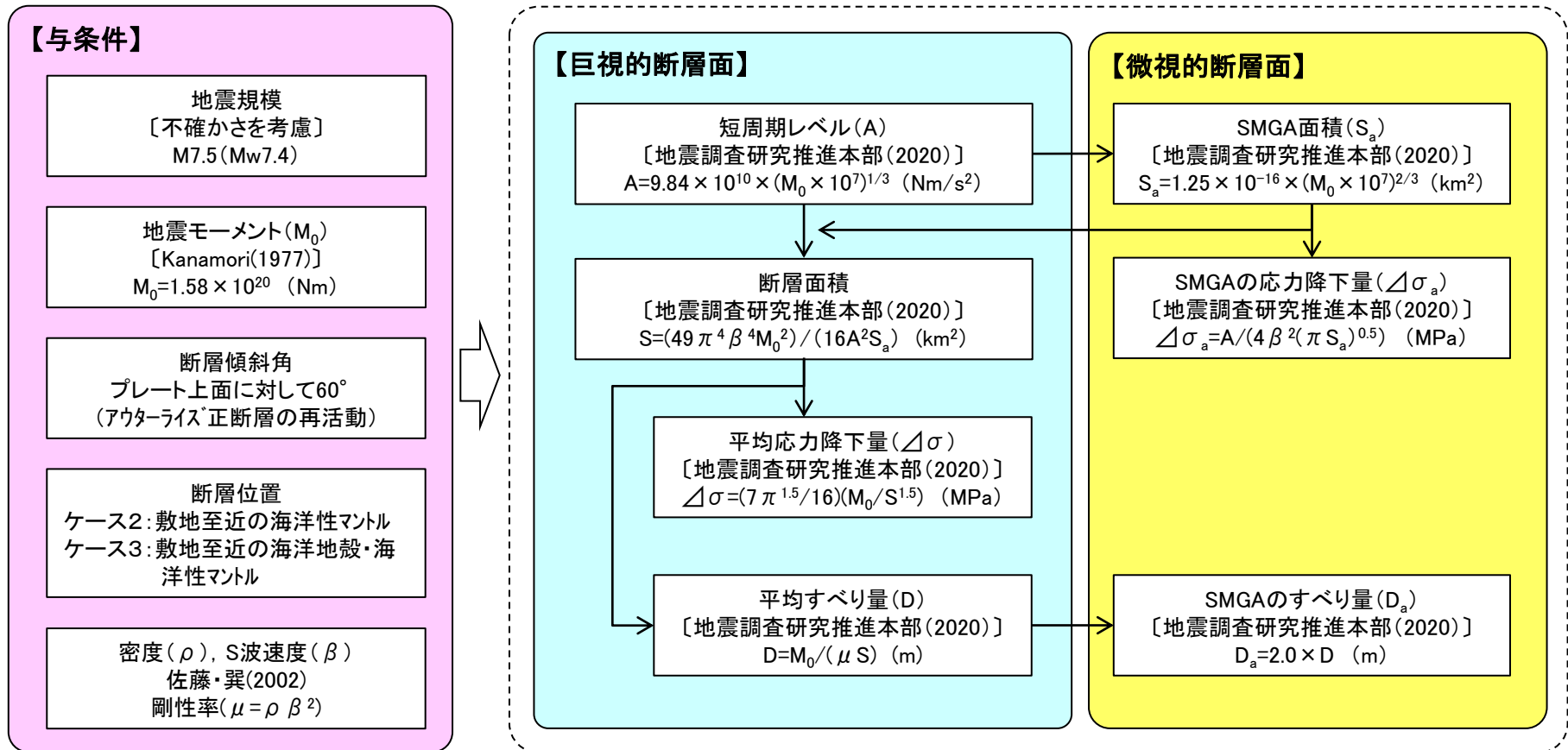
- 敷地下方DC型地震[ケース1(基本ケース)]の断層パラメータ設定フローを示す。
- 地震規模及び地震モーメントは、東北地方で発生した二重深発地震上面の地震の最大規模である3.16地震(M7.4)の値を用いる。
- 設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる*。



*: 3.16地震時に女川原子力発電所の観測記録のPN方向に認められた周期0.5秒のピークは震源特性に起因するものと考えられるが、東通と女川の地域性の特徴の違い等を踏まえると、このようなピークが基準地震動の策定に与える影響は小さい(補足説明資料3章参照)ことから、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。

5.3 検討用地震の地震動評価 (2) 敷地下方DC型地震 断層パラメータ設定フロー②

- 敷地下方DC型地震〔ケース2(断層規模・短周期レベル)及びケース3(断層位置等)〕の断層パラメータ設定フローを示す。
- 地震規模は、4.7地震及びその知見を踏まえM7.5(Mw7.4)とし、地震モーメントは、不確かさを考慮した地震規模から算定する。
- 設定は、地震調査研究推進本部(2020)の強震動予測レシピを用いる。



※: A及び $\Delta\sigma_a$ について、ケース2では1.5倍、ケース3では1.2倍とする。

5.3 検討用地震の地震動評価 (2) 敷地下方DC型地震 断層パラメータ

3.16地震反映

➤ 敷地下方DC型地震の各ケースの断層パラメータを以下に示す。

断層パラメータ	記号	単位	設定方法	ケース1 (基本ケース)	ケース2 (地震規模・短周期レベル)	ケース3 (断層位置等)	
巨視的断層面	地震規模(モーメントマグニチュード)	(Mw)	—	3.16地震の規模, 4.7地震の知見に基づく規模	7.4(7.4)	7.5(7.4)	←
	走向	θ	°	海溝軸を考慮	0	←	←
	断層傾斜角	δ	°	海洋プレート上面に対し60°	32	←	←
	断層長さ	L	km	断層面積より設定	43.82	53.04	←
	断層幅	W	km	断層面積より設定	16.17	←	←
	断層面積	S	km ²	$S=(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16A^2S_0)$	709	858	←
	断層上端深さ	—	km	海洋プレートの沈み込みを考慮	68.9	←	62.8
	地震モーメント	M_0	Nm	3.16地震のF-net, $M_0=10^{(1.5Mw+9.1)}$	1.19×10^{20}	1.58×10^{20}	←
	剛性率	μ	N/m ²	$\mu = \rho \beta^2$	4.80×10^{10}	←	←
	密度	ρ	g/cm ³	佐藤・巽(2002)	3.0	←	←
	S波速度	β	km/s ²	佐藤・巽(2002)	4.0	←	←
	平均すべり量	D	m	$D=M_0/(\mu S)$	3.50	3.85	←
	平均応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	15.37	←	←
	破壊伝播速度	V_r	km/s	$V_r=0.72\beta$ [Geller(1976)]	2.88	←	←
	短周期レベル	A	Nm/s ²	$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	1.04×10^{20}	1.72×10^{20}	1.38×10^{20}
	高周波遮断周波数	f_{max}	Hz	2008年岩手県沿岸北部の地震シミュレーション	18	←	←
SMGA	地震モーメント	M_{0a}	Nm	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	4.71×10^{19}	6.28×10^{19}	←
	面積	S_a	km ²	$S_a=1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3}$	140	170	←
	平均すべり量	D_a	m	$D_a=2D$	7.00	7.70	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$	MPa	$\Delta\sigma_a=A/(4\beta^2(\pi S_a)^{0.5})$	77.6	116.4	93.1
各SMGA	地震モーメント	M_{0ai}	Nm	$M_{0ai}=M_{0a}/n$, n:SMGAの個数	2.36×10^{19}	3.14×10^{19}	←
	面積	S_{ai}	km ²	$S_{ai}=S_a/n$, n:SMGAの個数	70	85	←
	平均すべり量	D_{ai}	m	$D_{ai}=M_{0ai}/(\mu S_{ai})$	7.00	7.70	←
	応力降下量	$\Delta\sigma_{ai}$	MPa	$\Delta\sigma_{ai}=\Delta\sigma_a$	77.6	116.4	93.1
背景領域	地震モーメント	M_{0b}	Nm	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	7.19×10^{19}	9.57×10^{19}	←
	面積	S_b	km ²	$S_b=S-S_a$	568	688	←
	平均すべり量	D_b	m	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	2.63	2.90	←
	実効応力	$\Delta\sigma_b$	MPa	$\Delta\sigma_b=(D_b/W_b)/(D_a/W_a)\Delta\sigma_a$	14.6	21.9	17.5
Q値	Q	—	佐藤・巽(2002)	$114^{0.92}$	←	←	

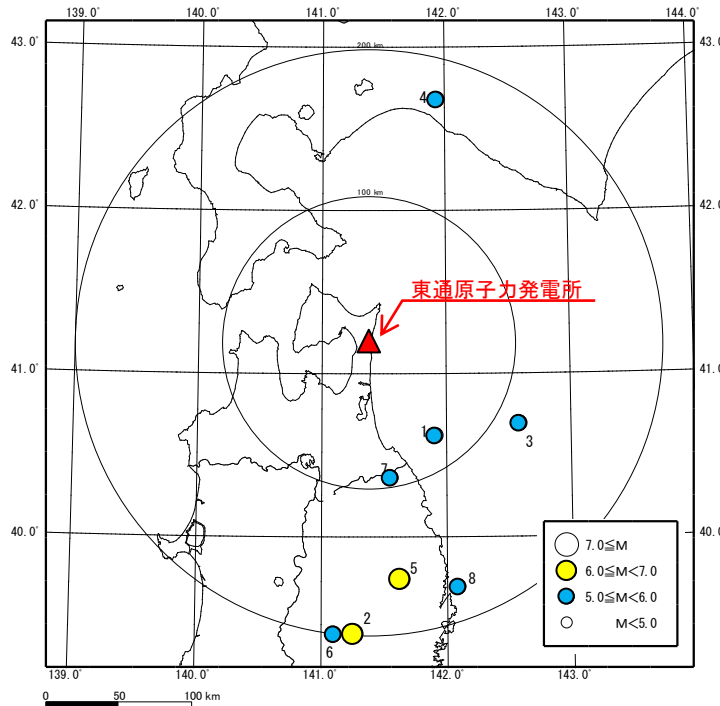
余白

5.3 検討用地震の地震動評価

(3) 応答スペクトルに基づく地震動評価 Noda et al.(2002)に対する補正係数

- 応答スペクトルに基づく地震動評価は、解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動の応答スペクトルを予測し、敷地の特性等を適切に反映することが可能なNoda et al.(2002)の手法を用いる。
- 海洋プレート内地震は、同程度の規模のプレート間地震や内陸地殻内地震に比べて短周期成分が卓越することが知られている〔例えば、片岡ほか(2006)〕。
- これを踏まえて、Noda et al.(2002)に対する敷地で得られた海洋プレート内地震の応答スペクトル比をNoda et al.(2002)に対するサイト補正係数として採用する。サイト補正係数は、Noda et al.(2002)のコントロールポイントと同じ周期(8点)とする。

- 検討に用いた観測記録は、以下の条件を満たす5地震とした。
 - ① 自由地盤観測点の観測開始(1994年)～2018年8月の観測記録
 - ② 地震規模M5.5以上、震源距離200km以内
 - ③ 気象庁「地震・火山月報(防災編)」に発生様式の記載がある
- さらに、抽出した地震数が少ないことから、④を満たす3地震を追加した。
 - ④ 地震規模M5.5以上、震央距離200km以内



海洋プレート内地震のサイト補正係数算定に用いた地震の震央分布

海洋プレート内地震のサイト補正係数算定に用いた地震

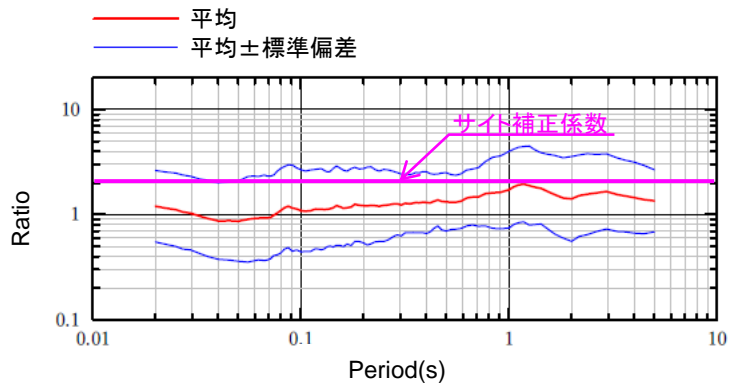
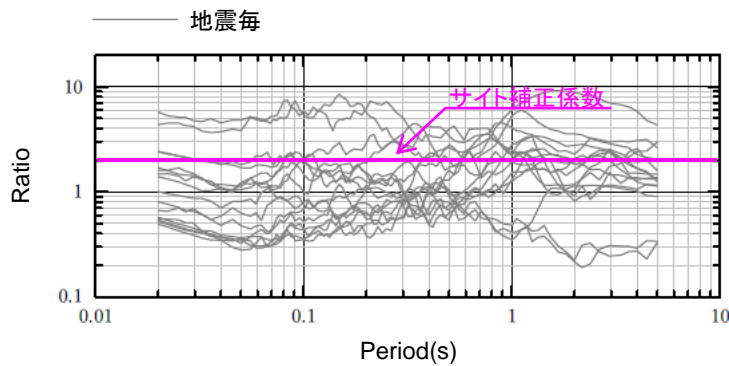
No.	年	月	日	時	分	東経		北緯		M	震源深さ (km)	震央距離 (km)	震源距離 (km)	Xeq (km)
						(°)	(')	(°)	(')					
1	2001	4	3	4	54	141	55.27	40	36.78	5.6	63	78	101	101
2	2001	12	2	22	1	141	15.79	39	23.9	6.4	122	199	233	233
3	2005	2	26	21	37	142	35.77	40	41.12	5.7	45	116	124	124
4	2007	4	19	0	7	141	56.80	42	40.24	5.6	126	171	213	213
5	2008	7	24	0	26	141	38.12	39	43.92	6.8	108	163	196	196
6	2014	6	15	2	31	141	6.46	39	23.77	5.5	94	200	221	221
7	2015	7	10	3	32	141	33.59	40	21.24	5.7	88	94	129	129
8	2017	12	16	2	58	142	5.69	39	41.17	5.5	52	177	185	185

Xeq: 等価震源距離

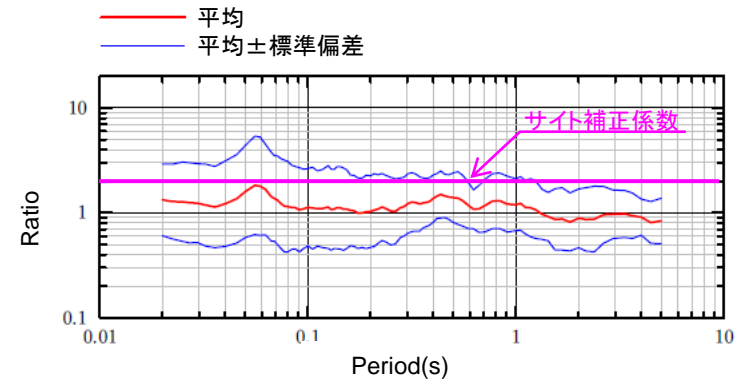
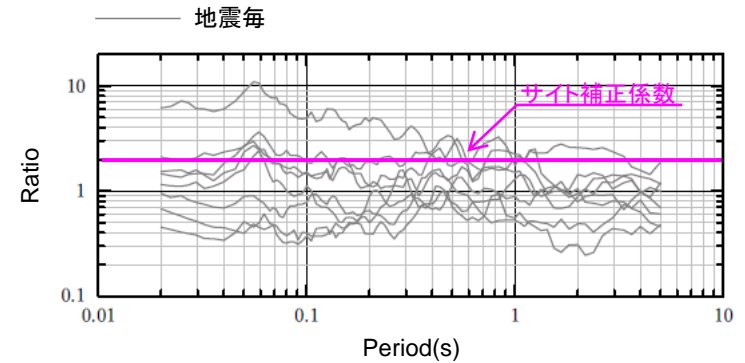
5.3 検討用地震の地震動評価

(3) 応答スペクトルに基づく地震動評価 Noda et al.(2002)に対する補正係数

- Noda et al.(2002)に対する観測記録(T.P.+2.0mのはぎとり波)の応答スペクトル比を示す(検討に用いた地震の特徴については補足説明資料2章3参照)。
- 観測記録との比較を参考に、海洋プレート内地震のNoda et al.(2002)に対するサイト補正係数は、全周期帯で2とする。



水平成分



鉛直成分

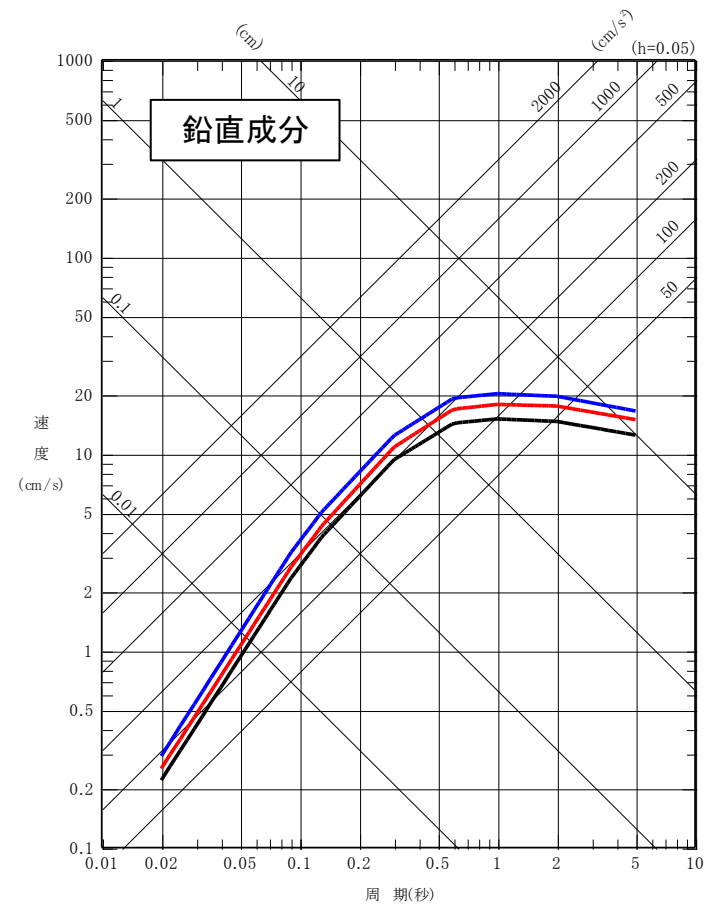
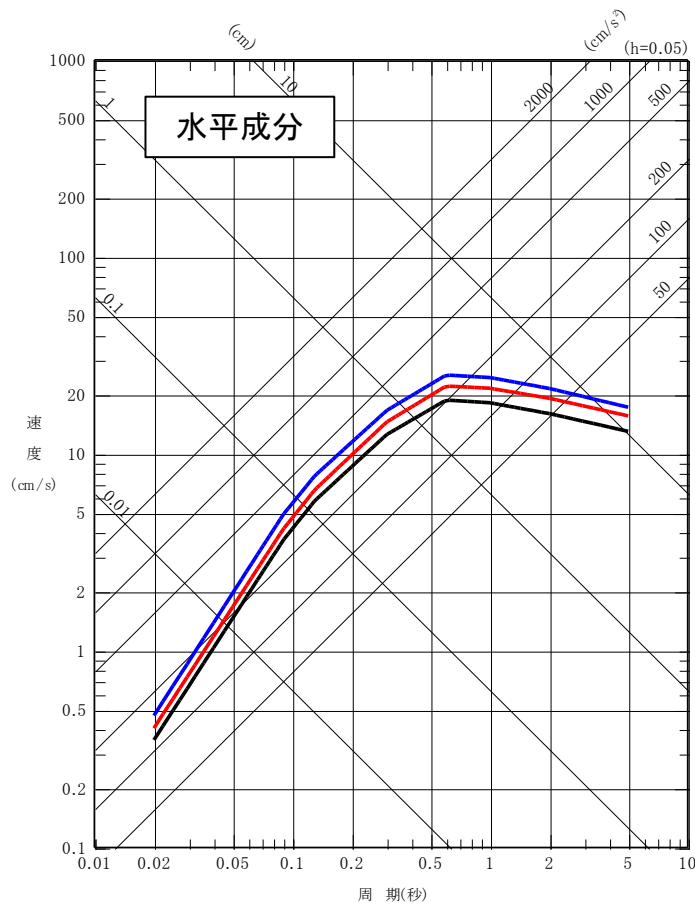
海洋プレート内地震のNoda et al.(2002)に対するサイト補正係数

5.3 検討用地震の地震動評価 (3) 応答スペクトルに基づく地震動評価

3.16地震反映

➤ Noda et al.(2002)の手法による敷地下方DC型地震の地震動評価を示す。

- : ケース1 (基本ケース) (M7.4, $X_{eq}=83\text{km}$)
- : ケース2 (地震規模・短周期レベル) (M7.5, $X_{eq}=84\text{km}$)
- : ケース3 (断層位置等) (M7.5, $X_{eq}=77\text{km}$)



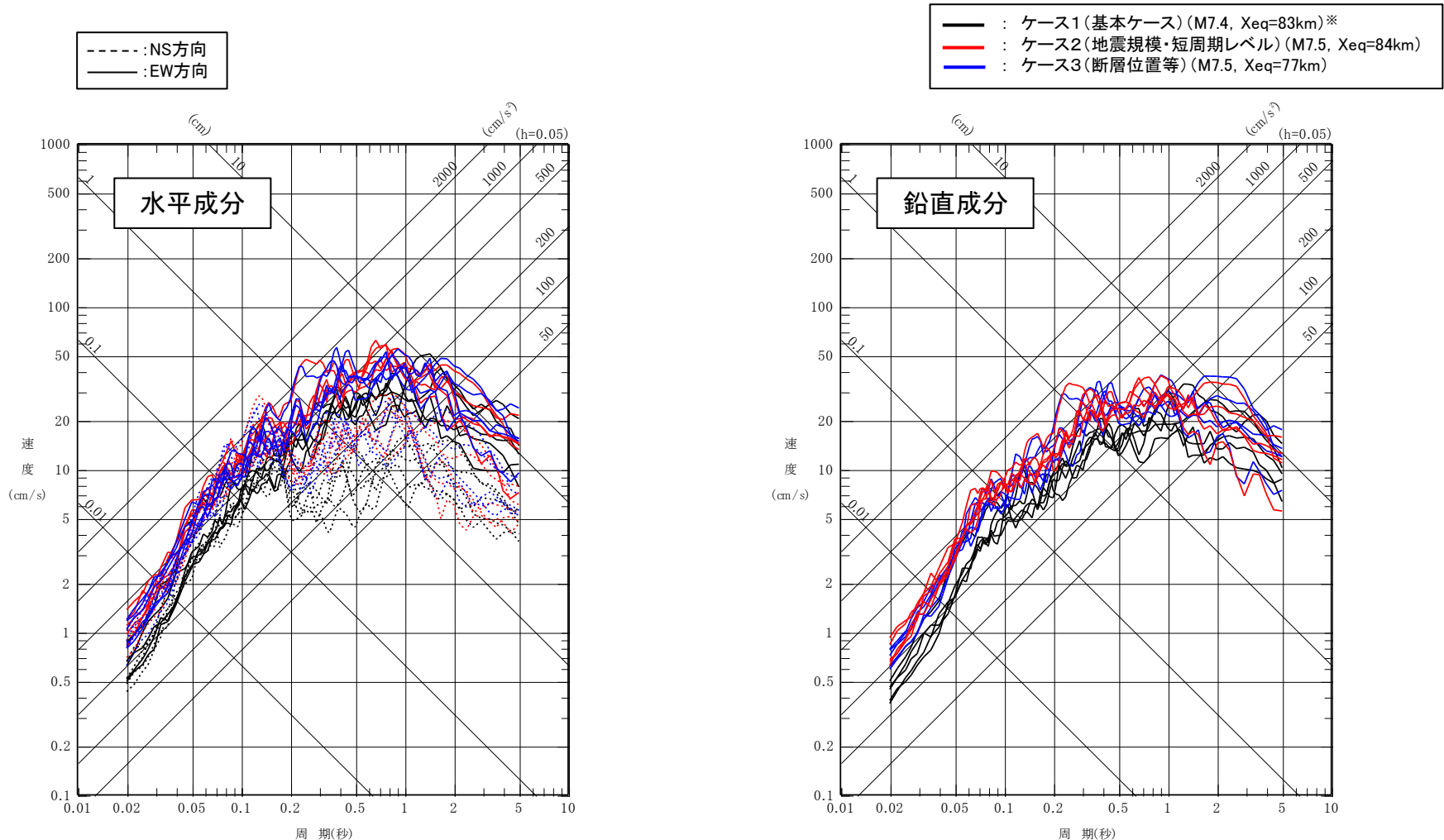
敷地下方DC型地震の応答スペクトルに基づく地震動評価

5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ①SGFによる応答スペクトル

3.16地震反映

- 敷地下方DC型地震の断層モデル手法による評価結果を示す。
- 断層モデル手法を用いた地震動評価は、敷地において適切な地震観測記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法(SGF)[釜江ほか(1991)及び入倉ほか(1997)]を用いた。



敷地下方DC型地震の断層モデル手法を用いた地震動評価(PN基準) ※: 前回提示「ケース1(基本ケース)(M7.3)との比較を補足説明資料5章に示す。

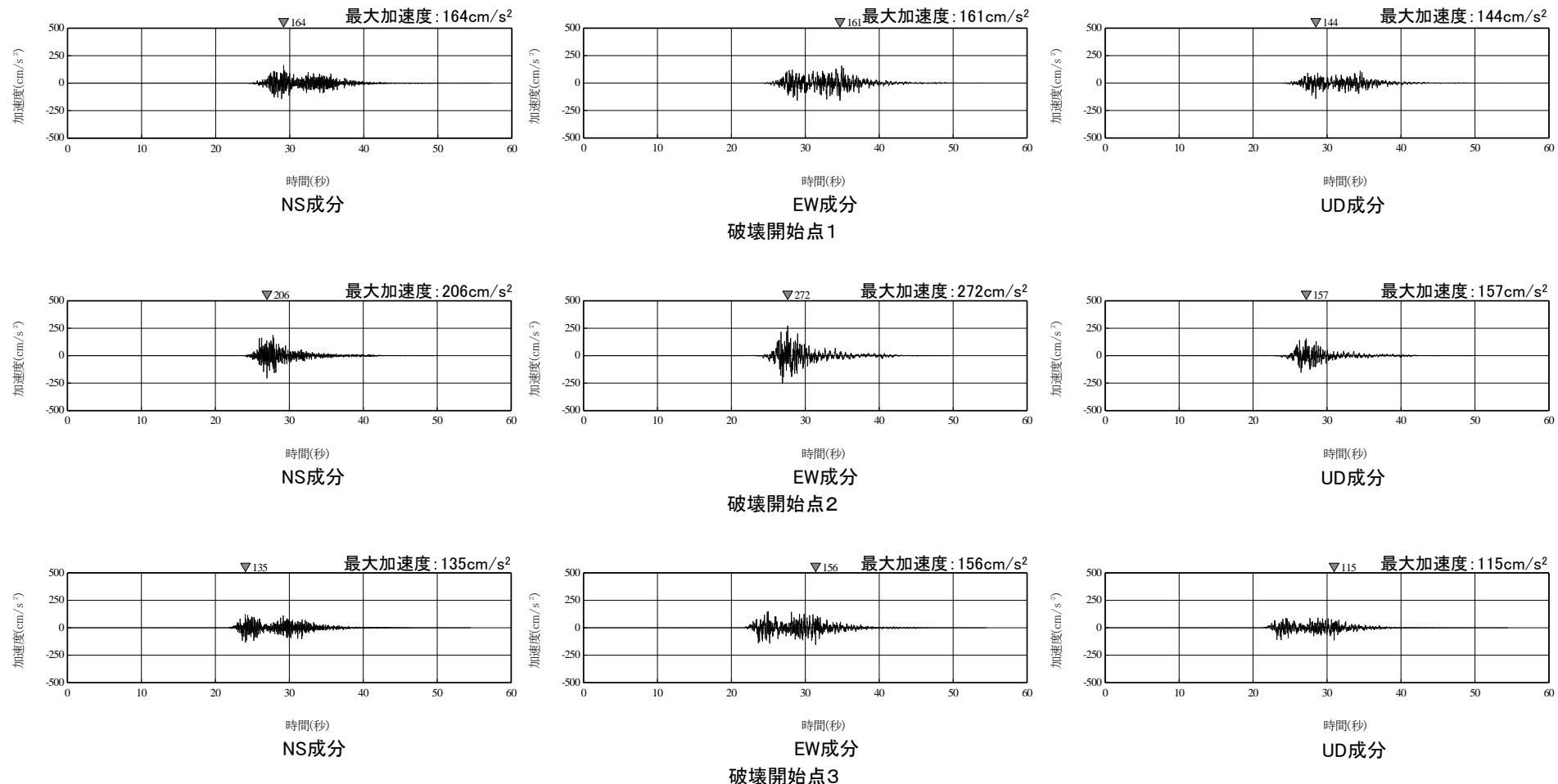
5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ②ケース1(基本ケース) SGFによる加速度波形

3.16地震反映

➤ 敷地下方DC型地震のケース1(基本ケース)(M7.4, 1.0As※)について, 加速度波形を示す。

※: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



敷地下方DC型地震のうちケース1(基本ケース)の加速度波形(PN基準)

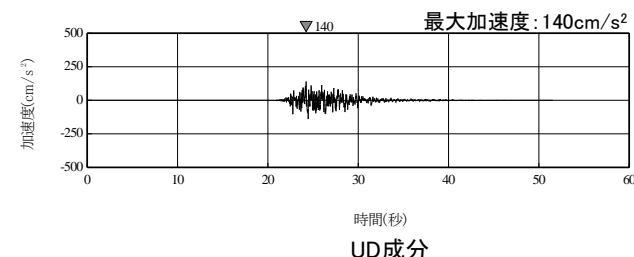
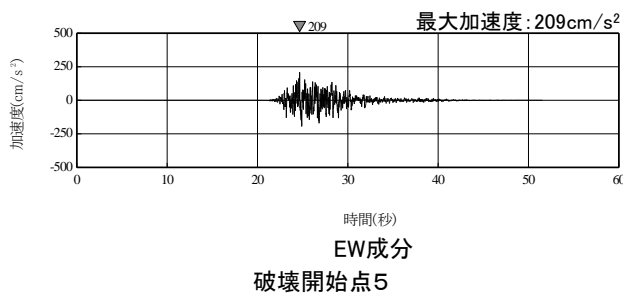
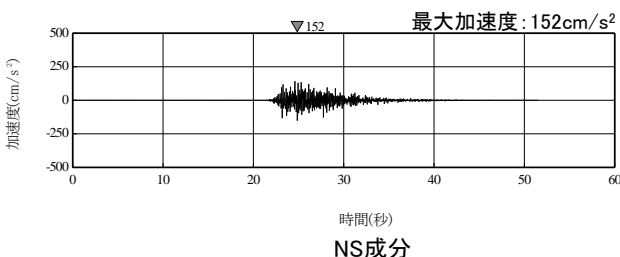
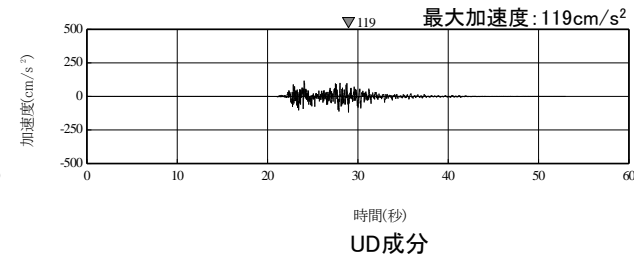
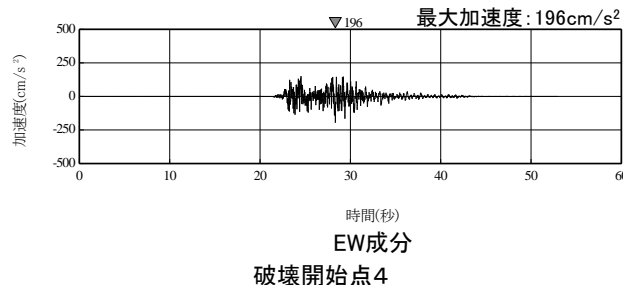
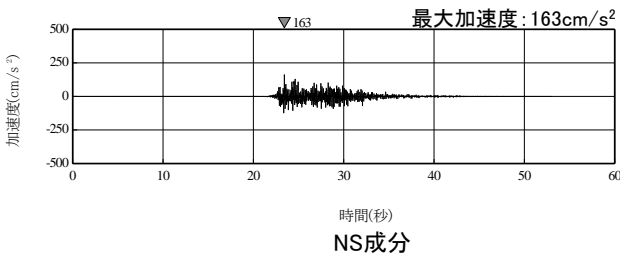
5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ②ケース1(基本ケース) SGFによる加速度波形

3.16地震反映

➤ 敷地下方DC型地震のケース1(基本ケース)(M7.4, 1.0As※)について、加速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



敷地下方DC型地震のうちケース1(基本ケース)の加速度波形(PN基準)

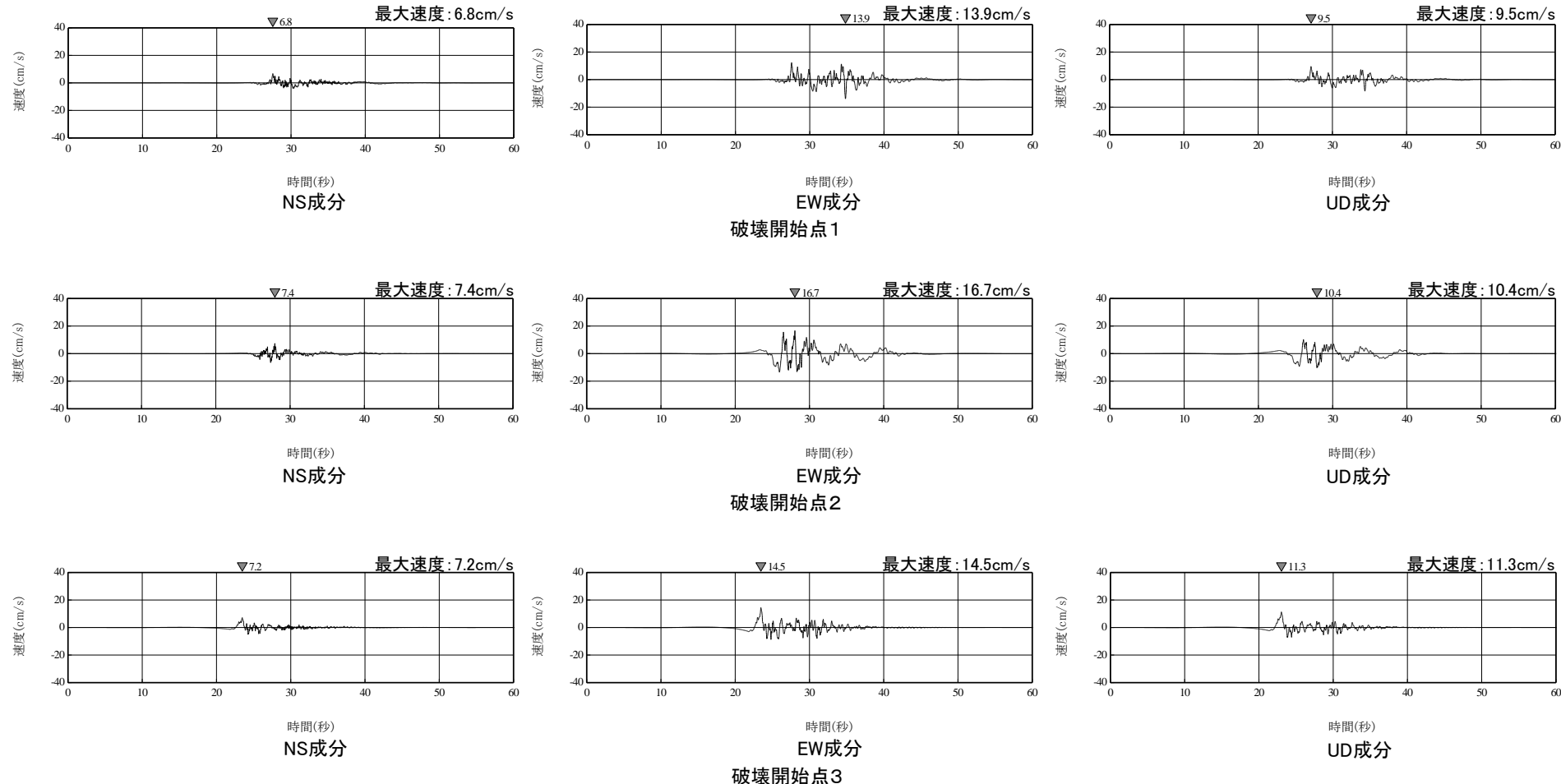
5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ③ケース1(基本ケース) SGFによる速度波形

3.16地震反映

➤ 敷地下方DC型地震のケース1(基本ケース)(M7.4, 1.0As※)について、速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



敷地下方DC型地震のうちケース1(基本ケース)の速度波形(PN基準)

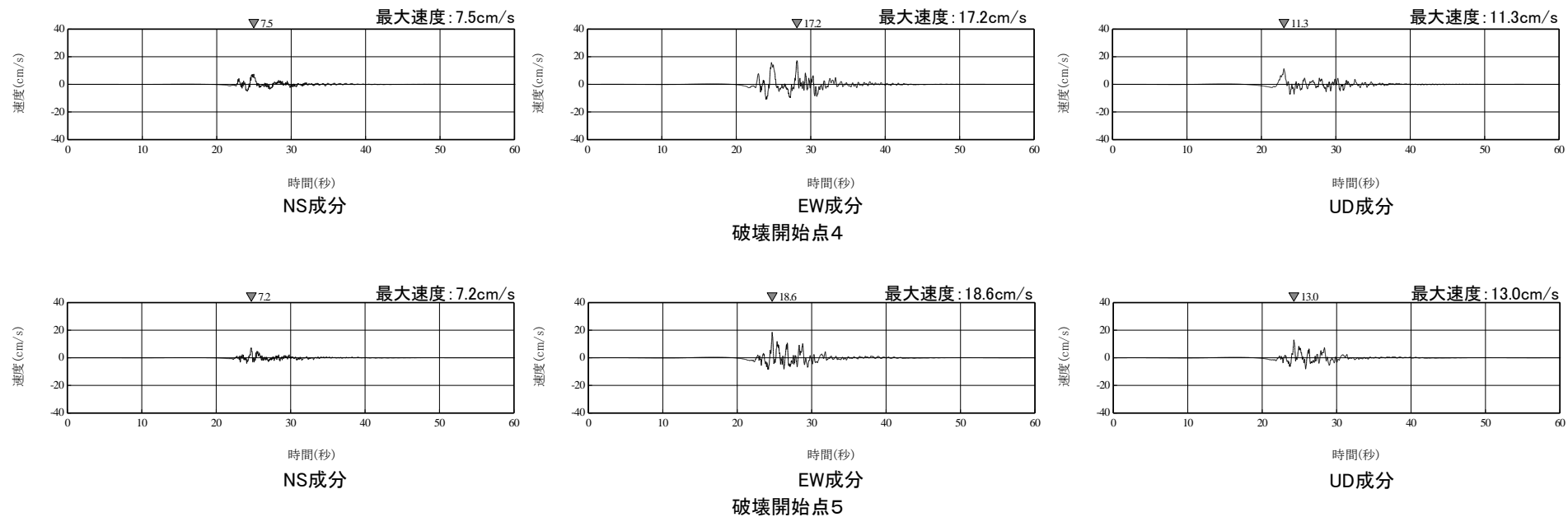
5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ③ケース1(基本ケース) SGFによる速度波形

3.16地震反映

➤ 敷地下方DC型地震のケース1(基本ケース)(M7.4, 1.0As※)について、速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



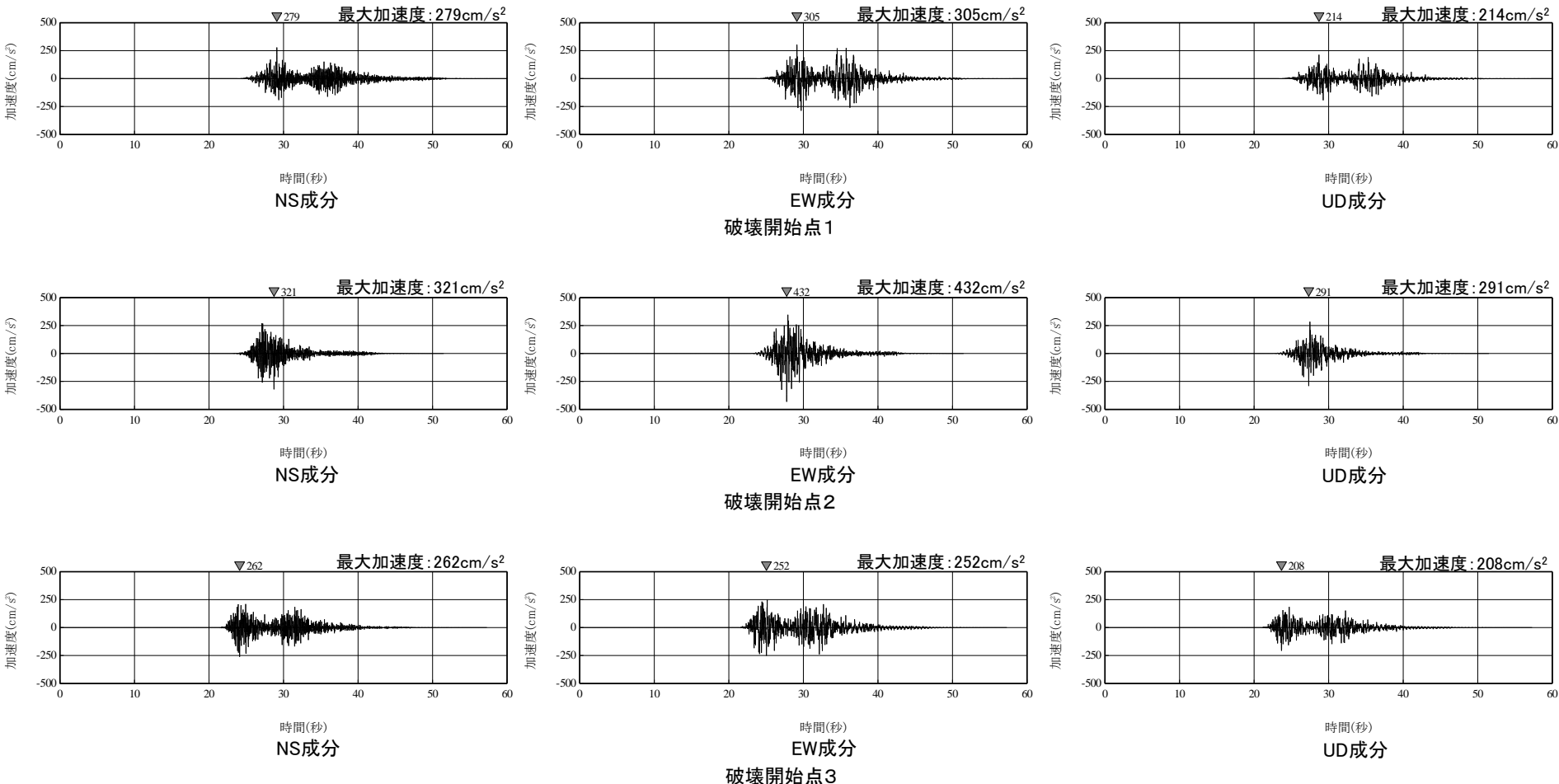
敷地下方DC型地震のうちケース1(基本ケース)の速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ④ケース2(地震規模・短周期レベル) SGFによる加速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース2(地震規模・短周期レベル)(M7.5, 1.5As※)について、加速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



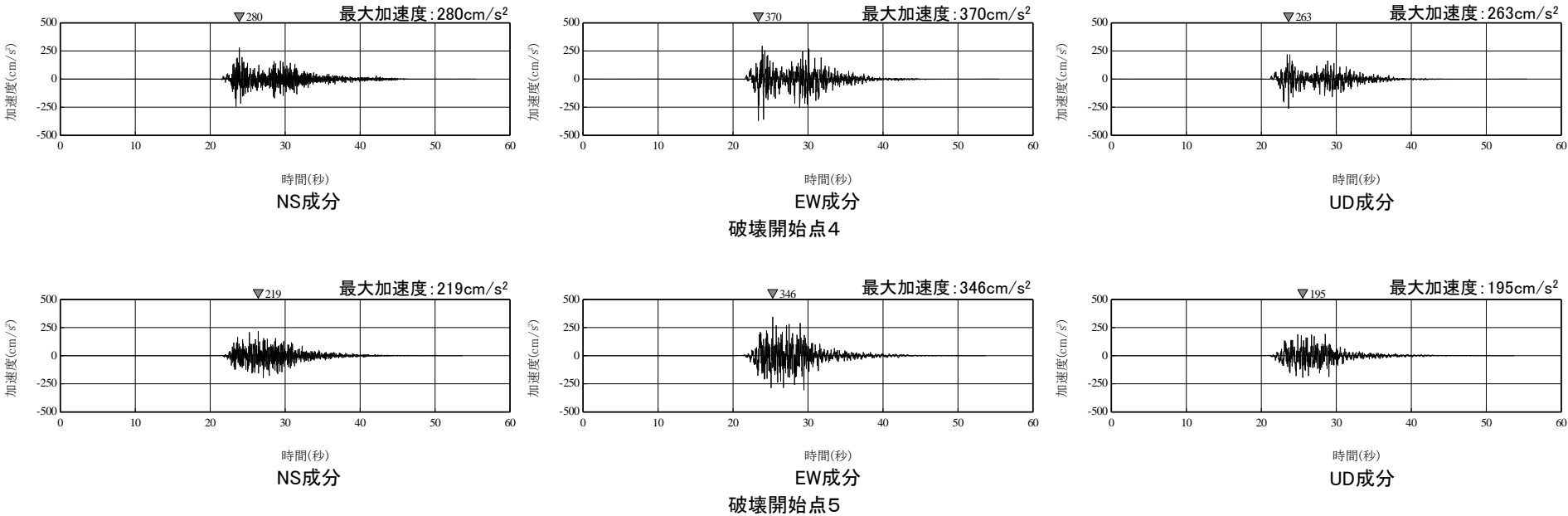
敷地下方DC型地震のうちケース2(地震規模・短周期レベル)の加速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ④ケース2(地震規模・短周期レベル) SGFによる加速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース2(地震規模・短周期レベル)(M7.5, 1.5As※)について、加速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



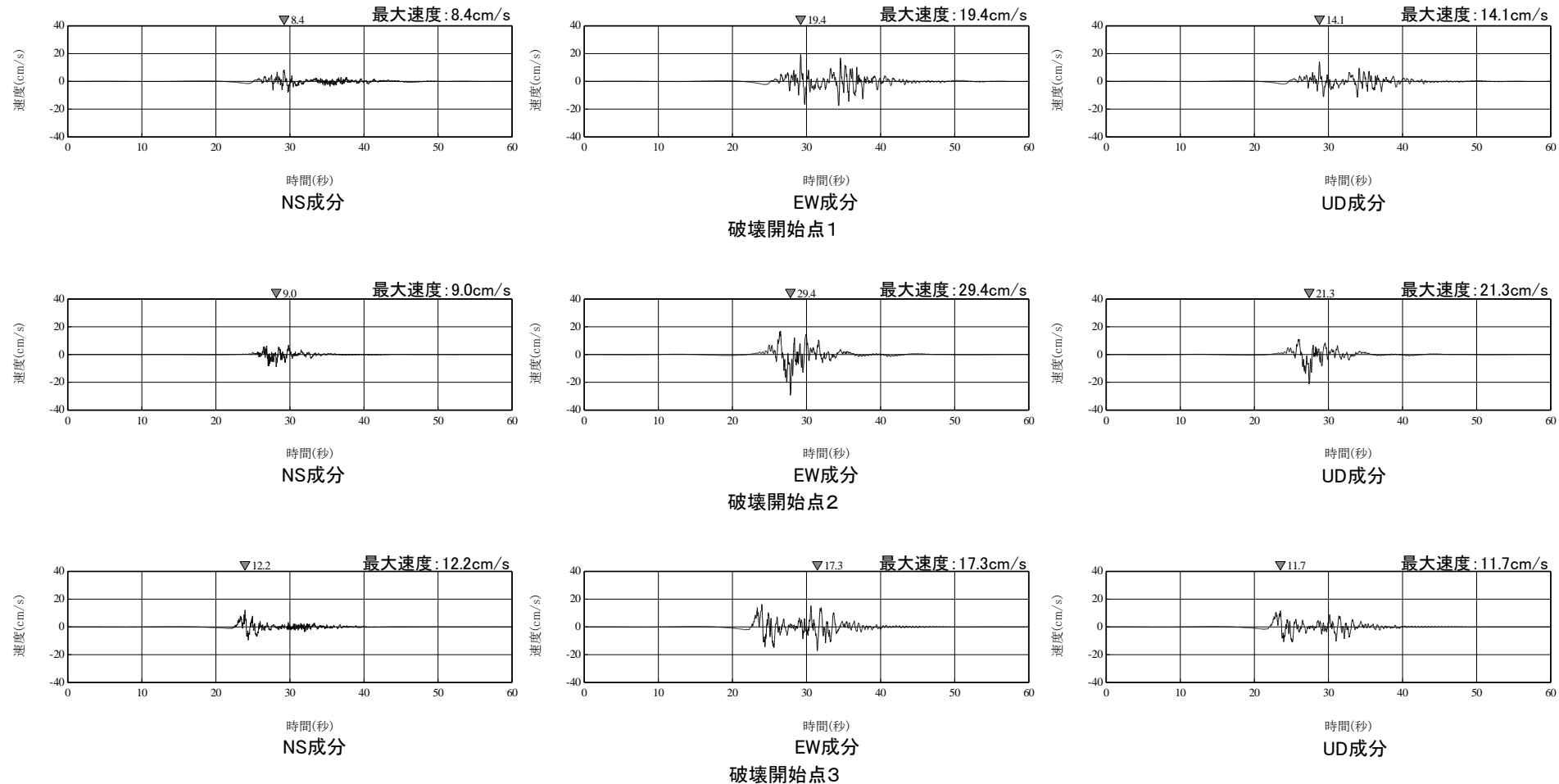
敷地下方DC型地震のうちケース2(地震規模・短周期レベル)の加速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4)断層モデル手法を用いた地震動評価 ⑤ケース2(地震規模・短周期レベル) SGFによる速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース2(地震規模・短周期レベル)(M7.5, 1.5As※)について、速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



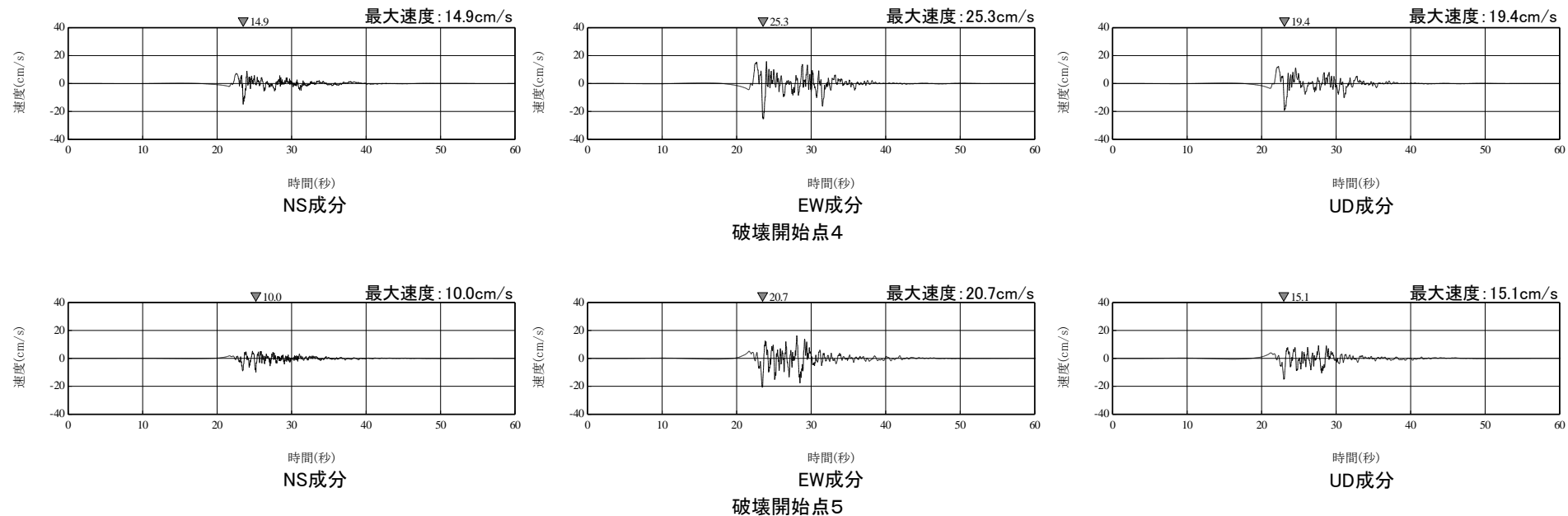
敷地下方DC型地震のうちケース2(地震規模・短周期レベル)の速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4)断層モデル手法を用いた地震動評価 ⑤ケース2(地震規模・短周期レベル) SGFによる速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース2(地震規模・短周期レベル)(M7.5, 1.5As※)について、速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



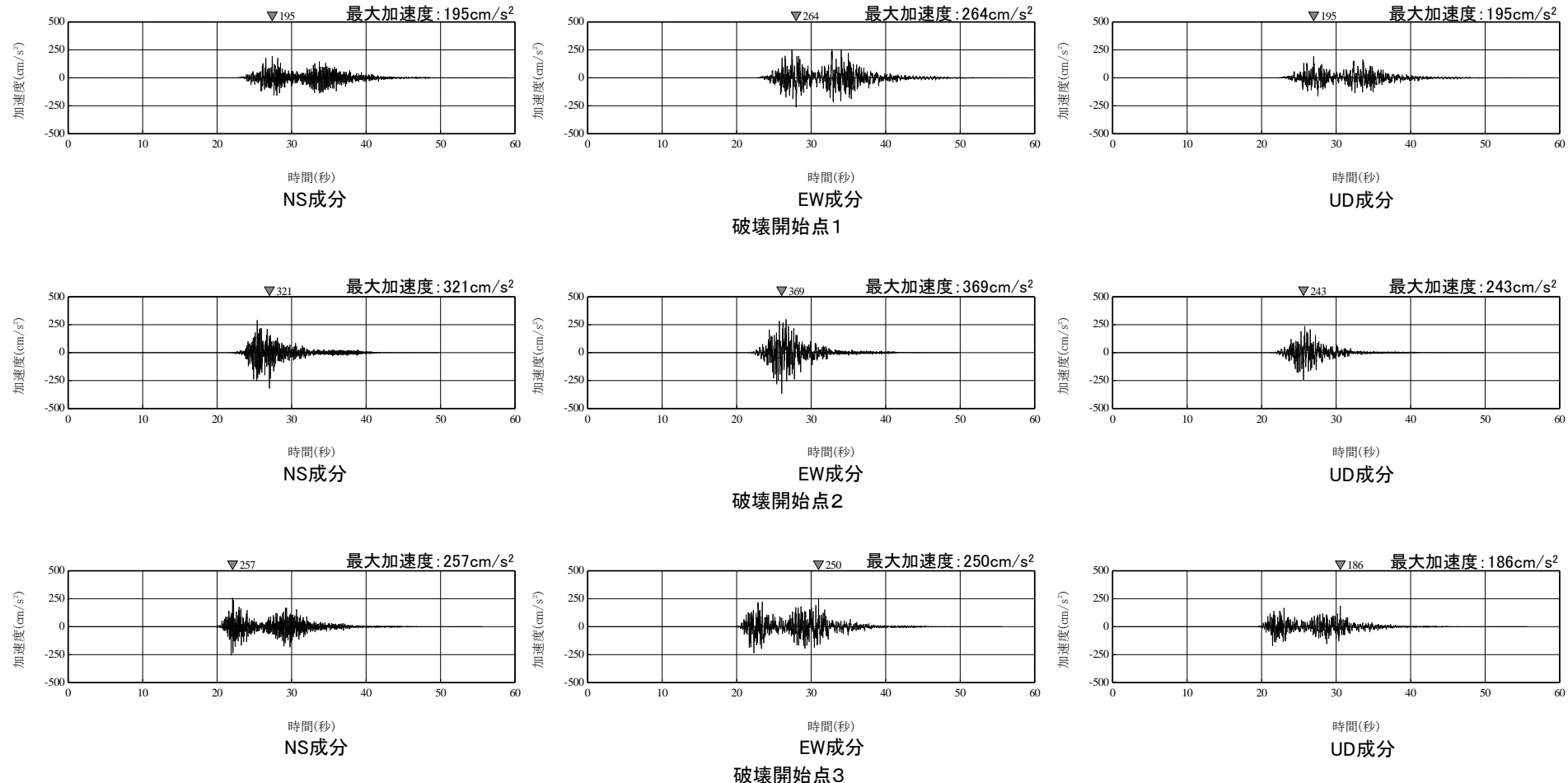
敷地下方DC型地震のうちケース2(地震規模・短周期レベル)の速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4)断層モデル手法を用いた地震動評価 ⑥ケース3(断層位置等) SGFによる加速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース3(断層位置等)(海洋地殻, M7.5, 1.2As*)について, 加速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



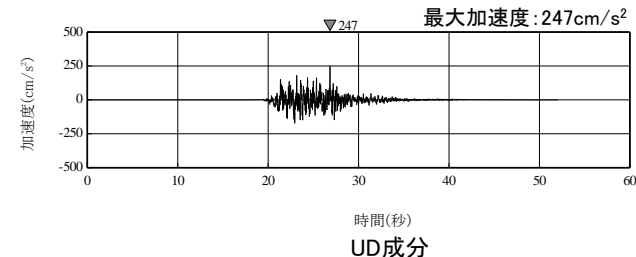
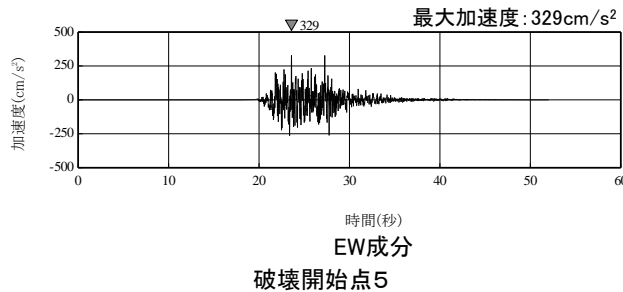
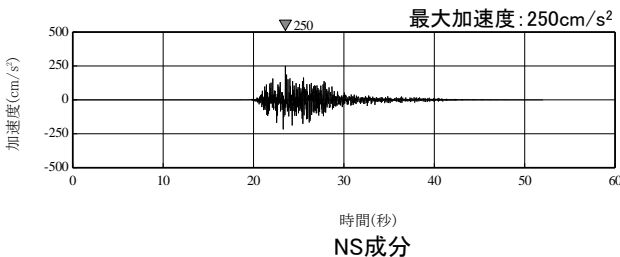
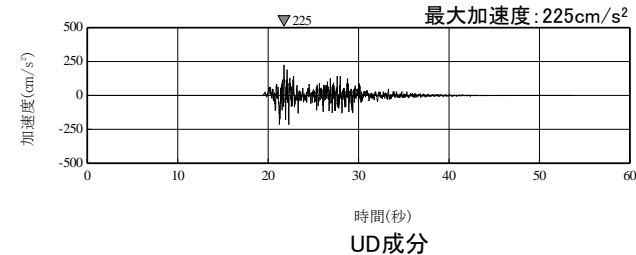
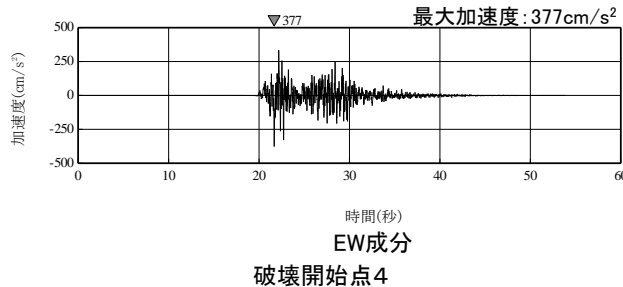
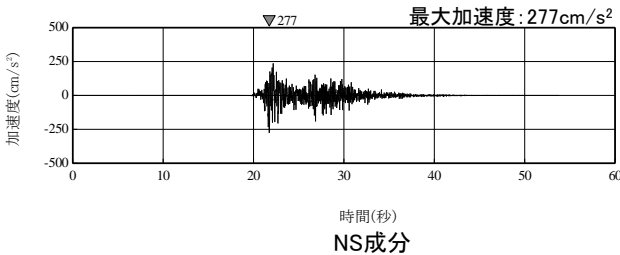
敷地下方DC型地震のうちケース3(断層位置等)の加速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4)断層モデル手法を用いた地震動評価 ⑥ケース3(断層位置等) SGFによる加速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース3(断層位置等)(海洋地殻, M7.5, 1.2As*)について, 加速度波形を示す。

※:地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



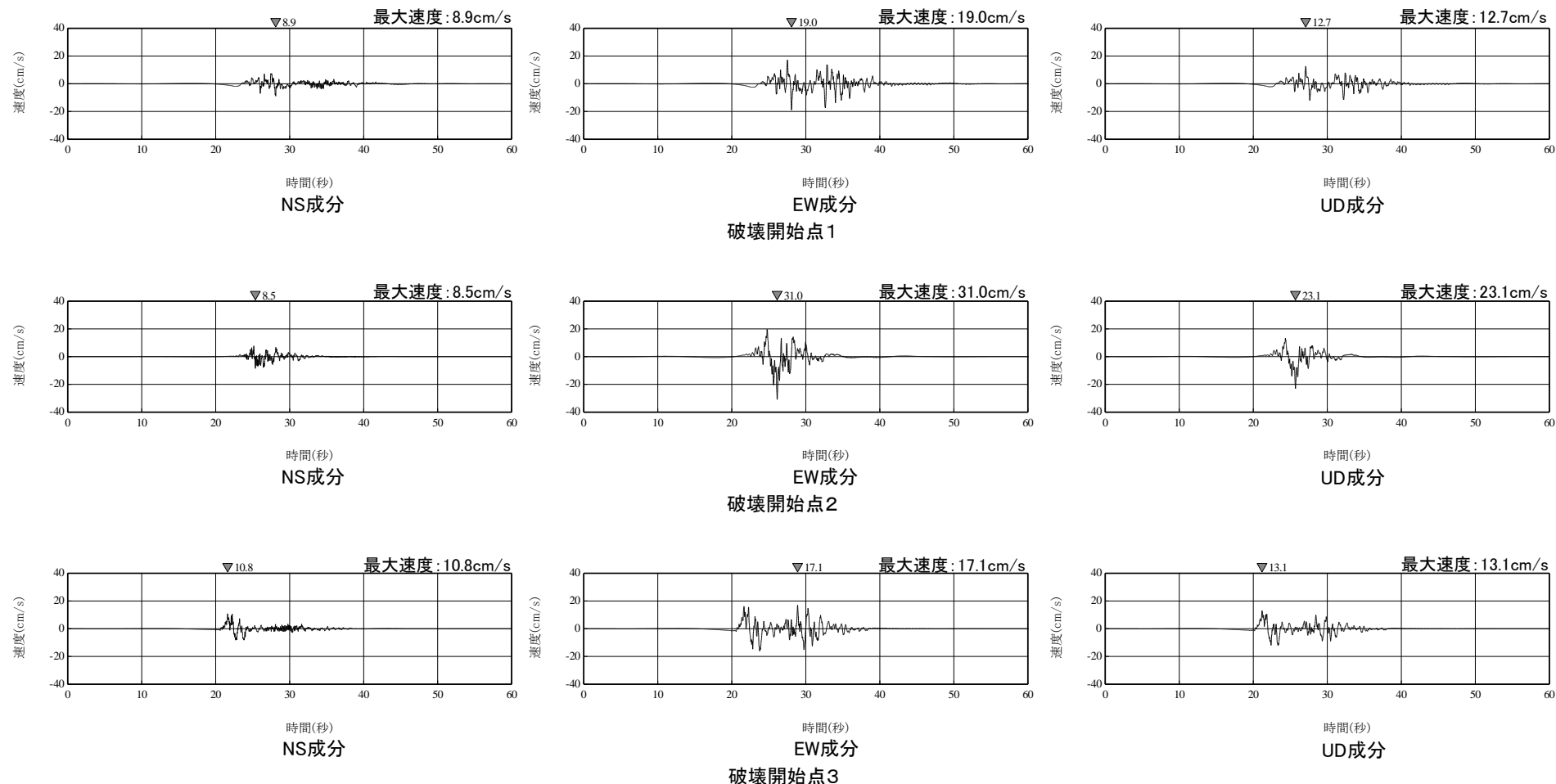
敷地下方DC型地震のうちケース3(断層位置等)の加速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ⑦ケース3(断層位置等) SGFによる速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース3(断層位置等)(海洋地殻, M7.5, 1.2As*)について, 速度波形を示す。

※: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



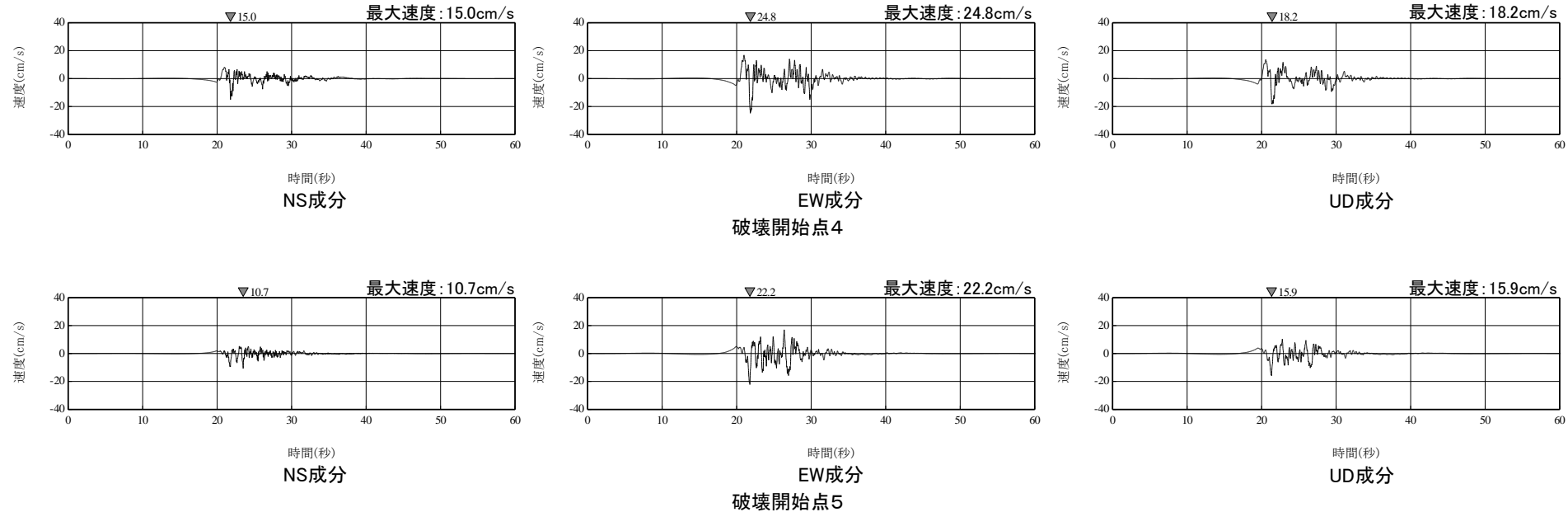
敷地下方DC型地震のうちケース3(断層位置等)の速度波形(PN基準)

5.3 検討用地震の地震動評価

(4) 断層モデル手法を用いた地震動評価 ⑦ケース3(断層位置等) SGFによる速度波形

➤ 敷地下方DC型地震のケース3(断層位置等)(海洋地殻, M7.5, 1.2As*)について, 速度波形を示す。

※: 地震調査研究推進本部(2020)の短周期レベルを1.0Asとする。



敷地下方DC型地震のうちケース3(断層位置等)の速度波形(PN基準)

5.4 海洋プレート内地震の地震動評価 まとめ

- 東北地方及び北海道で発生する海洋プレート内地震の特徴を整理し、地震タイプごとに想定を行った(検討対象地震の想定)。
- 各地震タイプ(検討対象地震)について、基本ケース及び不確かさを考慮した簡易な手法を含めた地震動評価を行い、敷地に対して最も影響の大きい地震タイプとして、二重深発地震上面の地震(東北)[敷地下方DC型地震]を選定した(検討用地震の選定)。
- 敷地下方DC型地震について、不確かさを考慮した想定を行い、応答スペクトルに基づく手法及び断層モデルを用いた手法による地震動評価を行った(検討用地震の地震動評価)。

参考文献(1)

1. 敷地周辺の地震発生状況

1. 宇佐美龍夫, 石井寿, 今村隆正, 武村雅之, 松浦律子(2013):日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会
2. 気象庁(2020):地震月報ほか
3. 気象庁震源リスト:気象庁HP<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily_map/index.html>
4. 村松郁栄(1969):震度分布と地震のマグニチュードとの関係, 岐阜大学教育学部研究報告, 自然科学, 第4巻
5. 勝又譲, 徳永規一(1971):震度IVの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応, 験震時報, 第36巻
6. 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
7. 長谷川昭, 海野徳仁, 高木章雄, 鈴木貞臣, 本谷義信, 亀谷悟, 田中和夫, 澤田義博(1983):北海道および東北地方における微小地震の震源分布一広域の験震データの併合処理一, 地震, 第2輯, 第36巻.

3. 海洋プレート内地震の発生状況と特徴

1. 地震調査研究推進本部(2017a):千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第三版)
2. 地震調査研究推進本部(2019):日本海溝沿いの地震活動の長期評価
3. Seno, T. and M. Yoshida (2004): Where and why do large shallow intraslab earthquakes occur?, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 141, 183-206
4. Seno, T. and Y. Yamanaka(1998): Arc stressed determined by slabs: Implications for mechanisms of back-arc spreading, Geophysical Research letters, Vol.25, No.17, Pages 3227-3230, September 1, 1998
5. Kirby, S. H., Engdahl, E. R. and Denlinger, R. (1996): Intermediate-Depth Intraslab earthquakes and arc volcanism as physical expressions of crustal and uppermost mantle metamorphism in subducting slabs, in Subduction: Top to Bottom edited by Bebout, G. E., Scholl, D., Kirby, S. and Platt, J. P., Geophysical Monograph Series, 96, AGU, Washington, D.C., 347-355, 1996
6. 気象庁(1951~2020):地震月報ほか
7. 地震調査研究推進本部(2017b):地震がわかる! <https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/wakaru_shiryo2.pdf>
8. Kosuga, M., T. Sato, A. Hasegawa, T. Matsuzawa, S. Suzuki, Y. Motoya (1996): Spatial distribution of intermediate-depth earthquakes with horizontal or vertical nodal planes beneath northeastern Japan, Physics of the Earth and Planetary Interiors 93
9. Saeko Kita, T. Okada, A. Hasegawa (2010): The upper and lower planes of the double seismic zone beneath Tohoku and Hokkaido, northeastern Japan, Tectonophysics, 496.
10. S. Kita and K. 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
11. 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
12. Nakajima J., A. Hasegawa, S. Kita(2011): Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault on the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku earthquake, Geophysical Research Letters, Vol.38
13. Ohta Y., S. Miura, M. Ohzono, S. Kita, T. Iinuma, T. Demachi, K. Tachibana, T. Nakayama, S. Hirahara, S. Suzuki, T. Sato, N. Uchida, A. Hasegawa, N. Umino(2011): Large intraslab earthquake (2011 April 7, M7.1) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M9.0): Coseismic fault model based on the dense GPS network data, Earth Planet Space, 63

参考文献(2)

14. 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一, 日本建築学会構造系論文集第77号, 2012年5月
15. 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/>>
16. 地震調査研究推進本部(2020): 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 令和2年(2020年)年5月1日修正版
17. 笹谷努, 森川信之, 前田宣浩(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, 2006
18. 防災科学技術研究所(2021): 2021年2月13日福島県沖の地震の震源分布<<https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushima210213/>>
19. 地震調査研究推進本部(2021): 2021年2月13日福島県沖の地震の評価<https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2021/20210213_fukushima_2.pdf>
20. 防災科学技術研究所(2021): 近地強震記録を用いた2021年2月13日福島県沖で発生した地震の震源インバージョン解析<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/FukushimakenOki_20210213/inversion/inv_index.html>
21. 大野晋(2021): 2021年2月13日福島県沖の地震(M7.3) 地震動について, 東北大学災害科学国際研究所HP, <https://irides.tohoku.ac.jp/research/prompt_investigation/2021fukushima-eq.html>
22. 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
23. Nakajima J., Y. Tsuji, A. Hasegawa, S. Kita, T. Okada, T. Matsuzawa(2009): Tomographic imaging of hydrated crust and mantle in the subducting Pacific slab beneath Hokkaido, Japan : Evidence for dehydration embrittlement as a crust of intraslab earthquakes, Gondwana Research 16
24. Izutani, Y. (2011) : Fault extent of the largest aftershock of the 1968 Tokachi-Oki, Japan, earthquake and an interpretation of the normal faulting focal mechanism, Earth Planets Space, 63, 2011
25. 防災科学技術研究所(2022): 2022年3月16日福島県沖の地震, <<https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushima220316/?LANG=ja&m=summary>>
26. 地震調査研究推進本部(2022): 2022年3月16日福島県沖の地震の評価, <https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/20220316_fukushima_2.pdf>
27. 防災科学技術研究所(2023): 2022年3月16日福島県沖の地震, <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/fukushima_20220316/inversion/inv_index.html>
28. 日本建築学会東北支部災害調査連絡会(2022): 令和4(2022)年3月16日の福島県沖の地震 災害調査速報, <http://saigai.aij.or.jp/saigai_info/20220316_fukushima_oki/20220316_fukushima_oki_chousasokuho_TOHOKU_B.pdf>
29. 新井健介, 吉田昌平, 田中信也, 熊谷周治(2022): 2022年3月16日福島県沖の地震の強震動生成域の推定, 日本地震工学会第17回年次大会梗概集, TS_20220055.
30. 吉田昌平, 津田健一, 佐藤俊明(2022): 2022年3月16日福島県沖地震(M7.4)の強震記録を用いた断層破壊過程の推定 その2 経験的グリーン関数法を用いた強震動生成域(SMGA)の推定, 日本建築学会学術講演会梗概集(北海道), pp. 65-66, 2022
31. 津田健一, 吉田昌平, 佐藤俊明, Chen Ji-Ralph J. Archuleta (2022): 2022年3月16日福島県沖地震(M7.4)の強震記録を用いた断層破壊過程の推定 その1 波形インバージョン解析, 日本建築学会学術講演会梗概集
32. 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, No.2, B25
33. 芝良昭(2022): 東北太平洋沖で近年発生したスラブ内地震の広帯域震源特性, 日本地震工学会第17回年次大会梗概集, TS_20220053
34. Nakajima J., Y. Tsuji, A. Hasegawa, S. Kita, T. Okada, T. Matsuzawa(2009): Tomographic imaging of hydrated crust and mantle in the subducting Pacific slab beneath Hokkaido, Japan : Evidence for dehydration embrittlement as a crust of intraslab earthquakes, Gondwana Research 16
35. Izutani, Y. (2011) : Fault extent of the largest aftershock of the 1968 Tokachi-Oki, Japan, earthquake and an interpretation of the normal faulting focal mechanism, Earth Planets Space, 63, 2011

参考文献(3)

4. 海洋プレート内地震の検討用地震の選定

1. 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
2. 地震調査研究推進本部(2020):震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 令和2年(2020年)年5月1日修正版
3. Saeko Kita, T. Okada, A. Hasegawa (2010) : The upper and lower planes of the double seismic zone beneath Tohoku and Hokkaido, northeastern Japan, *Tectonophysics*, 496
4. Nakajima J., A. Hasegawa, S. Kita(2011): Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault on the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol.38
5. 防災科学技術研究所(2019):地震ハザードステーション(J-SHIS), <https://doi.org/10.17598/nied.0010>
6. 佐藤智美(2013):東北地方のアウトャーライズ地震, 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
7. 公益社団法人土木学会(2002):原子力発電所の津波評価技術, 土木学会原子力土木委員会津波評価部会
8. 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長(1991):地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測:統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, 1-9
9. 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, No.2, B25
10. 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/>)
11. 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
12. Kanamori H.(1977) :The Energy Release in Great Earthquakes, *Journal of Geophysical Research* Vol.82 No.20
13. Geller, R.J. (1976) :Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66
14. Morikawa N., Sasatani T.(2004) :Source Models of Two Large Intraslab Earthquakes from Broadband Strong Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.94, No.3, 2004
15. 笹谷努, 森川信之, 前田宣浩(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, 2006
16. Takeo, M., S. Ide, Y. Yoshida(1993) :The 1993 Kushiro-Oki, Japan, earthquake : A high stress-drop event in a subducting slab, *Geophys. Res. Lett.*, 20
17. 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~
18. Kikuchi, M., H. Kanamori(1995) :The Shikotan earthquake of October 4, 1994 : Lithospheric earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 22

参考文献(4)

5. 海洋プレート内地震(検討用地震)の地震動評価

1. 地震調査研究推進本部(2020):震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 令和2年(2020年)年5月1日修正版
2. 瀬野徹三(2020):三重地震面再訪 -プレート収束の新しい描像としての“超沈み込み”-, 地震 第2輯 第73巻
3. 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
4. 笹谷努, 森川信之, 前田宣浩(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, 2006
5. 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/>>
6. S. Kita and K. 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
7. 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
8. Nikolas I. Christensen (1996):Poisson's ratio and crustal seismology, J. Geophys. Res., 101(B2), 3139-3156
9. 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
10. 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)
11. 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
12. Kanamori H.(1977):The Energy Release in Great Earthquakes, Journal of Geophysical Research Vol.82 No.20
13. Geller, R.J. (1976):Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, 66
14. 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅昭(2006):短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集A, Vol.62
15. 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長(1991):地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測:統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, 1-9
16. 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, No.2, B25