

東通原子力発電所
基準地震動策定のうち地下構造の評価について
(コメント回答)

2020年10月2日
東北電力株式会社

審査会合におけるコメント

| No. | コメント時期 | コメント内容 | 今回ご説明資料の掲載箇所 |
|------|-----------------------|--|-----------------------------|
| S164 | 令和2年6月4日 第865回審査会合 | 原子炉建屋基礎地盤の速度構造について、弾性波探査等、PS検層以外の調査結果があれば示すこと。 | 本資料 p.32 |
| S165 | 令和2年6月4日 第865回審査会合 | 解放基盤表面(T.P.-16.3m)とその振動特性を評価する自由地盤位置(T.P.+2.0m)のせん断波速度や岩種の関係が分かるように根拠も含め明記すること。 | 本資料 p.39 補足説明資料 p.58 |
| S166 | 令和2年6月4日 第865回審査会合 | 自由地盤の鉛直アレイを用いた検討として応答スペクトル比や伝達関数を提示しているが、1次固有周期等の共通する特徴について、記載の充実を図ること。 | 本資料 p.102 |
| S167 | 令和2年6月4日 第865回審査会合 | 敷地内臨時高密度観測の検討における表層地盤が基準化スペクトル形状に与える影響の検討に関し、地盤種別の違いの影響についての説明を充実させること。また、全観測点の微動アレイ探査結果も示すこと。 | 本資料 p.72 補足説明資料 p.55, 56 |
| S168 | 令和2年6月4日 第865回審査会合 | 地盤モデルの策定では地震動評価の違い等から浅部地盤と深部地盤に区分けした上で検討を行っているが、区分け根拠が明確に分かるように記載を充実させること。 | 本資料 p.98, 99 |
| S169 | 令和2年6月4日 第865回審査会合 | 浅部地盤モデルの策定において、信号成分に基づく検討及び観測記録に基づく検討の2つを行っているが、それらの位置付け・関係についてより詳細に説明を加えること。 | 本資料 p.100, 148 |

前回審査会合(第865回)からの主な変更内容 その1

1. 地下構造の評価方針

- 変更なし。

赤文字:コメント対応

2. 敷地の地質・地質構造

2.1 敷地の地質及び地質構造

- 変更なし。

2.2 敷地の地質及び地質構造

- 敷地における屈折法弾性波探査結果を記載した[S164]。

3. 敷地地盤の振動特性

3.1 解放基盤表面の設定

- 解放基盤表面(T.P.-16.3m)及び解放基盤表面の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)について、せん断波速度と岩種について記載した[S165]。

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

- 変更なし。

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

- 変更なし。

3.4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較

- 変更なし。

3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

- 表層地盤が基準化スペクトルの形状に与える影響の検討に関し、地盤種別の区分の考え方を記載した[S167]。
- 全観測点における微動アレイの結果を記載した(補足説明資料)[S167]。

前回審査会合(第865回)からの主な変更内容 その2

3.6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討

- 変更なし。

3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較

- 変更なし。

赤文字:コメント対応

4. 地盤モデルの設定

4.1 設定概要

- 深部地盤モデルと浅部地盤モデルの区分について、記載の充実を図った[S168]。

4.2 浅部地盤モデルの作成

- 浅部地盤モデルの設定における信号成分に基づく検討及び観測記録に基づく検討の位置づけ及び考え方について詳細に記載した[S169]。
- 伝達関数の検討で得られた地盤の一次固有振動数を明記した[S166]。

5. 地盤モデルの妥当性の検証

- 変更なし。

目次(1)

| | |
|--|-----|
| 1. 地下構造の評価方針 | 6 |
| 2. 敷地の地質・地質構造 | 8 |
| 2.1 敷地の地質及び地質構造 | 9 |
| 2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 | 16 |
| 2.3 まとめ | 35 |
| 3. 敷地地盤の振動特性 | 36 |
| 3.1 解放基盤表面の設定 | 37 |
| 3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤) | 41 |
| 3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討 | 49 |
| 3.4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較 | 64 |
| 3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討 | 70 |
| 3.6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討 | 84 |
| 3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較 | 89 |
| 3.8 まとめ | 96 |
| 4. 地盤モデルの設定 | 97 |
| 4.1 設定概要 | 98 |
| 4.2 浅部地盤モデルの作成 | 100 |
| 4.3 深部地盤モデルの作成 | 109 |
| 4.4 地震動評価用地盤モデルの設定 | 116 |

目次(2)

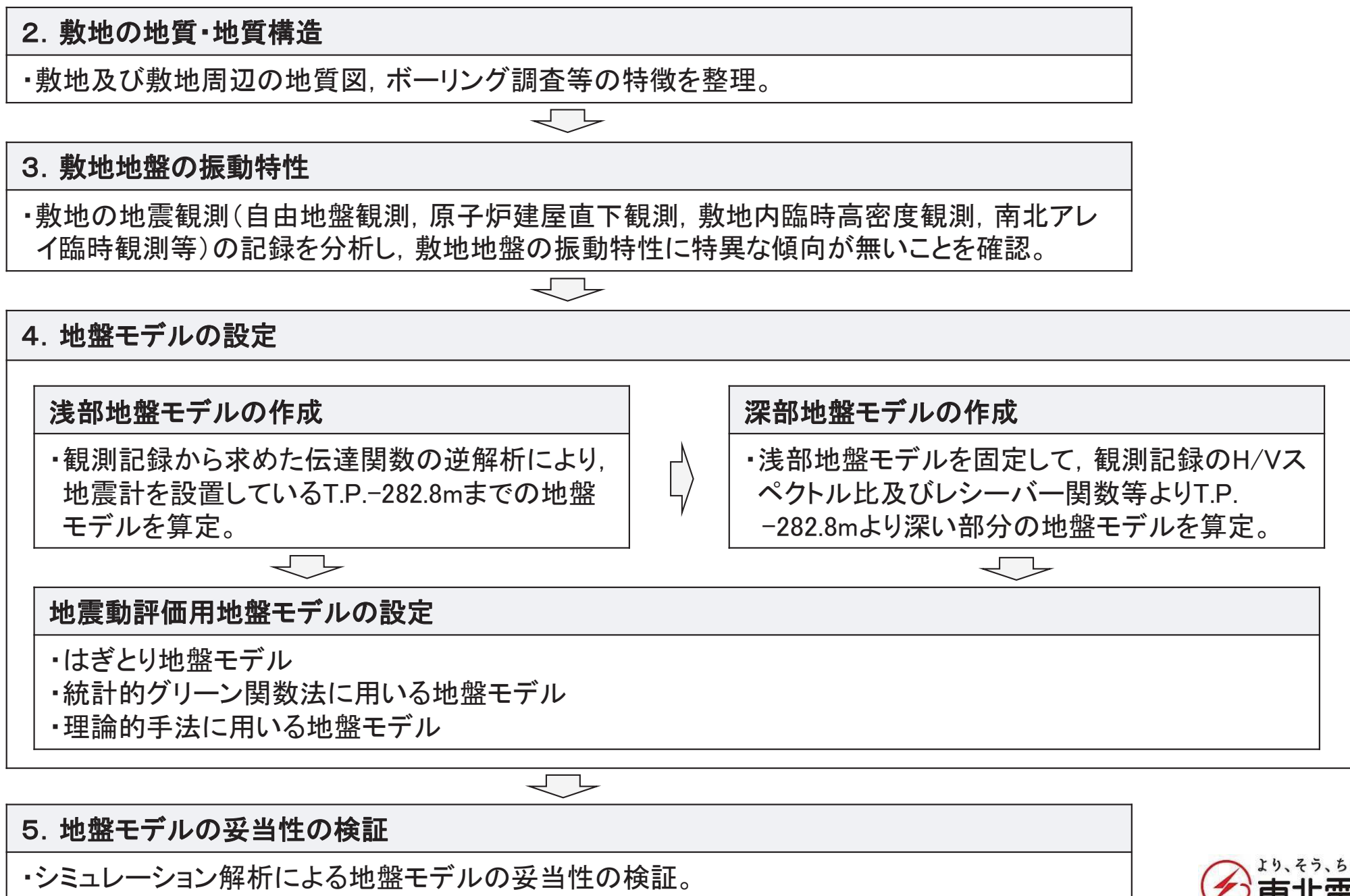
| | |
|--|-----|
| 5. 地盤モデルの妥当性の検証 | 121 |
| 5.1 検討の概要 | 122 |
| 5.2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション | 123 |
| 5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 | 129 |
| 5.4 2008年岩手県沿岸北部の地震のSGFによる強震動シミュレーション | 140 |
| 6. まとめ | 143 |
| ・参考文献 | 145 |
| ・参考資料 | 147 |
| 参考1. 観測記録の信号成分から伝達関数を求める方法 | 148 |
| 参考2. 前回提示地盤モデルとの差異 | 153 |

1. 地下構造の評価方針

1.1 地下構造の評価方針

1. 1 地下構造の評価方針

(1) 全体概要

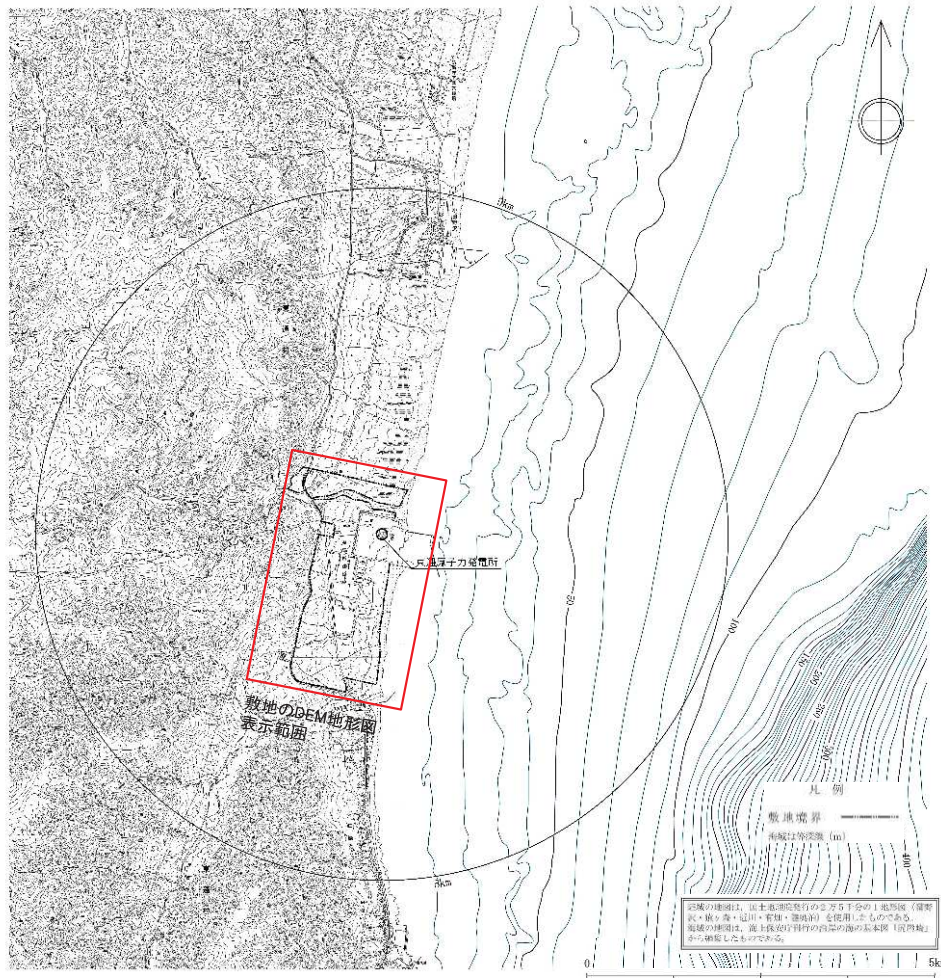


2. 敷地の地質・地質構造

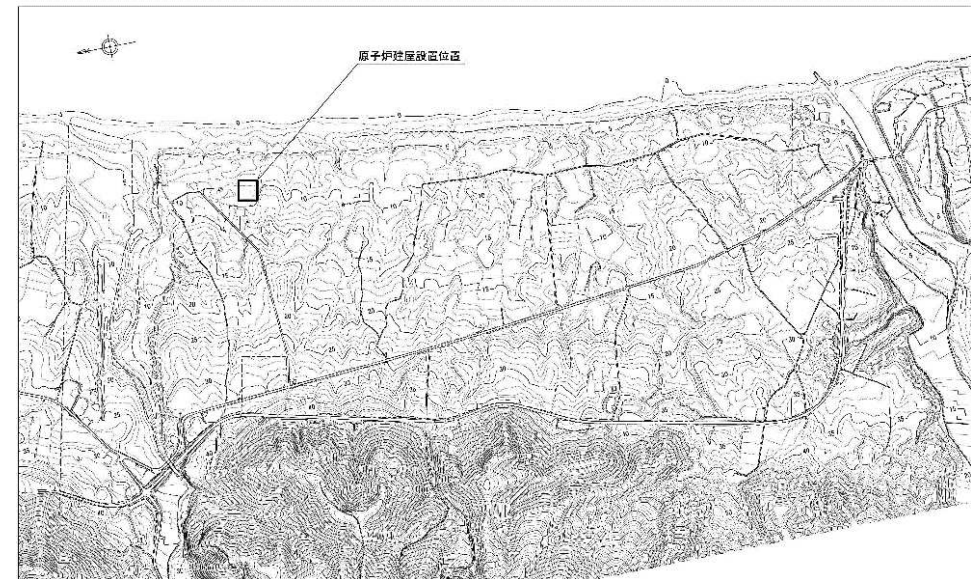
- 2. 1 敷地の地質及び地質構造
- 2. 2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性
- 2. 3 まとめ

2. 1 敷地の地質及び地質構造 (1) 敷地の地形

- 敷地は、海岸線に沿って南北方向に分布する標高約10m～約40mの台地に位置している。
- 敷地の西部～南部には原地形が残存している。
- 敷地西側は、開析が進行した丘陵よりなる。



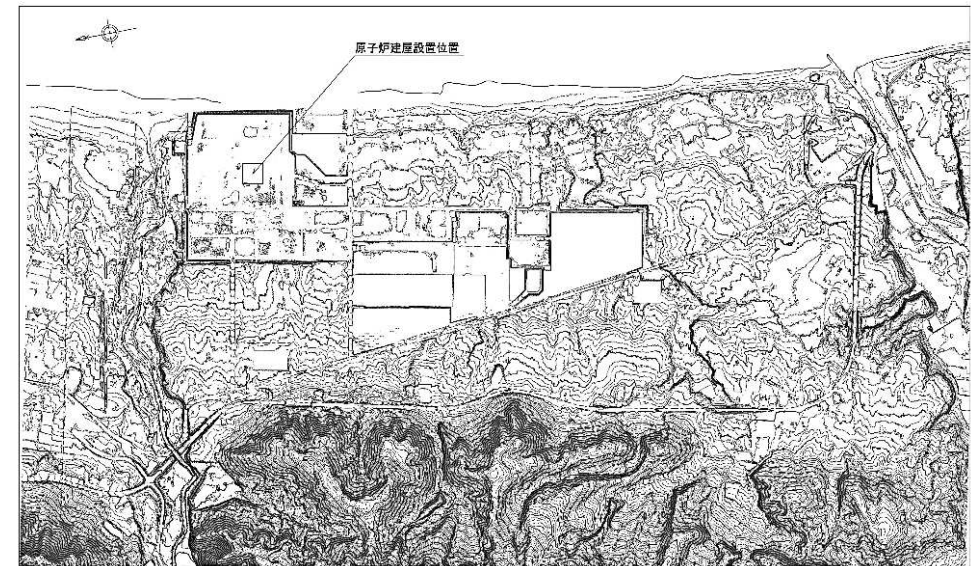
敷地近傍の地形図



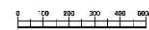
空中写真(平成5年撮影)から作成



敷地のDEM地形図(敷地造成前)



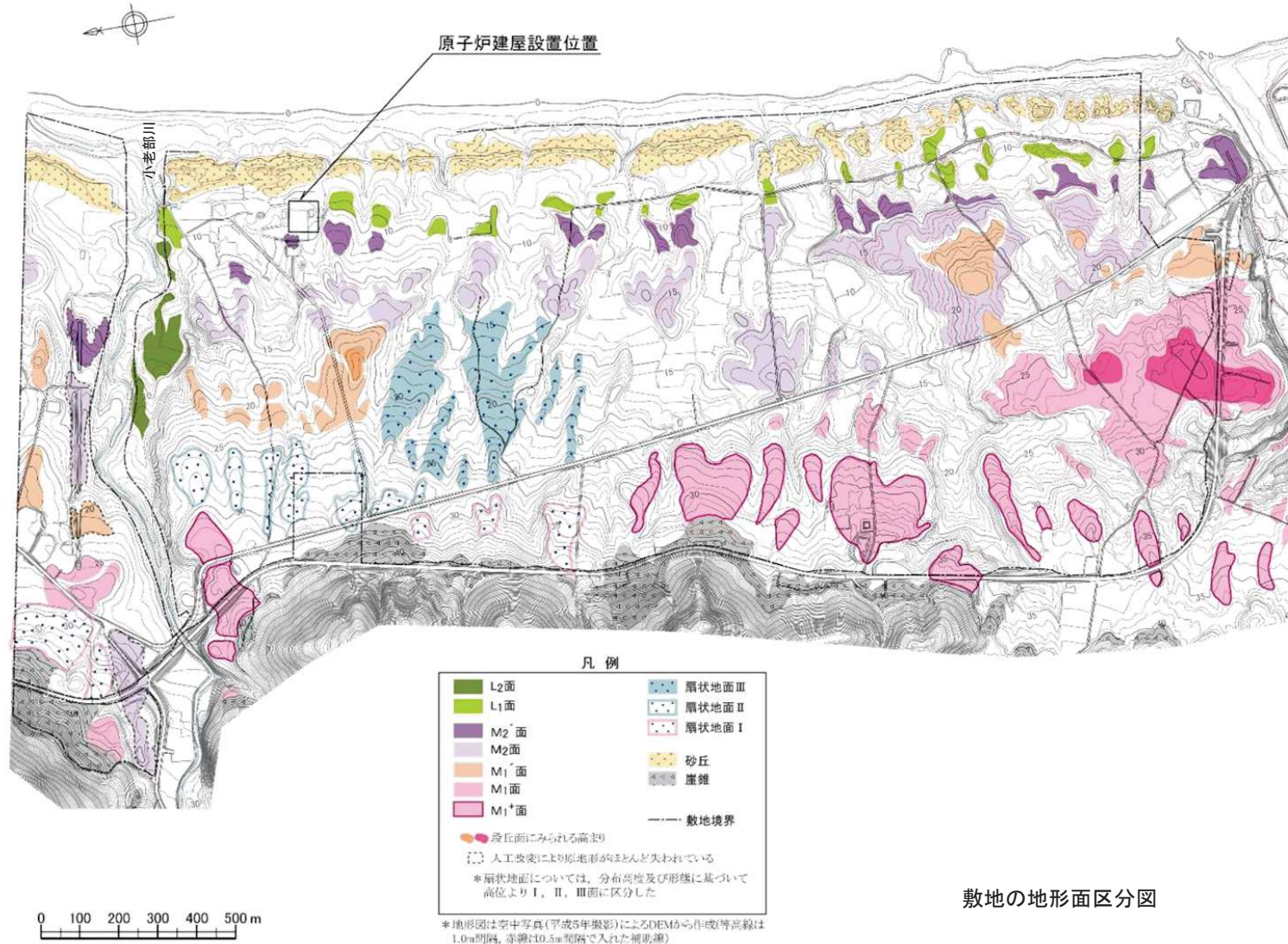
航空レーザー測量(平成19年)によるDEMから作成



敷地のDEM地形図(敷地造成後)

2. 1 敷地の地質及び地質構造 (2) 敷地の地形(敷地の地形面区分)

- 敷地の段丘は、段丘面の形態、高度、分布状況及び連続性、開析度、堆積物の層相、火山灰層との層位関係等について、敷地周辺陸域の段丘面との検討を行い、高位より、M₁面、M₁'面、M₂面及びL₁面に区分される。
- M₁面については若干の高度差によって、M₁⁺面及びM₁面に、M₂面についてはM₂面及びM₂'面に細分される。
- 敷地北部には、小老部川が東流して太平洋に注いでおり、この小老部川に沿って幅約60m～約100mの低地が分布する。
- 空中写真判読、航空レーザー測量による2mDEMデータによる詳細地形判読等の再調査を行った結果、断層の活動を示唆するリニアメント、変動地形の可能性のある地形及び地すべり地形は認められなかった。

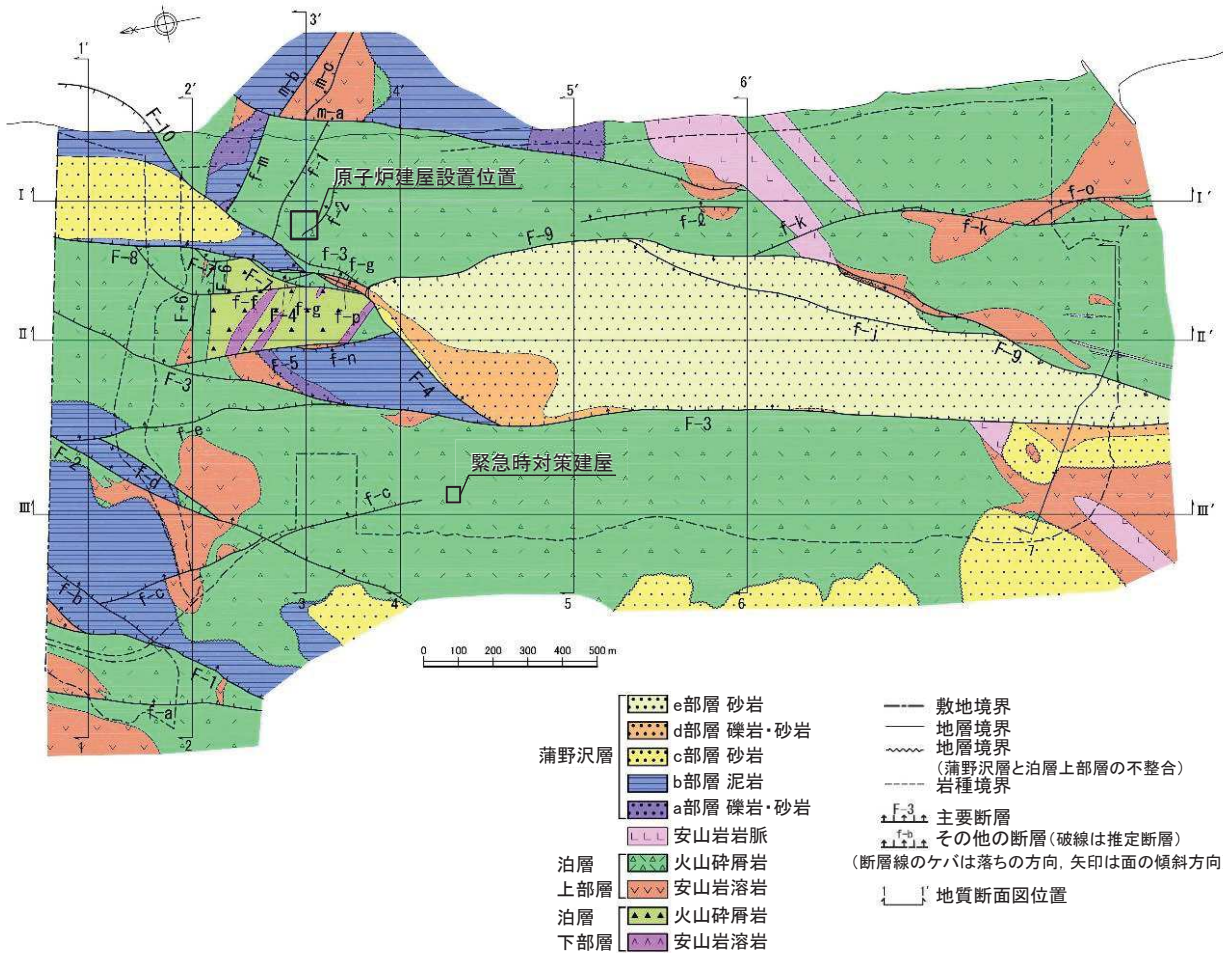


敷地の地形面区分図

2. 1 敷地の地質及び地質構造

(3) 敷地の地質・地質構造(敷地の地質層序と地質構造)

- 敷地の新第三系は、下位より、新第三系中新統の猿ヶ森層、泊層及び蒲野沢層で構成され、泊層には安山岩が貫入する。
- 泊層上部層分布域に、地塁状をなして泊層下部層が分布し、半地溝状～地溝状をなして蒲野沢層が分布する。
- 猿ヶ森層は、敷地においては地表付近には分布しない。
- 敷地の主要な断層は、これらの地質分布を規制する正断層である。



敷地の新第三系の地質構造図

敷地の新第三系の地質層序表

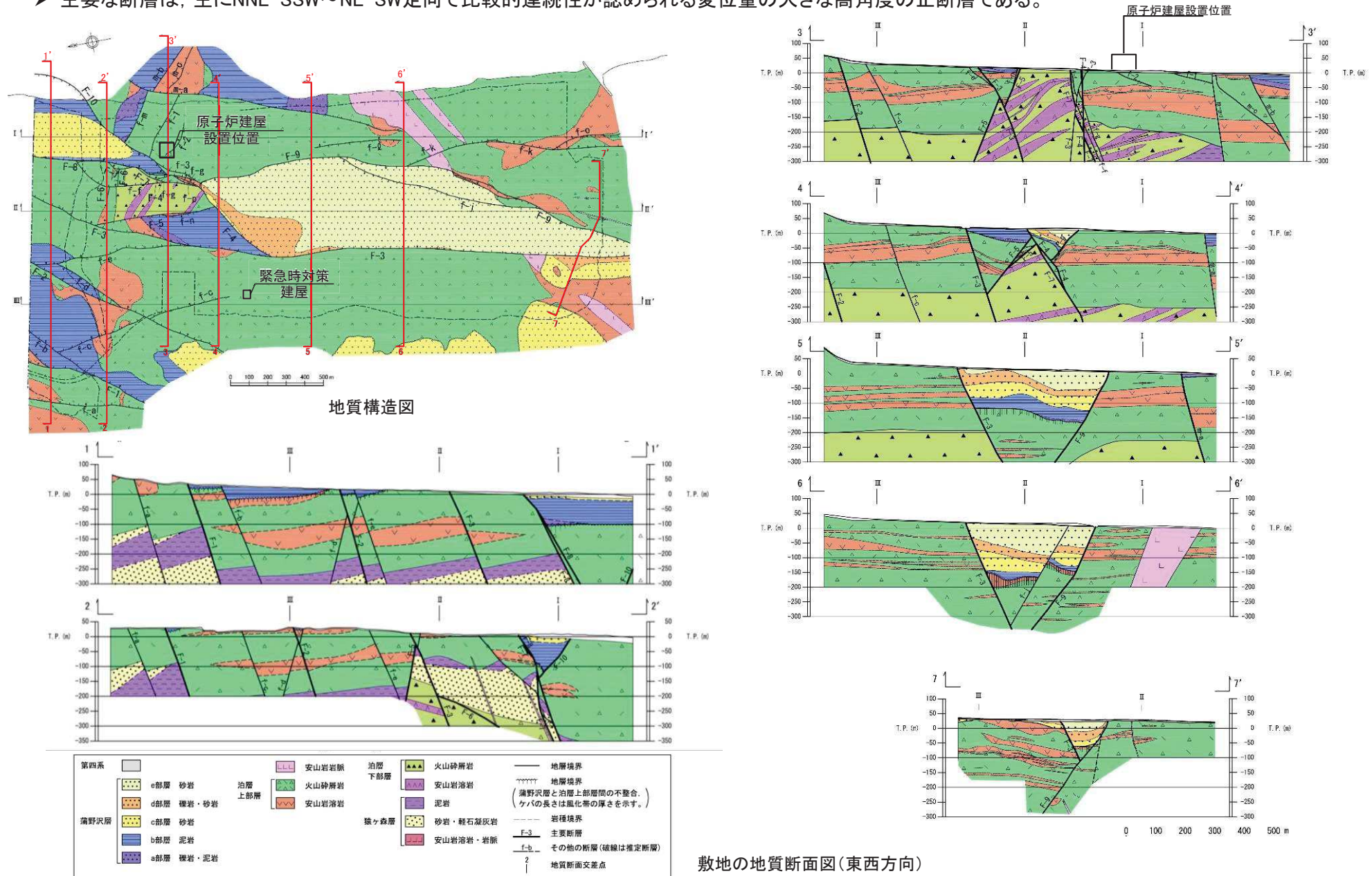
| 地質時代 | 地層名 | 模式柱状図 | 主要岩相 | | | |
|------|-----|-------|----------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| 新第三紀 | 第四紀 | 第四系 | 未固結～半固結の砂礫、砂、粘性土、ローム | | | |
| | | 中新世 | 蒲野沢層 | e部層 | 細粒～中粒砂岩、 極細粒砂岩・シルト岩互層(サガリテスを含む) | |
| | | | | d部層 | 細礫岩・粗粒砂岩互層、極細粒～中粒砂岩、凝灰岩 | |
| | | | | c部層 | 中粒～粗粒砂岩(貝殻片を含む)、 細粒砂岩、礫岩 | |
| | | | | b部層 | 泥岩(亜炭、カキ床、凝灰岩を挟む)、 中粒～粗粒砂岩(亜炭、凝灰岩を挟む)、礫岩 | |
| | a部層 | | | 礫岩、中粒～粗粒砂岩、砂混じり泥岩 化石は確認されていない。 | | |
| | 前期 | 泊層上部層 | 安山岩岩脈 | 安山岩溶岩 凝灰角礫岩 火山礫凝灰岩 凝灰岩 | | |
| | | | | 安山岩 | | |
| | | | | 猿ヶ森層 | 泊層下部層 | 泥岩 軽石凝灰岩 粗粒砂岩 礫岩 |
| | | | | | | 安山岩溶岩 凝灰角礫岩 火山礫凝灰岩 凝灰岩 |

※蒲野沢層e部層から、珪藻化石分析結果から、*Denticulopsis lauta*が産出している。

2. 1 敷地の地質及び地質構造

(4) 敷地の地質・地質構造(東西方向の地質断面)

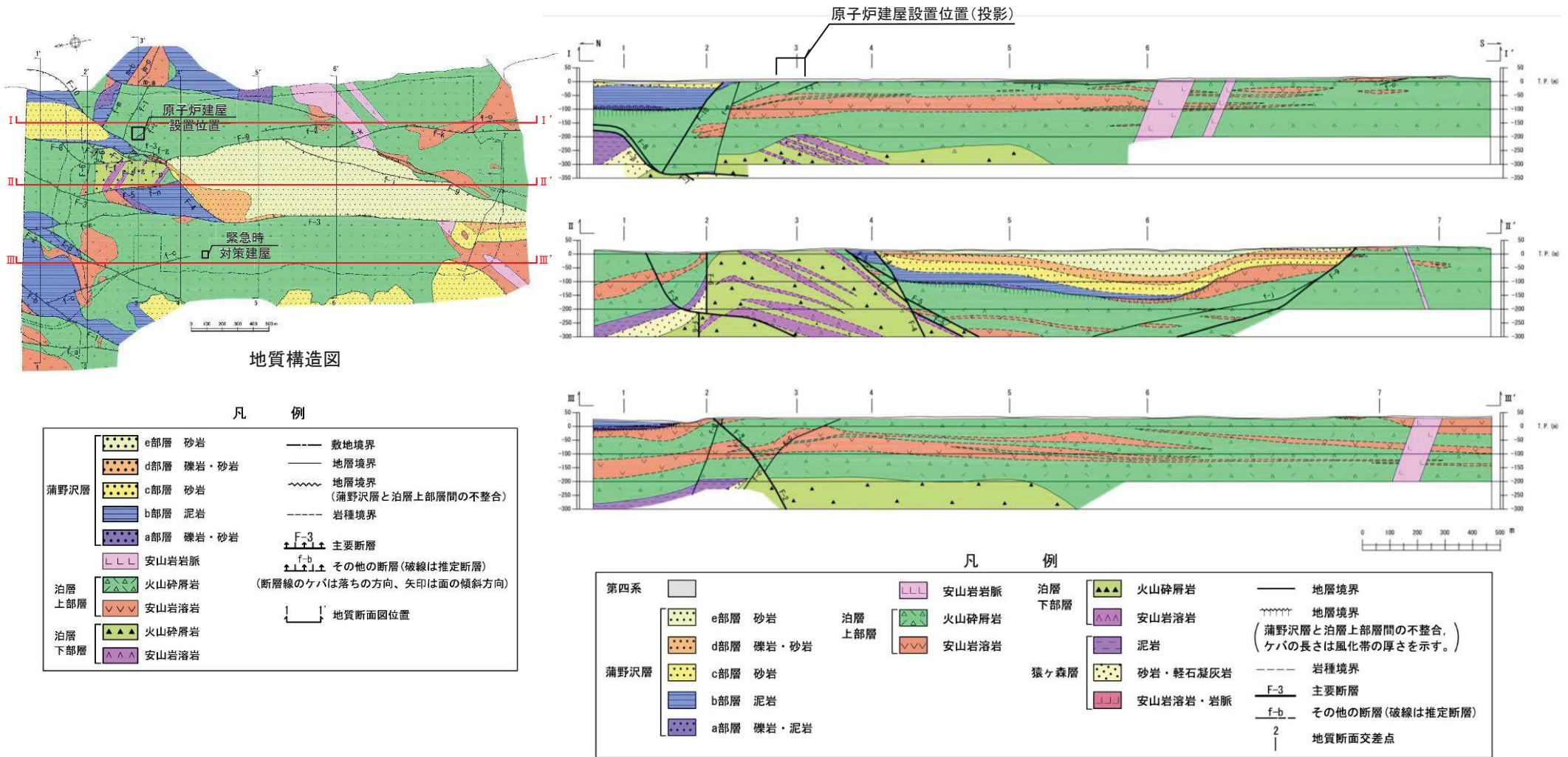
- 敷地の新第三系は、泊層上部層分布域に地塁状をなして泊層下部層が分布し、半地溝状～地溝状をなして蒲野沢層が分布する。これらの境界をなす主要な断層として、F-1断層～F-10断層が認められる。
- 主要な断層は、主にNNE-SSW～NE-SW走向で比較的連続性が認められる変位量の大きな高角度の正断層である。



2. 1 敷地の地質及び地質構造

(5) 敷地の地質・地質構造(南北方向の地質断面)

- 敷地の新第三系は、泊層上部層分布域に地塁状をなして泊層下部層が分布し、半地溝状～地溝状をなして蒲野沢層が分布する。これらの境界をなす主要な断層として、F-1断層～F-10断層が認められる。
- 主要な断層は、主にNNE-SSW～NE-SW走向で比較的連続性が認められる変位量の大きな高角度の正断層である。

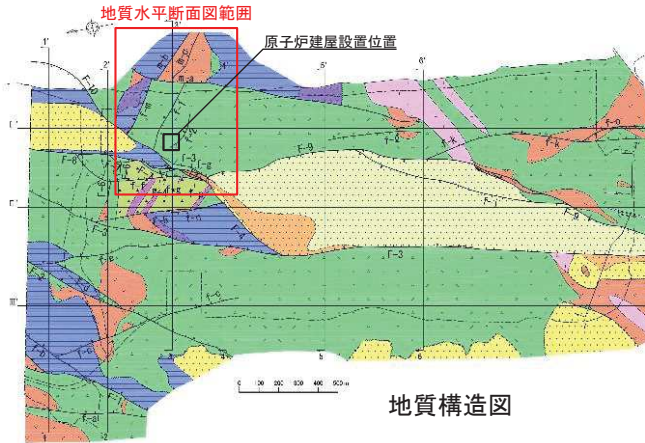


敷地の地質断面図(南北方向)

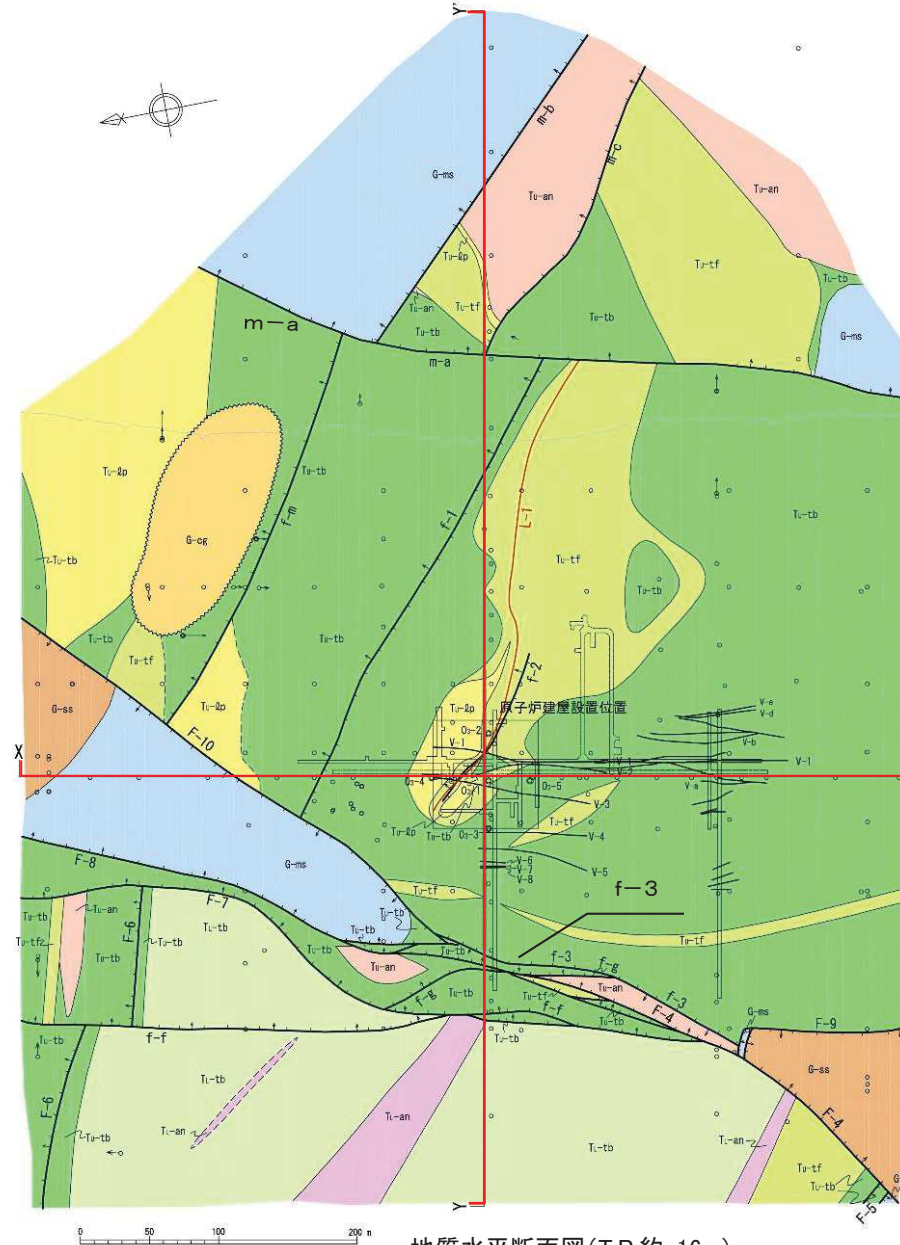
2. 1 敷地の地質及び地質構造

(6) 原子炉建屋設置位置付近の地質・地質構造

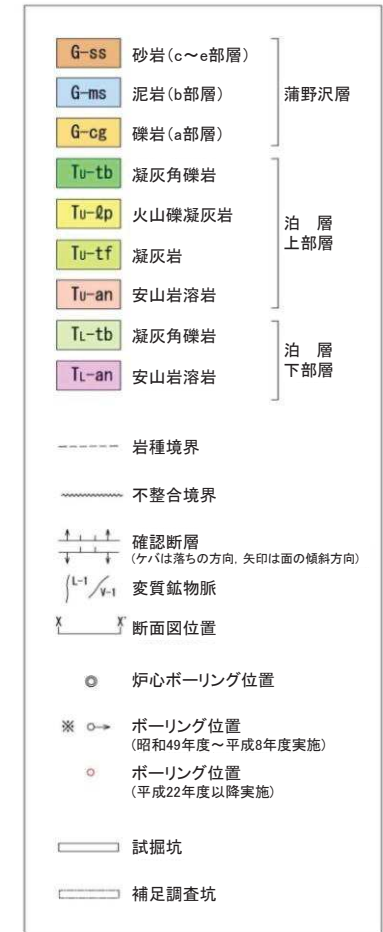
- 原子炉施設設置位置の新第三系は、中新統の猿ヶ森層、泊層及び蒲野沢層からなる。
- 原子炉建屋設置位置付近の新第三系にf-1断層～f-3断層、沿岸にm-a断層～m-c断層が分布する。



地質構造図



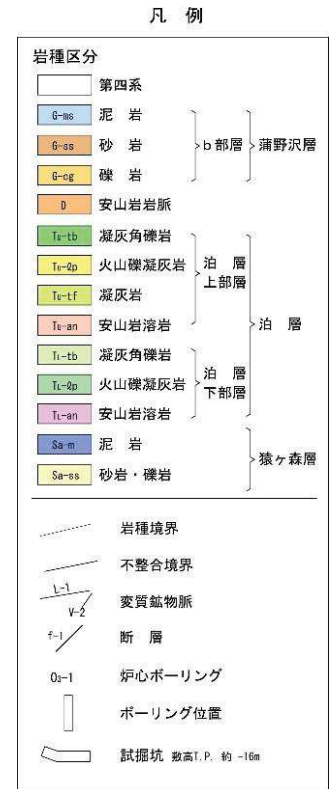
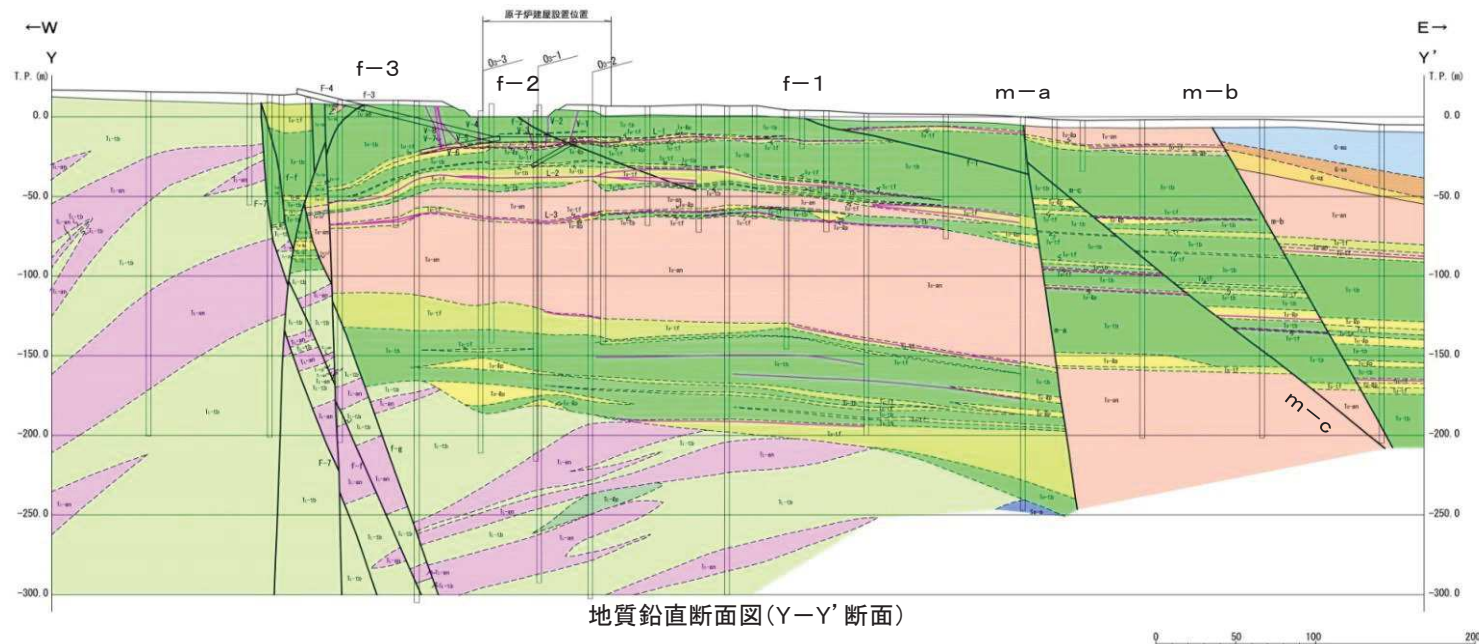
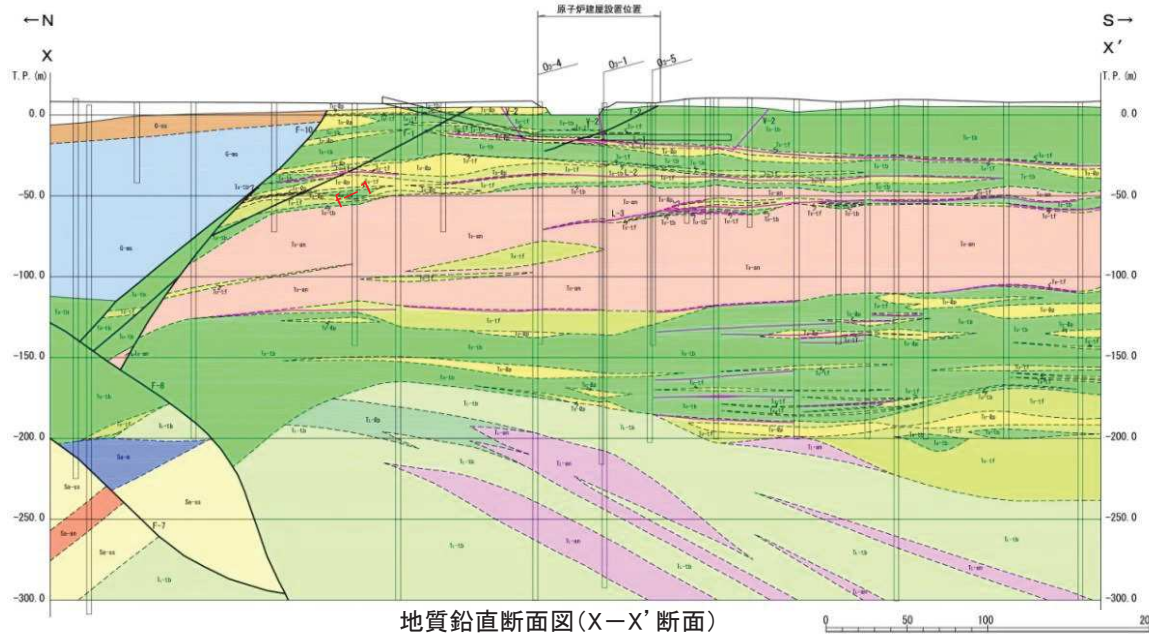
地質水平断面図(T.P.約-16m)



2. 1 敷地の地質及び地質構造

(7) 原子炉建屋設置位置付近の地質・地質構造

- 原子炉施設設置位置の新第三系は、中新統の猿ヶ森層、泊層及び蒲野沢層からなる。
- 原子炉建屋設置位置付近の新第三系にf-1断層～f-3断層、沿岸にm-a断層～m-c断層が分布する。



2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (1) 岩盤分類(岩盤分類の基準)

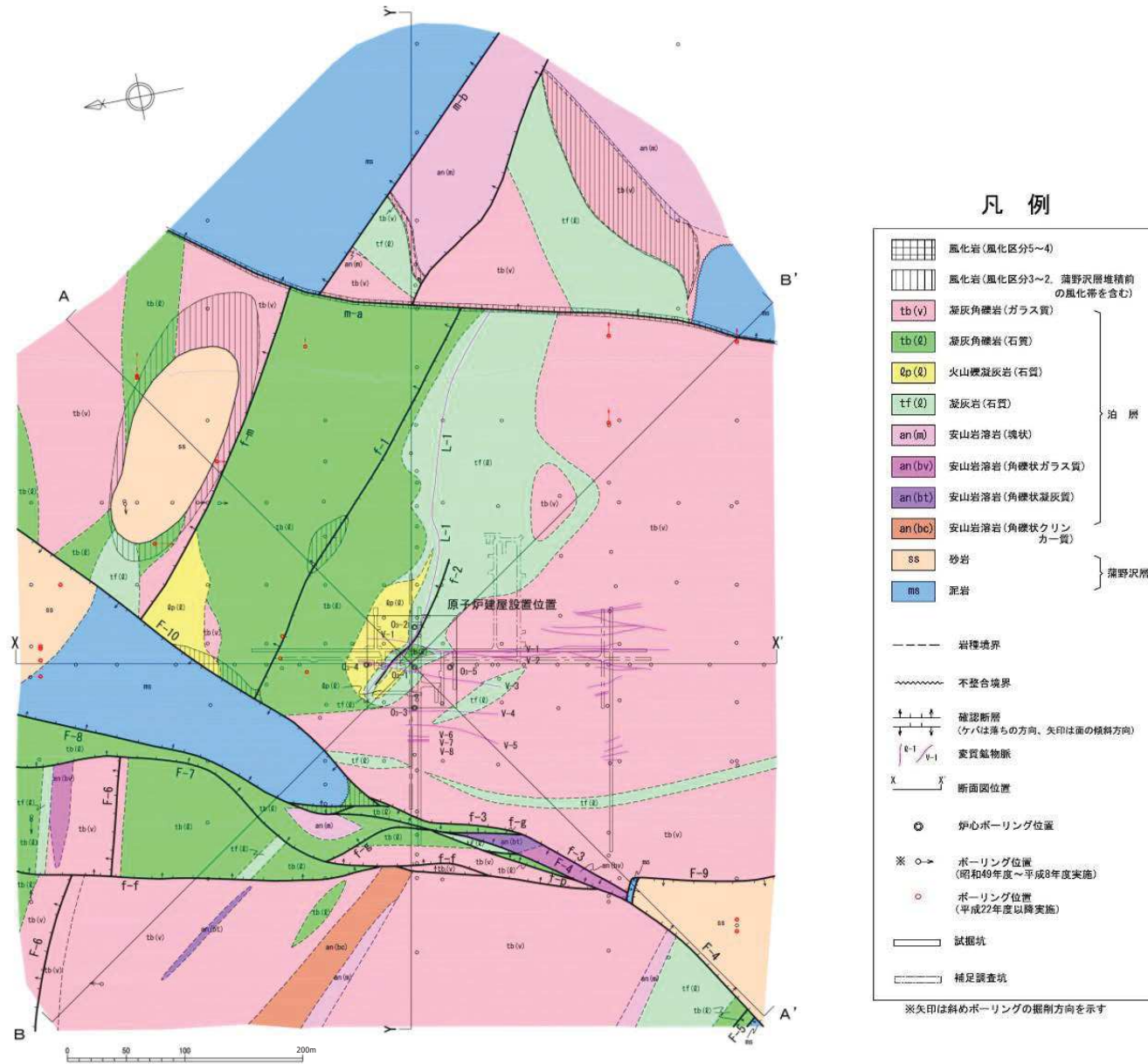
- 原子炉施設設置位置には泊層の火山碎屑岩と安山岩溶岩が分布し、やや離れた位置に蒲野沢層の砂岩、泥岩及び礫岩が分布している。
- 本地点の岩盤の特徴から、岩盤分類にあたり、「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-1987)の軟質岩盤分類基準案に示される不均質軟岩(軟岩Ⅲ類)の考え方に基づき、岩種・岩相によるグルーピングを基本とした岩盤分類を行い、11岩種・岩相に分類した。



| | 特 徴 |
|---------------|--|
| 泊層 火山碎屑岩 | <ul style="list-style-type: none"> 凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩及び凝灰岩からなるが、いずれの岩種も基質の性状によりガラス質な部分と石質な部分に岩相区分され、前者は後者より硬質である。 石質基質の一部に弱い変質を受け緑色を呈する部分が認められるが、その分布は不規則なレンズ状又は斑状であり、広がりをも有するものではない。 節理が少なく、風化の影響は地表部にわずかに認められるのみである。 |
| 泊層 安山岩溶岩 | <ul style="list-style-type: none"> 緻密で塊状の溶岩と、安山岩角礫と基質が強く固結する角礫状の溶岩があり、さらに角礫状の溶岩は基質の性状によりガラス質な部分、凝灰質な部分及びクリンカー質な部分に岩相区分される。 角礫状の溶岩は、基質の違いが岩石の硬さと密接に関連しており、ガラス質な部分は凝灰質及びクリンカー質な部分より硬質。 溶岩の凝灰質基質の一部に弱い変質を受け緑色を呈する部分が認められるが、その分布は不規則なレンズ状又は斑状であり、広がりをも有するものではない。 塊状の溶岩を除いて節理が少なく、風化の影響は地表部にわずかに認められるのみである。 |
| 蒲野沢層 砂岩・泥岩 | <ul style="list-style-type: none"> 蒲野沢層の砂岩、泥岩及び礫岩は堆積性の軟岩であり、風化・変質の影響及び節理は少ない。 礫岩は分布が局所的であり、岩盤分類としては砂岩に含める。 |

2. 2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (2) 岩盤分類(岩盤分類図(水平断面))

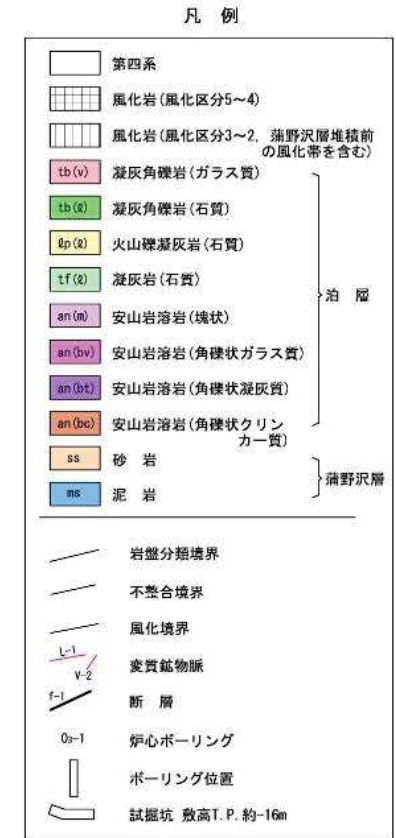
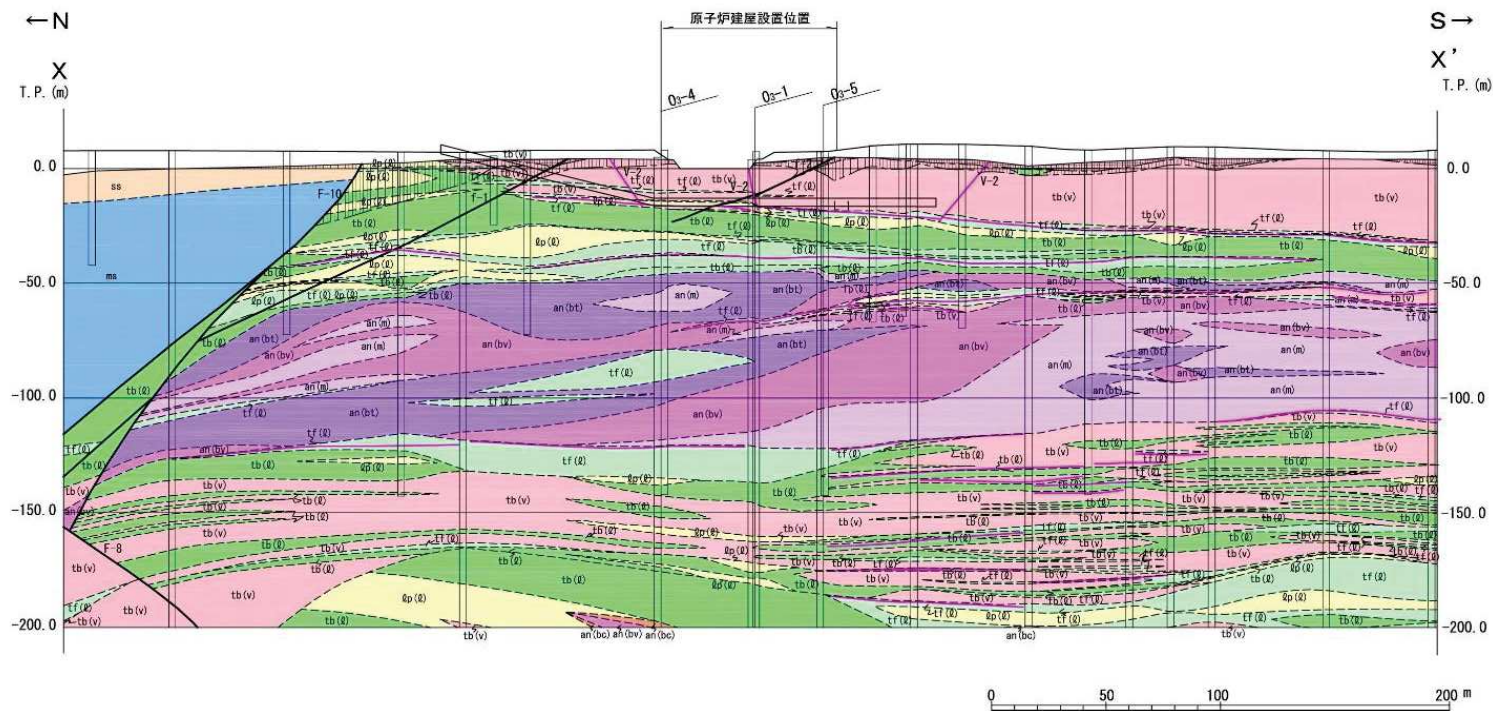
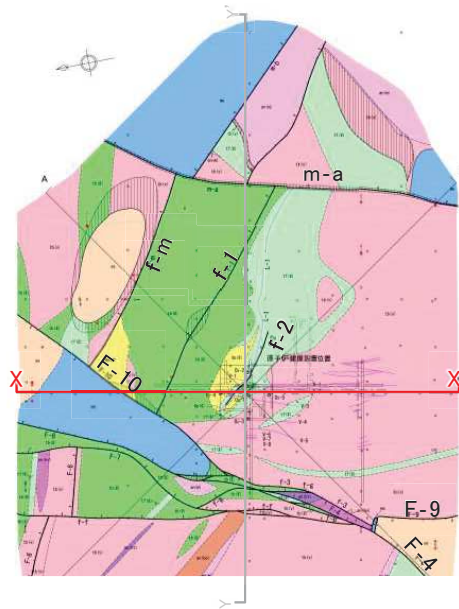
- 原子炉施設設置位置には泊層の火山碎屑岩と安山岩溶岩が分布し、やや離れた位置に蒲野沢層の砂岩、泥岩及び礫岩が分布している。
- 本地点の岩盤の特徴から、岩盤分類にあたり、「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-1987)の軟質岩盤分類基準案に示される不均質軟岩(軟岩Ⅲ類)の考え方に基づき、岩種・岩相によるグルーピングを基本とした岩盤分類を行い、11岩種・岩相に分類した。



2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

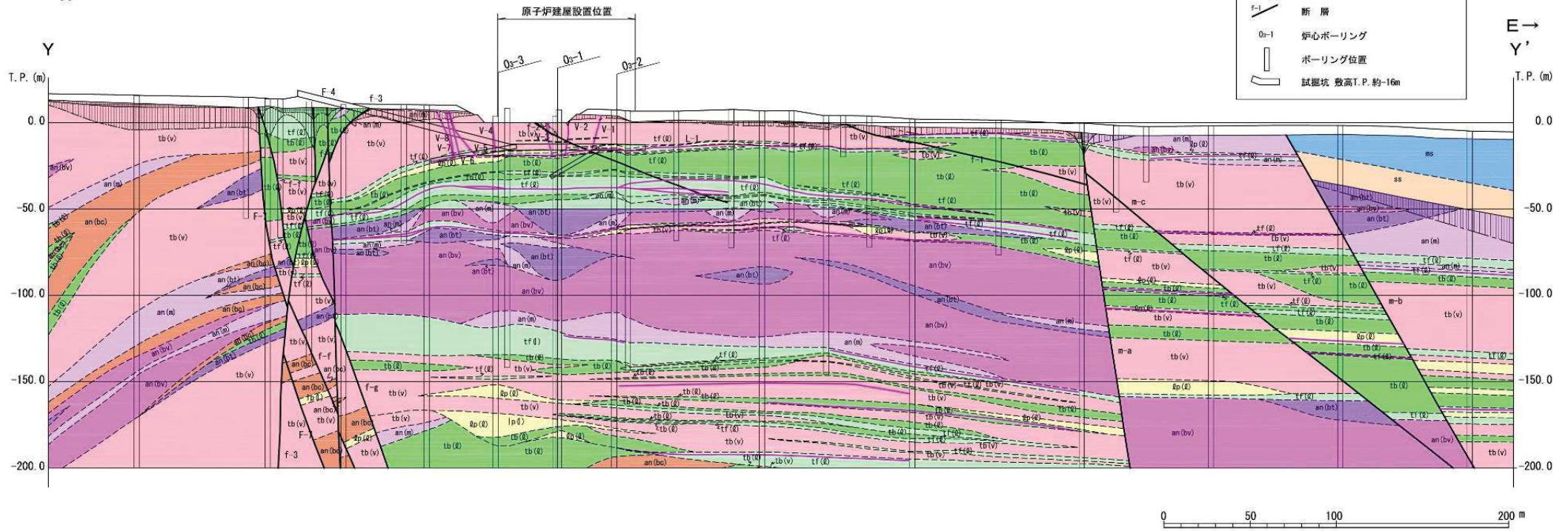
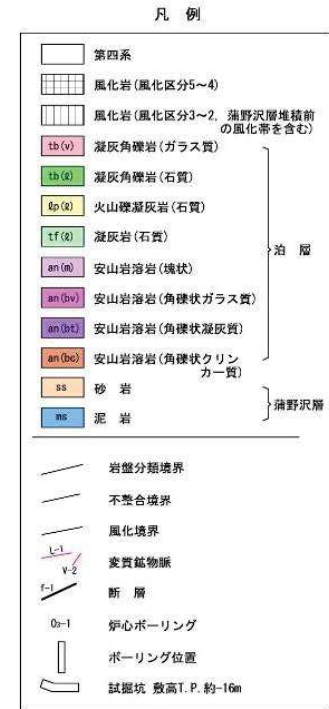
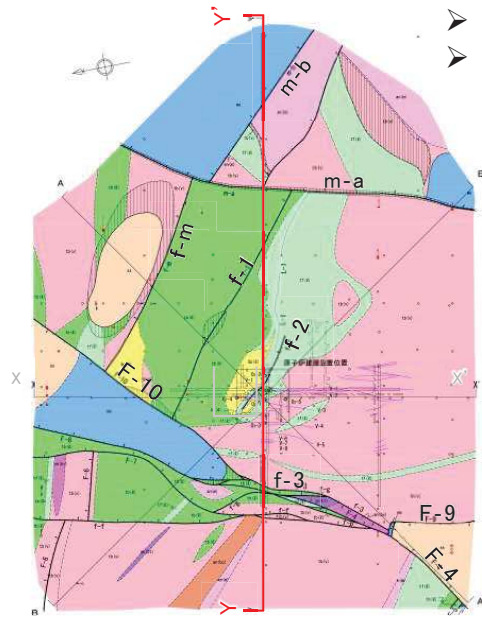
(3) 岩盤分類〔岩盤分類図(鉛直断面(X-X'断面))〕

- 原子炉建屋基礎地盤の岩盤分類は、概ね水平な成層構造をなす。
- 風化の影響は地表部にわずかに認められるのみである。



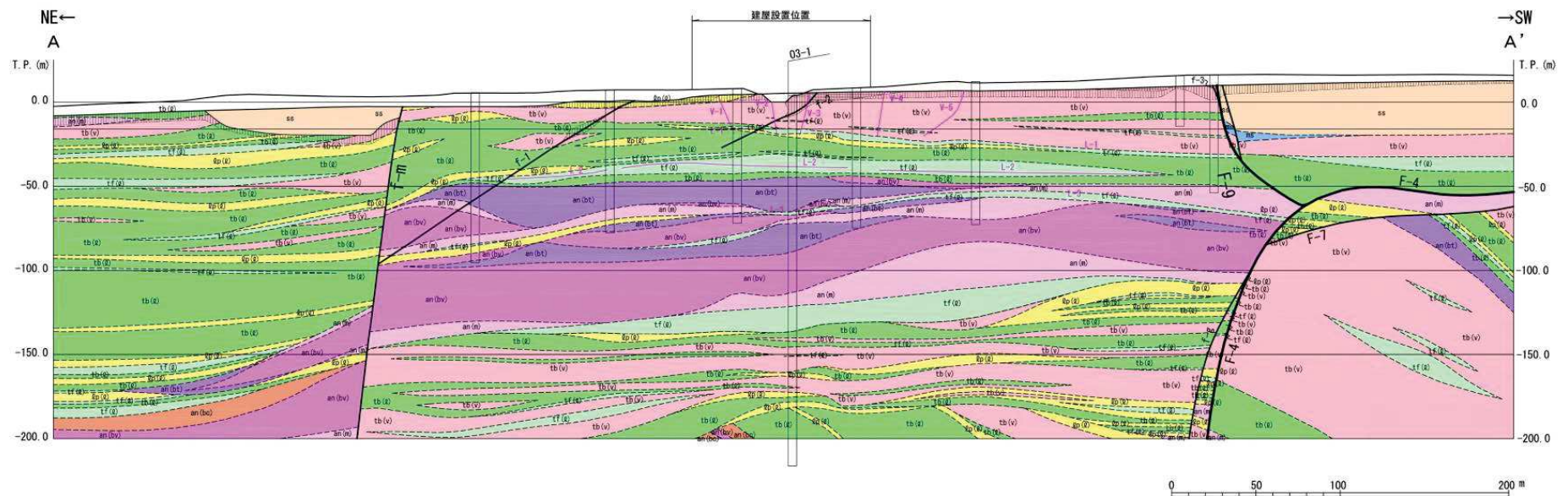
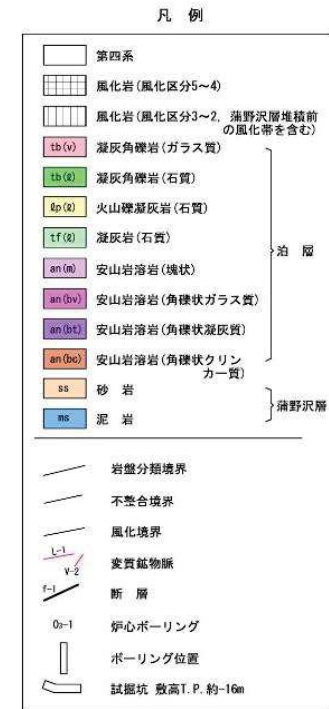
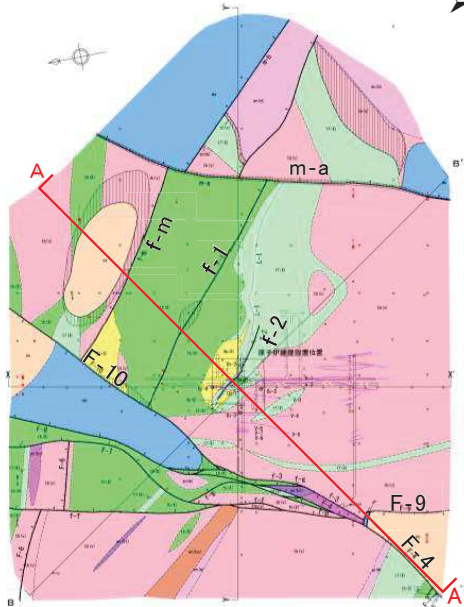
2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (4) 岩盤分類〔岩盤分類図(鉛直断面(Y-Y'断面))〕

- 原子炉建屋基礎地盤の岩盤分類は、概ね水平な成層構造をなす。
- 風化の影響は地表部及び蒲野沢層の直下にわずかに認められるのみである。



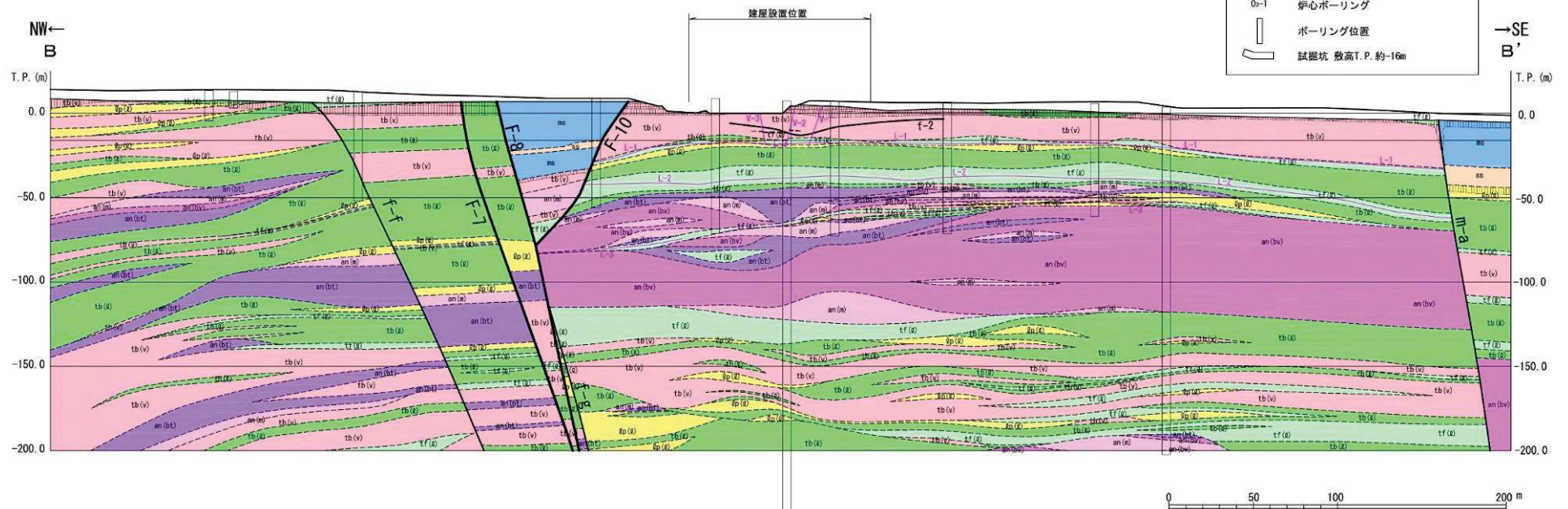
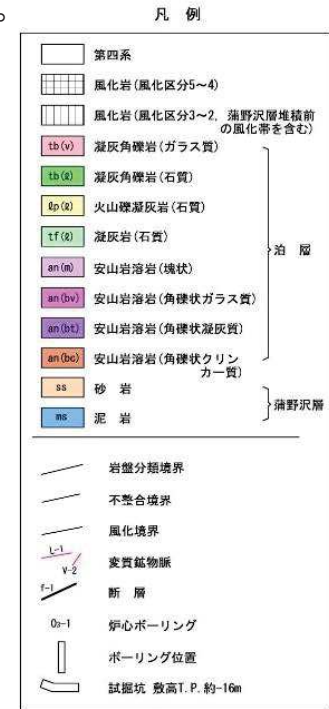
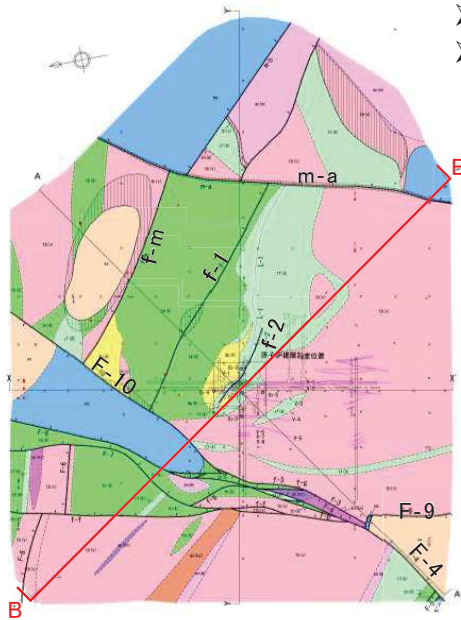
2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (5) 岩盤分類〔岩盤分類図(鉛直断面(A-A'断面))〕

- 原子炉建屋基礎地盤の岩盤分類は、概ね水平な成層構造をなす。
- 風化の影響は地表部及び蒲野沢層の直下にわずかに認められるのみである。







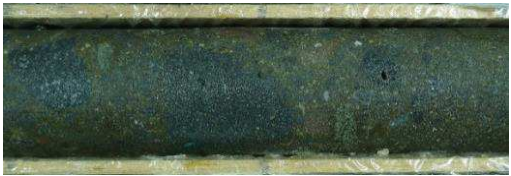
2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (6) 岩盤分類〔岩盤分類図(鉛直断面(B-B'断面))〕

- 原子炉建屋基礎地盤の岩盤分類は、概ね水平な成層構造をなす。
- 風化の影響は地表部及び蒲野沢層の直下にわずかに認められるのみである。



2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (7) 岩盤分類(風化区分基準)

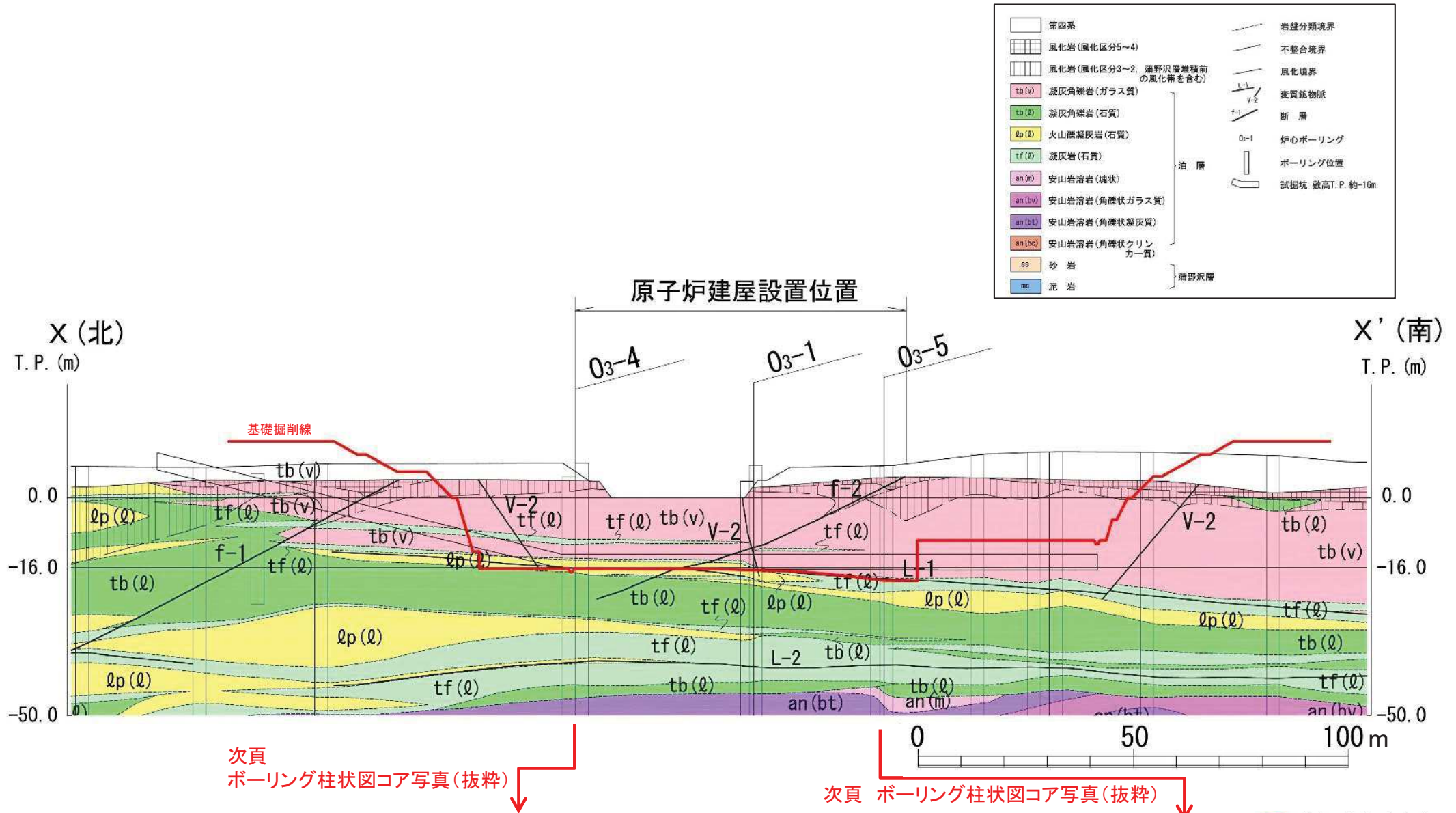
➤ 敷地の岩盤は、色調、硬さ等から風化区分2～5の風化岩盤と、未風化の新鮮岩に区分される。

| 風化区分 | 性 状 | コ ア 写 真 |
|------|--|---|
| 5 | 原岩の組織が全く認められないか、かろうじて原岩の組織が認められるもの。 新鮮な礫を含まない。 全体に褐色化している。 |  (O ₃ -1:0.78 - 0.94m) |
| 4 | 礫・基質ともに変色している。基質はかなり軟質化し、指圧で崩れる。礫も軟質化している。 |  (O ₃ -5:3.40 - 3.59m) |
| 3 | 基質は全体に変色しているが、指圧で崩れない程度に硬い。礫は変色し、やや軟質化しているが、新鮮部を残すものが主体である。 |  (O ₃ -5:4.38 - 4.55m) |
| 2 | 基質はわずかに変色し、やや軟質化しているが、概ね硬質である。礫は新鮮である。 |  (O ₃ -5:4.76 - 4.84m) |
| | 新鮮である。 |  (O ₃ -5:23.20 - 23.40m) |

2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

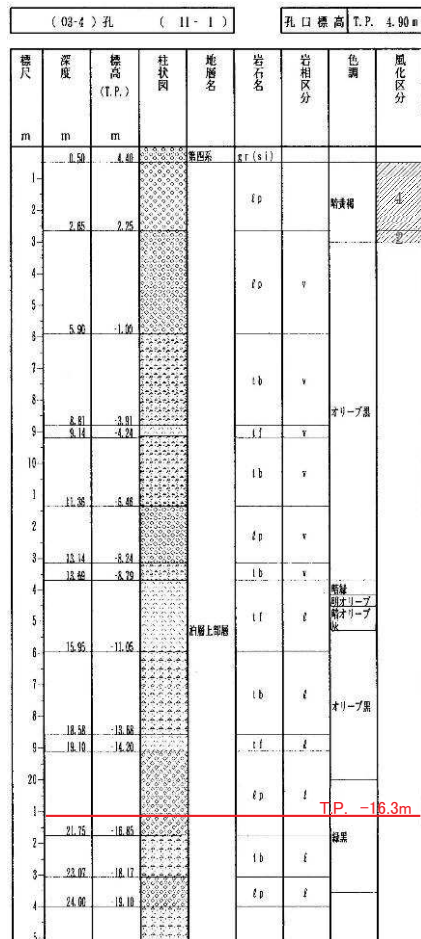
(8) 岩盤分類(原子炉建屋設置位置付近の風化状況(X-X'断面))

➤ 原子炉建屋設置位置付近の岩盤は、泊層の表層部には風化が認められるものの、原子炉建屋が設置される深さ(T.P.-16.3m)の岩盤は新鮮であり、著しい風化は認められない。

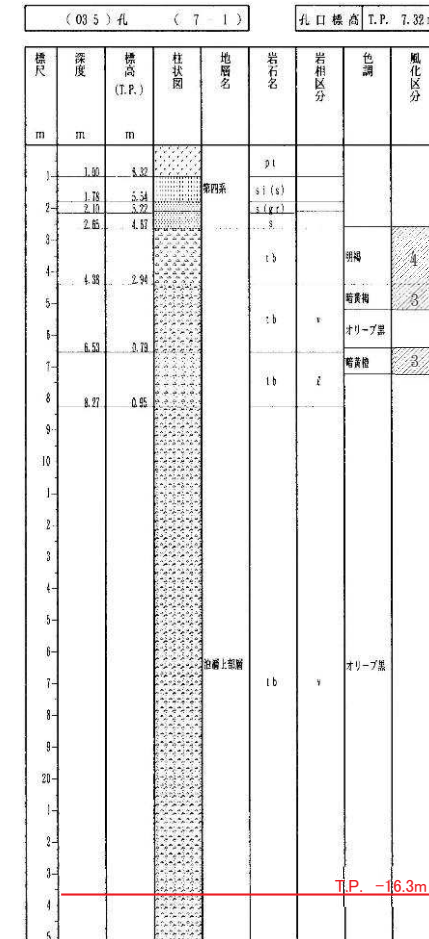


2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

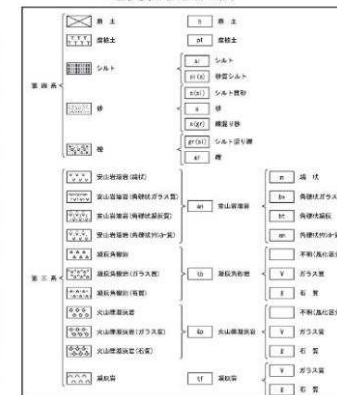
(9) 岩盤分類(原子炉建屋設置位置付近の風化状況(X-X'断面))



┌ : T.P. -16.3m



地質柱状図凡例



┌ : T.P. -16.3m

地質柱状図及びコア写真

岩石の風化区分

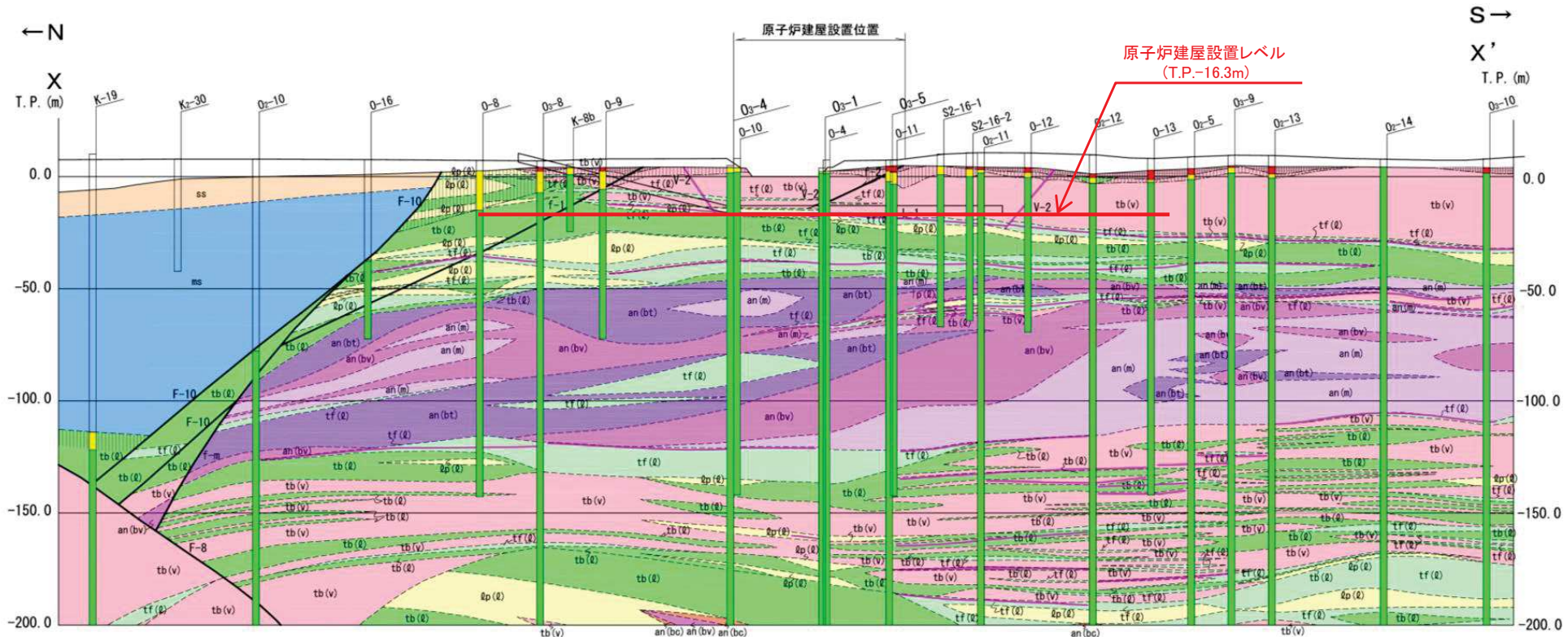
| 風化区分 | 岩石の状況 |
|------|------------------------------------|
| 5 | 辛うじて原岩の組織が認められる。 |
| 4 | 原岩の組織が全く認められない。 |
| 3 | 指圧で崩れる。礫も軟質化している。 |
| 2 | 岩芯は主に淡褐色を呈するが、指圧で崩れない。礫はやや軟質化している。 |
| 1 | 割れ目沿いに淡褐色を呈し、やや軟質化している。礫は硬質で新鮮である。 |
| 0 | 新鮮である。 |

※ O₃-4, O₃-5 の柱状図の詳細は、机上配付資料に示す。

2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

(10) 岩盤分類(原子炉建屋設置位置付近の風化状況(X-X'断面))

➤ 原子炉建屋設置位置付近の岩盤は、泊層の表層部には風化が認められるものの、原子炉建屋が設置される深さ(T.P.-16.3m)の岩盤は新鮮であり、著しい風化は認められない。

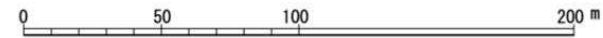


| | |
|--|------------------------------|
| | 第四系 |
| | 風化岩(風化区分5~4) |
| | 風化岩(風化区分3~2, 蒲野沢層堆積前の風化帯を含む) |
| | 凝灰角礫岩(ガラス質) |
| | 凝灰角礫岩(石質) |
| | 火山礫凝灰岩(石質) |
| | 凝灰岩(石質) |
| | 安山岩溶岩(塊状) |
| | 安山岩溶岩(角礫状ガラス質) |
| | 安山岩溶岩(角礫状凝灰質) |
| | 安山岩溶岩(角礫状クレーンカー質) |
| | 砂岩 |
| | 泥岩 |

泊層
蒲野沢層

| | |
|--|-----------------|
| | 岩盤分類境界 |
| | 不整合境界 |
| | 風化境界 |
| | 変質鉱物脈 |
| | 断層 |
| | 炉心ボーリング |
| | ボーリング位置 |
| | 斜めボーリング位置 |
| | 試掘坑 数高T.P.約-16m |

| 風化区分 | 岩石の状況 |
|------|------------------------------------|
| 5 | 辛うじて原岩の組織が認められる。原岩の組織が全く認められない。 |
| 4 | 指圧で崩れる。礫も軟質化している。 |
| 3 | 岩芯は主に淡褐色を呈するが、指圧で崩れない。礫はやや軟質化している。 |
| 2 | 割れ目淡褐色を呈し、やや軟質化している。礫は硬質である。 |
| | 新鮮である。 |



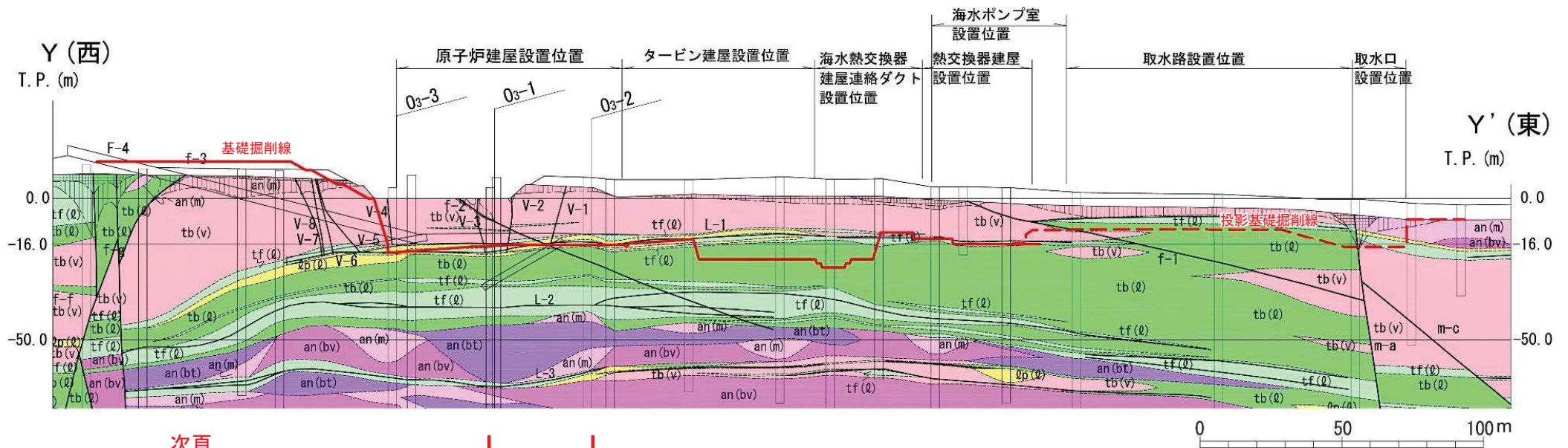
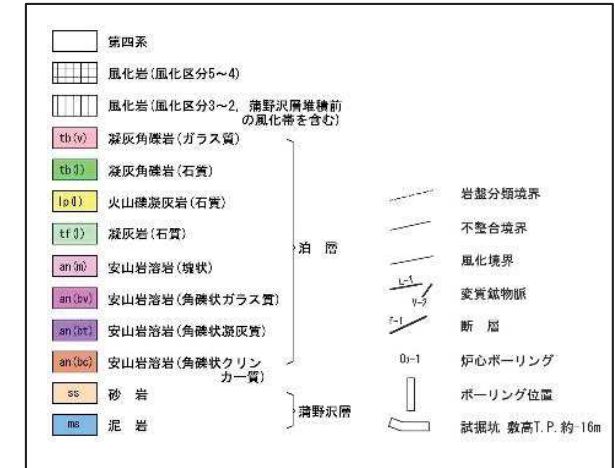
| 風化区分 | | |
|------|------|--|
| 凡例 | 風化区分 | 判定基準 |
| | 5~4 | 辛うじて原岩の組織が認められる~風化変色し指圧で崩れる |
| | 3~2 | 風化変色しているが指圧で崩れない~断層沿いあるいは基質が風化変色しやや軟質化する |
| | | 新鮮 |

余 白

2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

(11) 岩盤分類(原子炉建屋設置位置付近の風化状況(Y-Y'断面))

- ▶ 原子炉建屋設置位置付近の岩盤は、泊層の表層部には風化が認められるものの、原子炉建屋が設置される深さ(T.P.-16.3m)の岩盤は新鮮であり、著しい風化は認められない。

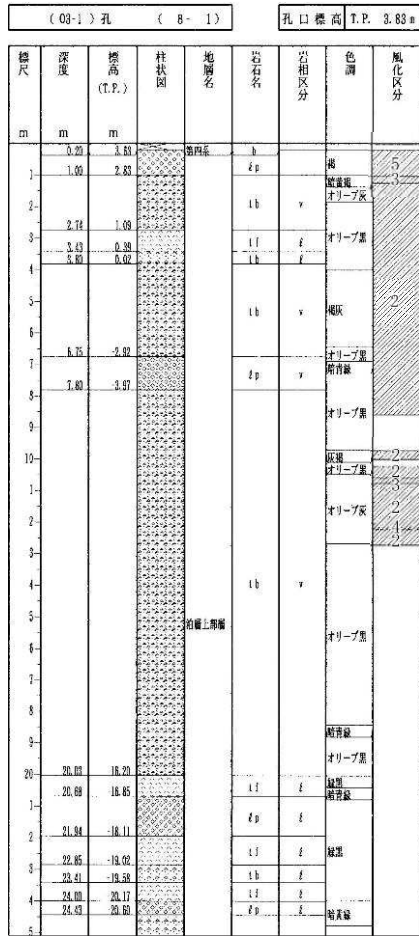


次頁
ボーリング柱状図コア写真(抜粋)

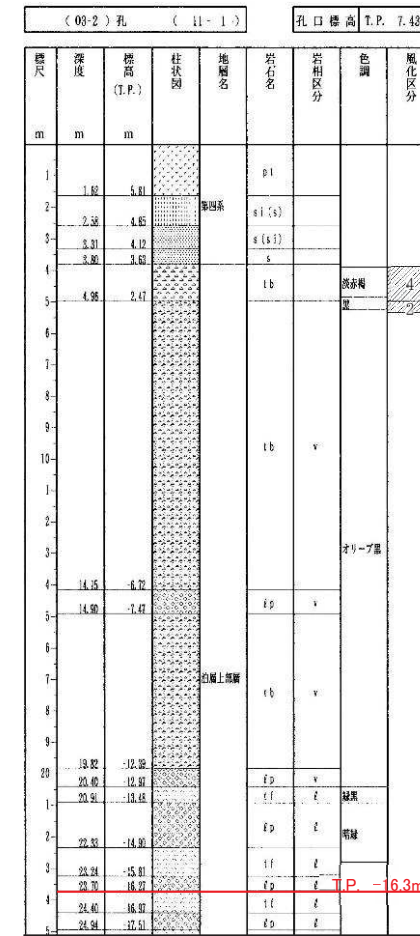
次頁 ボーリング柱状図コア写真(抜粋)

2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

(12) 岩盤分類(原子炉建屋設置位置付近の風化状況(Y-Y'断面))



┌ : T.P. -16.3m



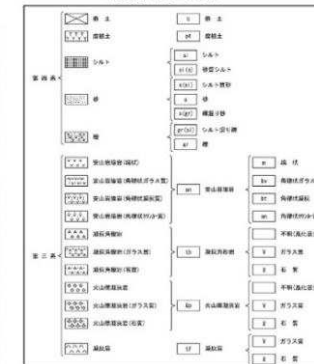
┌ : T.P. -16.3m

地質柱状図及びコア写真

岩石の風化区分

| 風化区分 | 岩石の状況 |
|------|--|
| 5 | 辛うじて原岩の組織が認められる。 |
| 4 | 原岩の組織が全く認められない。 指圧で崩れる。礫も軟質化している。 |
| 3 | 岩芯は主に淡褐色を呈するが、指圧で崩れない。 礫はやや軟質化している。 |
| 2 | 割れ目沿いに淡褐色を呈し、やや軟質化している。 礫は硬質で新鮮である。 |
| | 新鮮である。 |

地質柱状図凡例

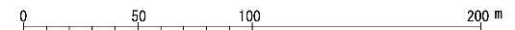
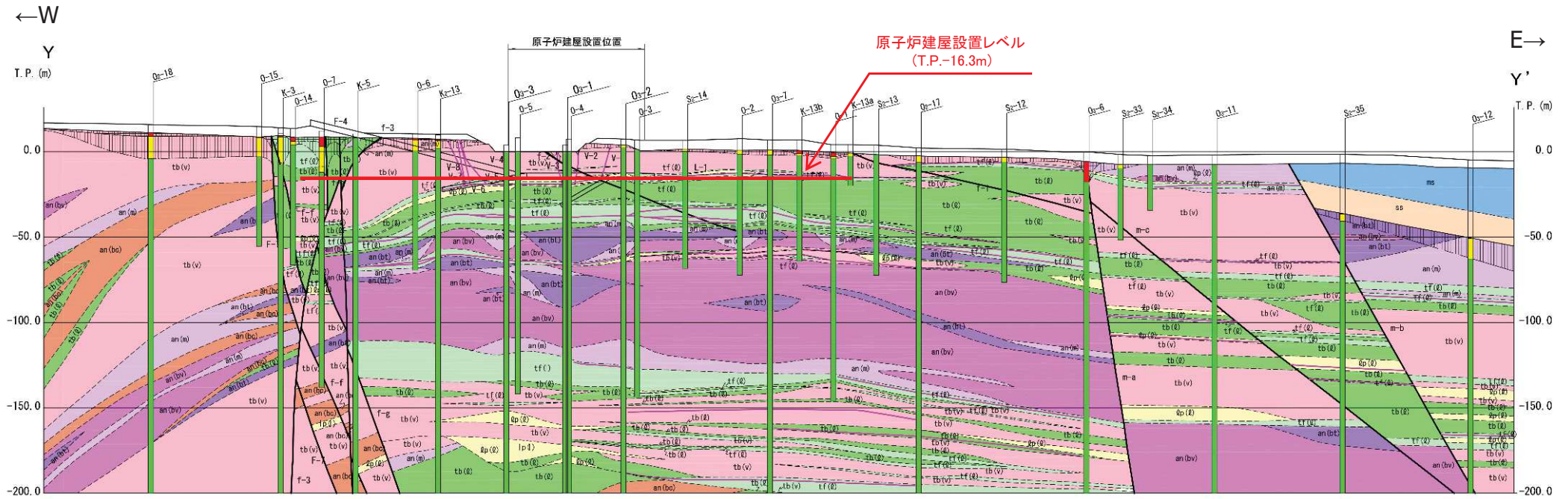


※ O3-1, O3-2 の柱状図の詳細は、机上配付資料に示す。

2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

(13) 岩盤分類(原子炉建屋設置位置付近の風化状況(Y-Y'断面))

▶ 原子炉建屋設置位置付近の岩盤は、泊層の表層部には風化が認められるものの、原子炉建屋が設置される深さ(T.P.-16.3m)の岩盤は新鮮であり、著しい風化は認められない。



| | |
|--|------------------------------|
| | 第四系 |
| | 風化岩(風化区分5~4) |
| | 風化岩(風化区分3~2, 蒲野沢層堆積前の風化帯を含む) |
| | 凝灰角礫岩(ガラス質) |
| | 凝灰角礫岩(石質) |
| | 火山礫凝灰岩(石質) |
| | 凝灰岩(石質) |
| | 安山岩溶岩(塊状) |
| | 安山岩溶岩(角礫状ガラス質) |
| | 安山岩溶岩(角礫状凝灰質) |
| | 安山岩溶岩(角礫状クレーンカー質) |
| | 砂岩 |
| | 泥岩 |

| | |
|--|-----------------|
| | 岩盤分類境界 |
| | 不整合境界 |
| | 風化境界 |
| | 変質鉱物脈 |
| | 断層 |
| | 炉心ボーリング |
| | ボーリング位置 |
| | 斜めボーリング位置 |
| | 試掘坑 数高T.P.約-16m |

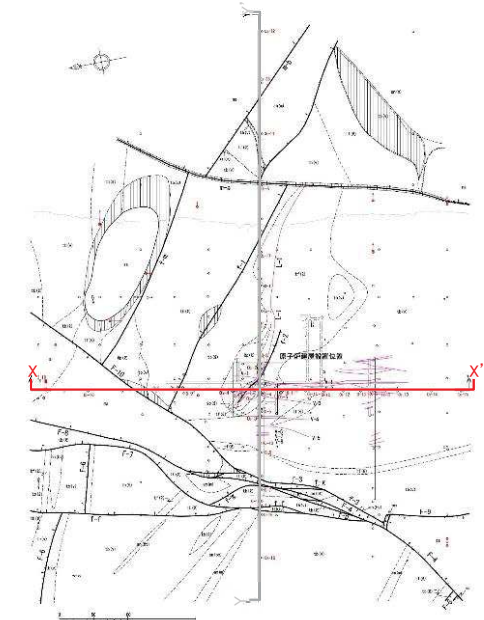
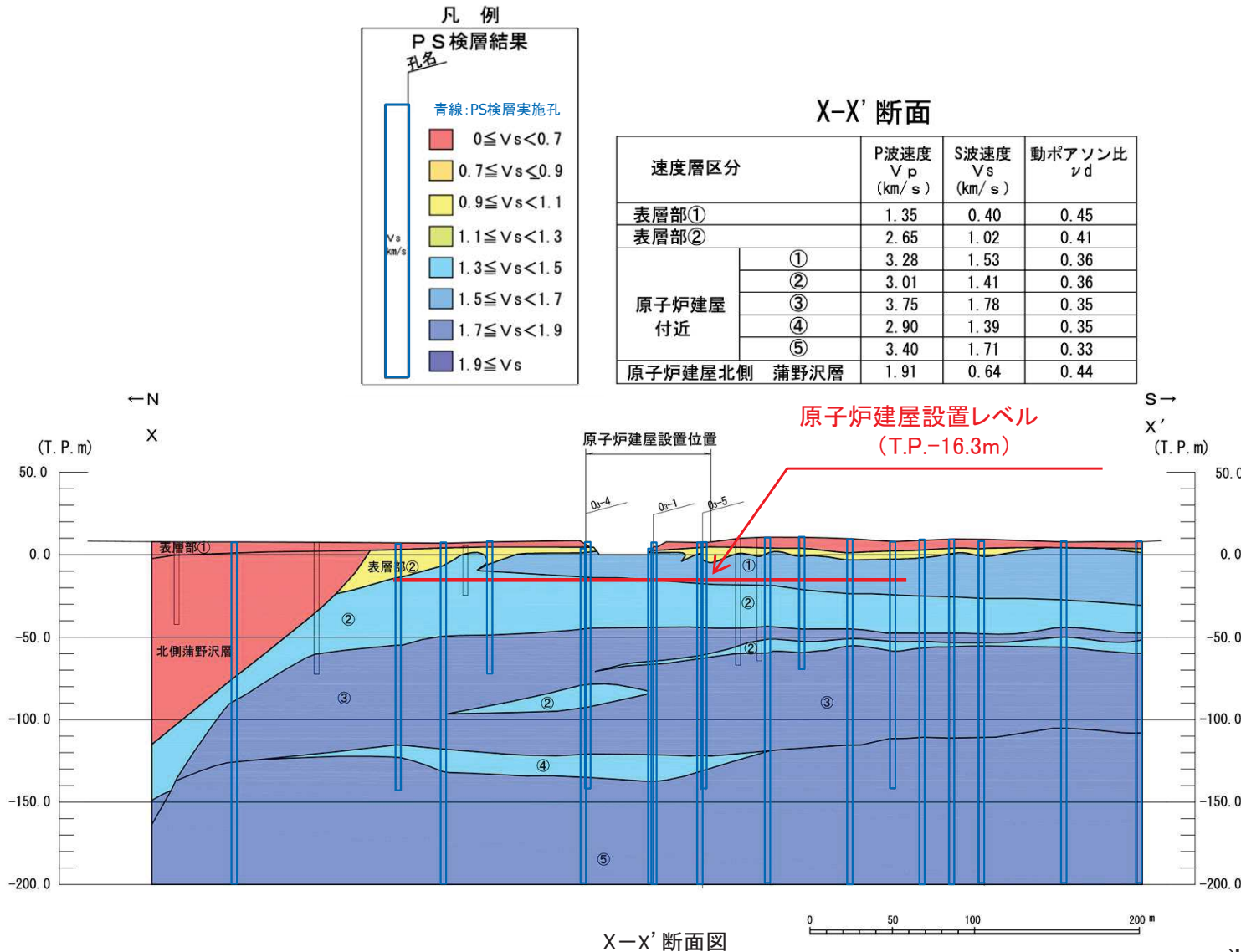
| 風化区分 | 岩石の状況 |
|------|------------------------------------|
| 5 | 辛うじて原岩の組織が認められる。原岩の組織が全く認められない。 |
| 4 | 指圧で崩れる。礫も軟質化している。 |
| 3 | 岩芯は主に淡褐色を呈するが、指圧で崩れない。礫はやや軟質化している。 |
| 2 | 割れ目淡褐色を呈し、やや軟質化している。礫は硬質である。 |
| | 新鮮である。 |

| 凡例 | 風化区分 | 判定基準 |
|----|------|--|
| | 5~4 | 辛うじて原岩の組織が認められる~風化変色し指圧で崩れる |
| | 3~2 | 風化変色しているが指圧で崩れない~断層沿いあるいは基質が風化変色しやや軟質化する |
| | | 新鮮 |

2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

(14) 速度層構造(原子炉建屋付近のPS検層結果) X-X' 断面

- 原子炉建屋基礎地盤の速度層構造については、概ね水平な成層構造をなす5層に区分され、著しい高低差は認められない。
- 原子炉建屋付近の岩盤は、 V_s =約1.4km/s以上の硬質な岩盤からなる。

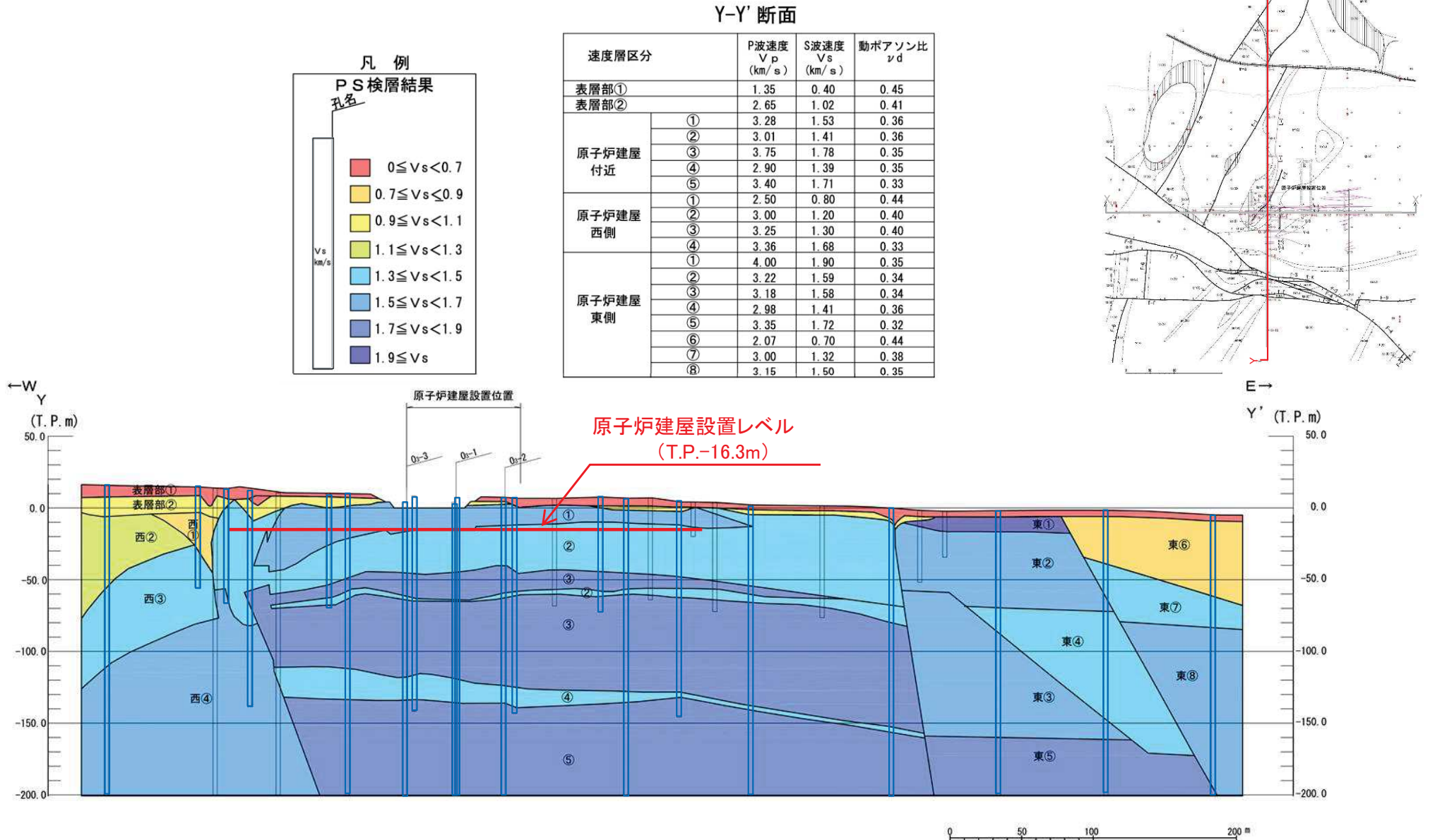


※PS検層の詳細については、「補足説明資料」に示す。

2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

(15) 速度層構造(原子炉建屋付近のPS検層結果)Y-Y' 断面

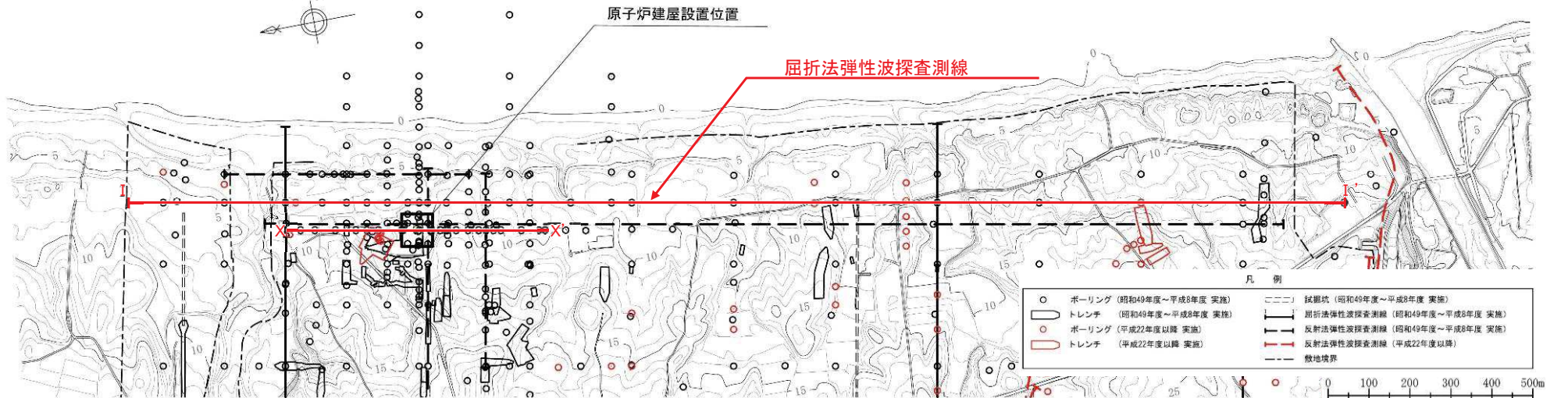
- ▶ 原子炉建屋基礎地盤の速度層構造については、概ね水平な成層構造をなす5層に区分され、著しい高低差は認められない。
- ▶ 原子炉建屋付近の岩盤は、 V_s =約1.4km/s以上の硬質な岩盤からなる。



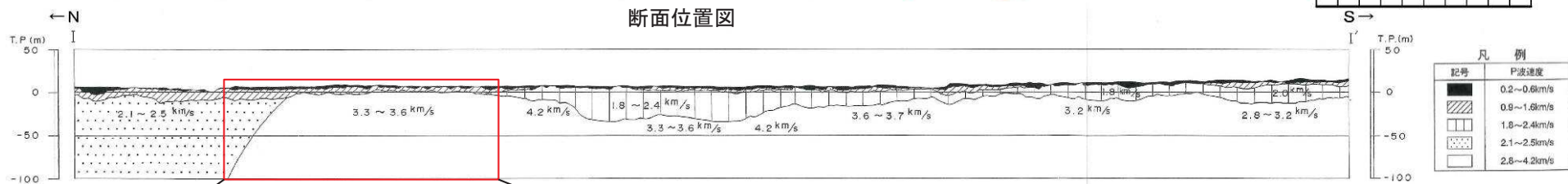
※PS検層の詳細については、「補足説明資料」に示す。

2. 2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (16) 敷地の屈折法弾性波探査速度区分図

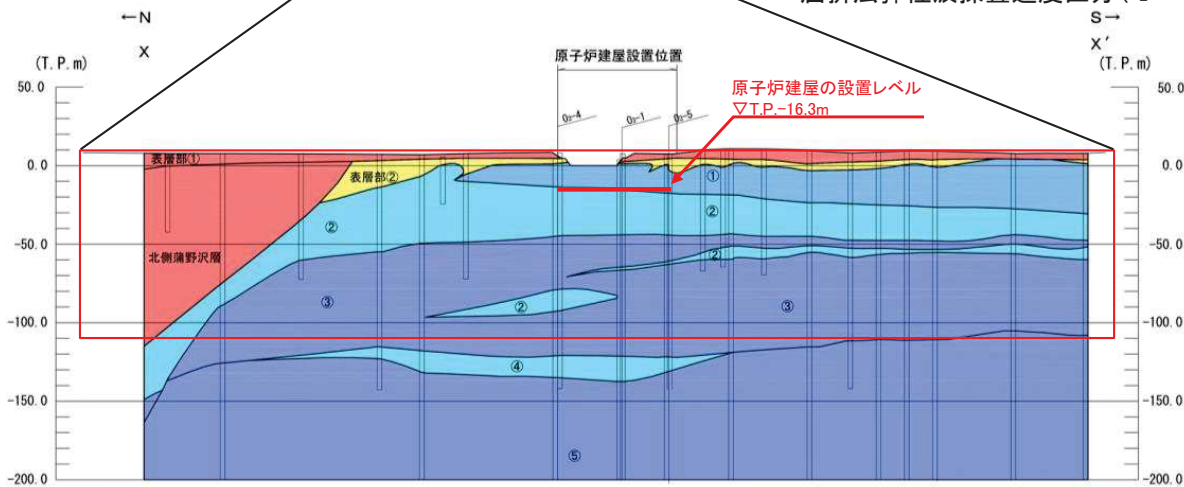
➤ 原子炉建屋付近のPS検層結果による②～③速度層のP波速度は3.01～3.75km/sであり、屈折法弾性波探査による同区間のP波速度である3.3～3.6km/sと同等の速度構造が認められる。



断面位置図



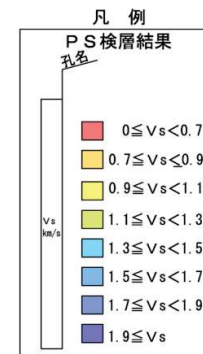
屈折法弾性波探査速度区分 (I-I' 測線)



PS検層による速度層断面 (X-X')

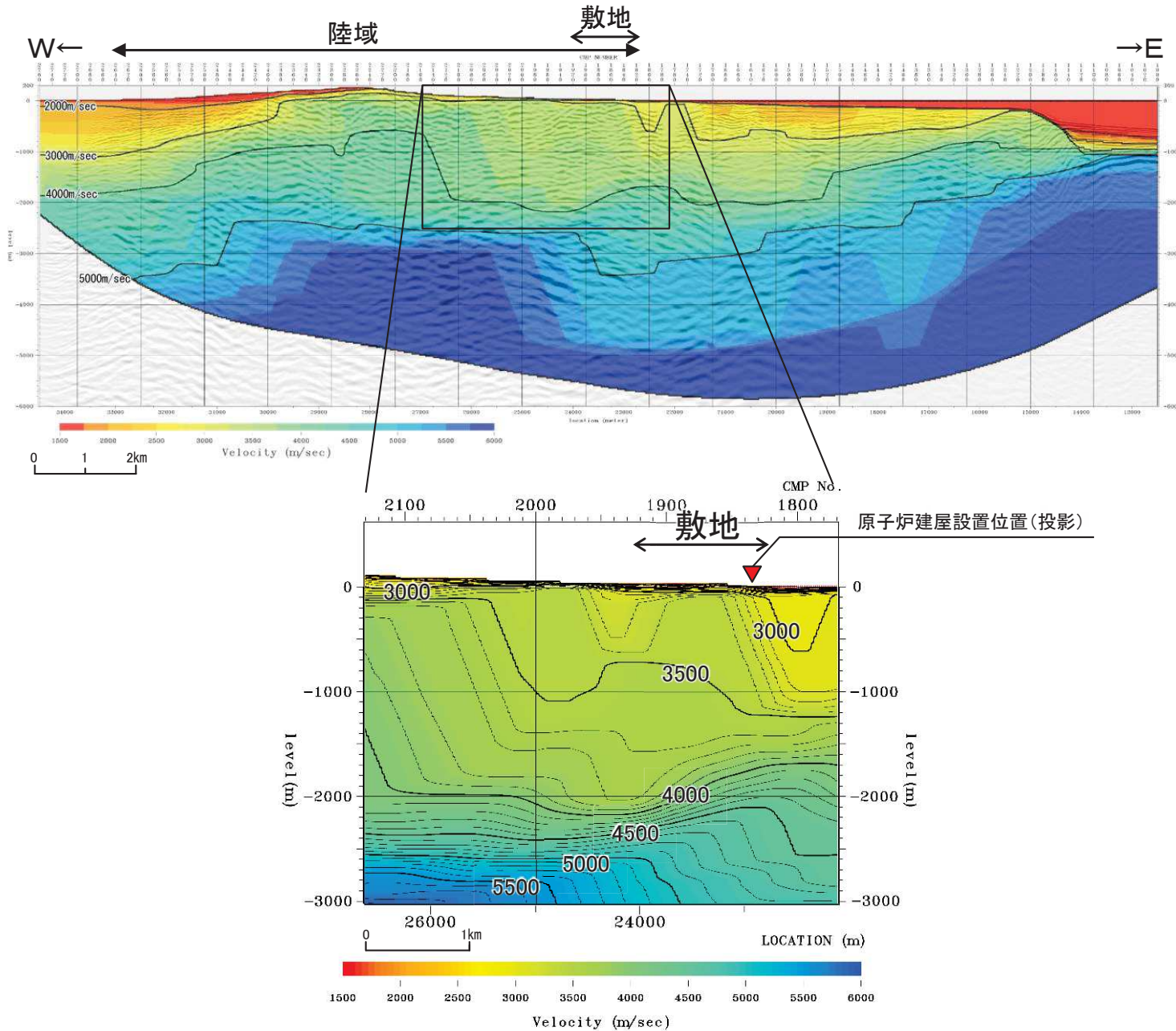
X-X' 断面

| 速度層区分 | P波速度 V _p (km/s) | S波速度 V _s (km/s) | 動ポアソン比 ν _d | |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|------|
| 表層部① | 1.35 | 0.40 | 0.45 | |
| 表層部② | 2.65 | 1.02 | 0.41 | |
| 原子炉建屋 付近 | ① | 3.28 | 1.53 | 0.36 |
| | ② | 3.01 | 1.41 | 0.36 |
| | ③ | 3.75 | 1.78 | 0.35 |
| | ④ | 2.90 | 1.39 | 0.35 |
| | ⑤ | 3.40 | 1.71 | 0.33 |
| 原子炉建屋北側 蒲野沢層 | 1.91 | 0.64 | 0.44 | |



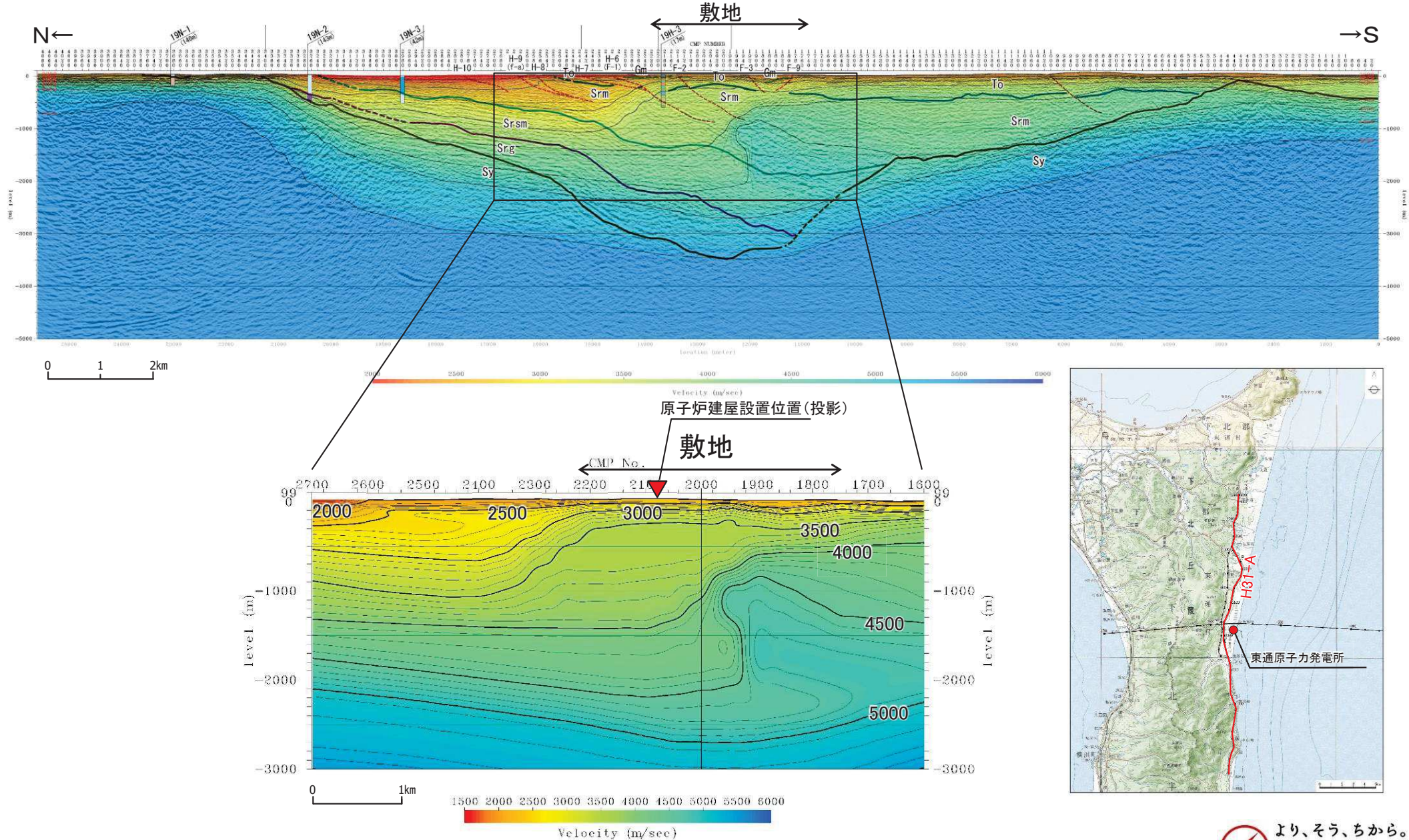
2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (17) 敷地周辺の東西方向の速度構造 (H24海陸統合探査)

➤ 敷地～敷地近傍の地下では概ね水平な速度構造となっている。



2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性 (18) 敷地周辺の南北方向の速度構造 (H31-A測線)

➤ 敷地～敷地近傍の地下では概ね水平な速度構造となっている。



2.3 まとめ

2.1 敷地の地質及び地質構造

- ・ 敷地の新第三系は、下位より、新第三系中新統の猿ヶ森層、泊層及び蒲野沢層で構成され、泊層には安山岩が貫入する。
- ・ 泊層上部層分布域に、地壘状をなして泊層下部層が分布し、半地溝状～地溝状をなして蒲野沢層が分布する。



2.2 原子炉建屋基礎地盤の工学的特性

- ・ 原子炉施設設置位置には泊層の火山碎屑岩と安山岩溶岩が分布し、やや離れた位置に蒲野沢層の砂岩、泥岩及び礫岩が分布している。
- ・ 岩盤分類は岩種・岩相によるグルーピングを基本として11岩種・岩相に分類した。
- ・ 原子炉建屋が設置される深さ(T.P.-16.3m)の岩盤は新鮮であり、著しい風化は認められない。
- ・ 原子炉建屋基礎地盤の地質構造及び速度層構造は、概ね水平な成層構造をなし、著しい高低差は認められない。
- ・ 原子炉建屋付近の岩盤は、 V_s =約1.4km/s以上の硬質な岩盤からなる。

3. 敷地地盤の振動特性

- 3. 1 解放基盤表面の設定
- 3. 2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)
- 3. 3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討
- 3. 4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較
- 3. 5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討
- 3. 6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討
- 3. 7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較
- 3. 8 まとめ

3.1 解放基盤表面の設定

(1) 解放基盤表面の要求事項と設定概要

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」
(原子力規制委員会、令和元年9月2日改正)

基準地震動を策定するために、基盤面上の表層及び構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当の広がりを持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう上記の「基盤」とは、おおむねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質岩盤であって、著しい風化を受けていないものとする。

原子炉建屋周辺地盤の特徴

- 新第三系の泊層等が相当な広がりをも有して分布。
- 速度構造は概ね水平な成層構造で、著しい高低差は認められない。
- 著しい風化も見られない。
- PS検層による V_s が約 1.4km/s 以上の硬質岩盤。
- 原子炉建屋周辺では、 V_s が 0.7km/s 未満の層は表層に分布。

敷地地盤の振動特性(後述)

Noda et al.(2002)と同等以下の振幅を示し、著しい増幅傾向は認められない。

- 自由地盤の岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の揺れは原子炉建屋直下(T.P.-16.3m)の揺れに対し同等以上となっている。
- 地震波の到来方向の違い及び場所の違いによる振動特性の検討から、地下構造の不均質性の影響は小さいため、一次元地盤モデルが適用可能。

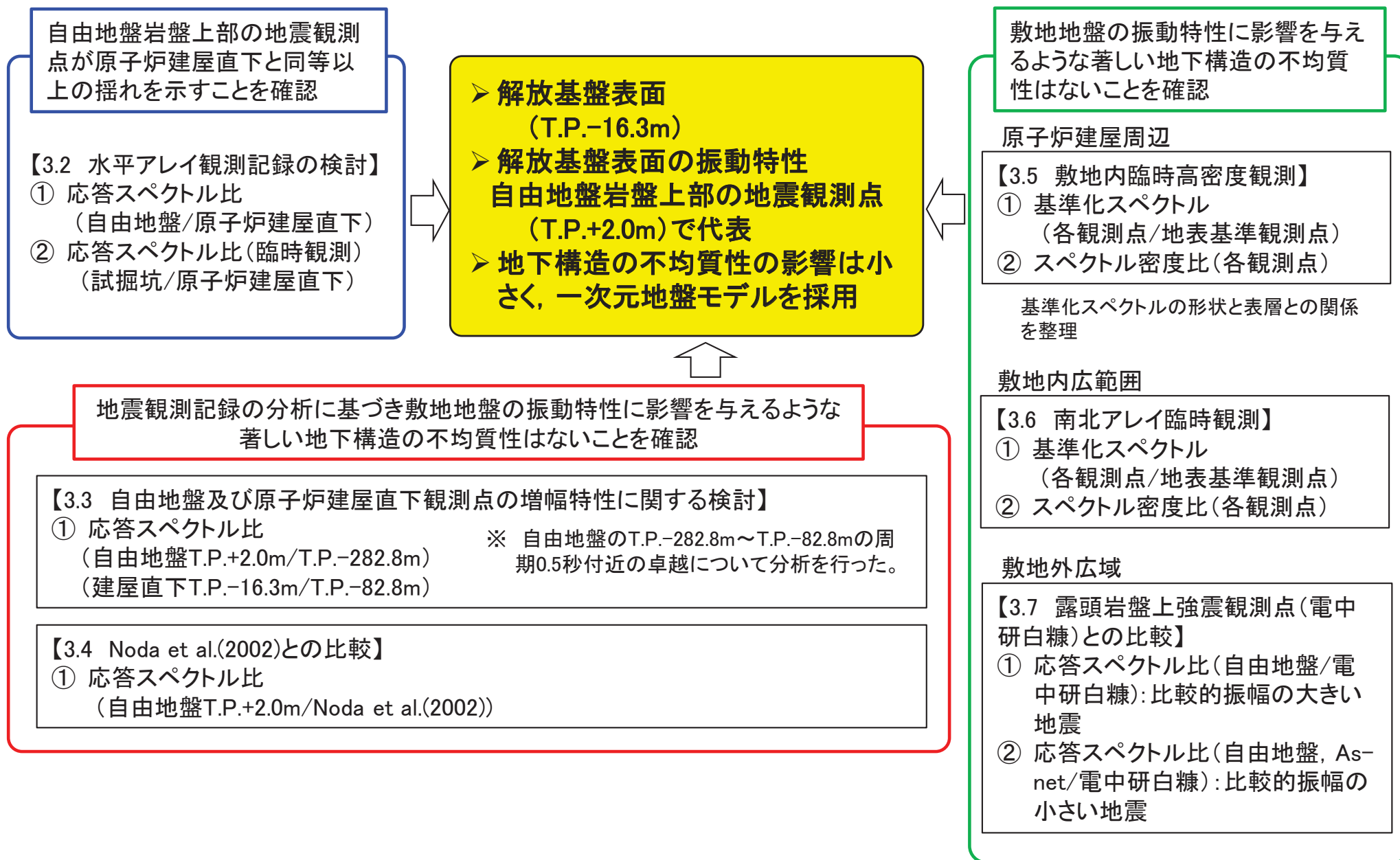
解放基盤表面の設定

解放基盤表面の位置は、原子炉建屋設置レベルであるT.P.-16.3mに設定する。

解放基盤表面の地震動評価

- 解放基盤表面の振動特性は、建屋の影響を受けず、振幅が原子炉建屋直下(T.P.-16.3m)と同等以上である自由地盤の岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)で代表する。
- 具体的な地震動評価を行う上での扱いは以下とする。
 - ① Noda et al.(2002)の適用にあたっては、自由地盤岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の観測記録による補正係数を用いる。
 - ② 統計的グリーン関数法に用いる地盤モデルは一次元とし、自由地盤の観測記録等を用いて設定する。
 - ③ 経験的グリーン関数法は、自由地盤岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)のはぎとり波を用いる。はぎとり用地盤モデルも一次元モデルを採用する。

3.1 解放基盤表面の設定 (2) 検討フロー

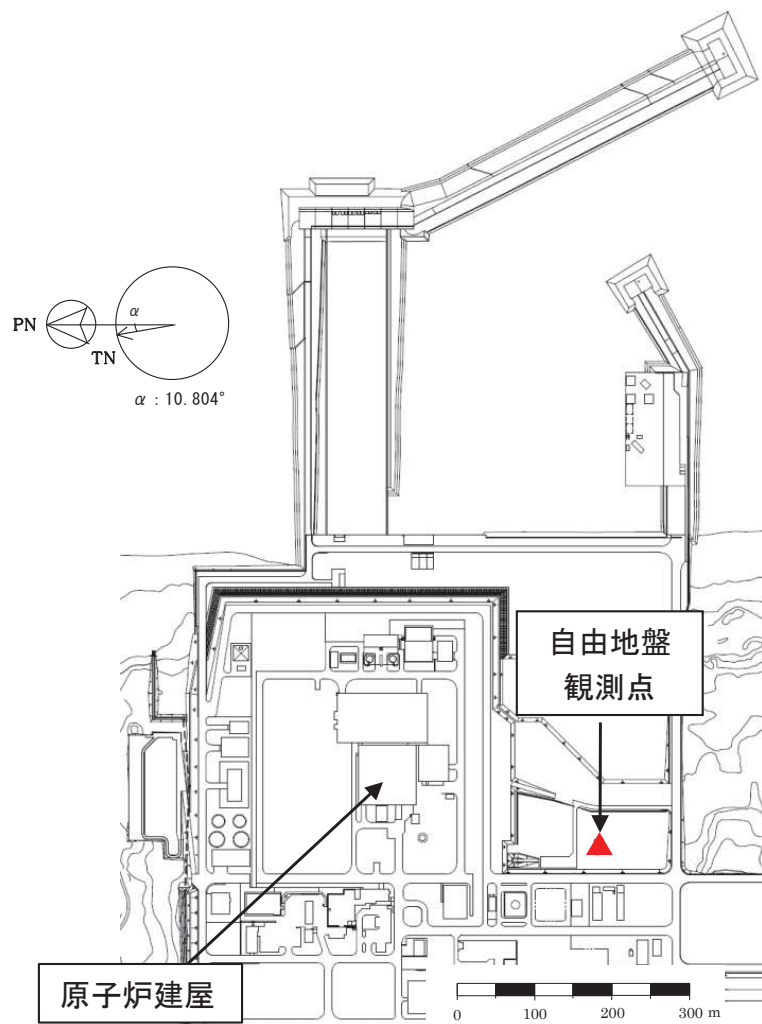


3.1 解放基盤表面の設定

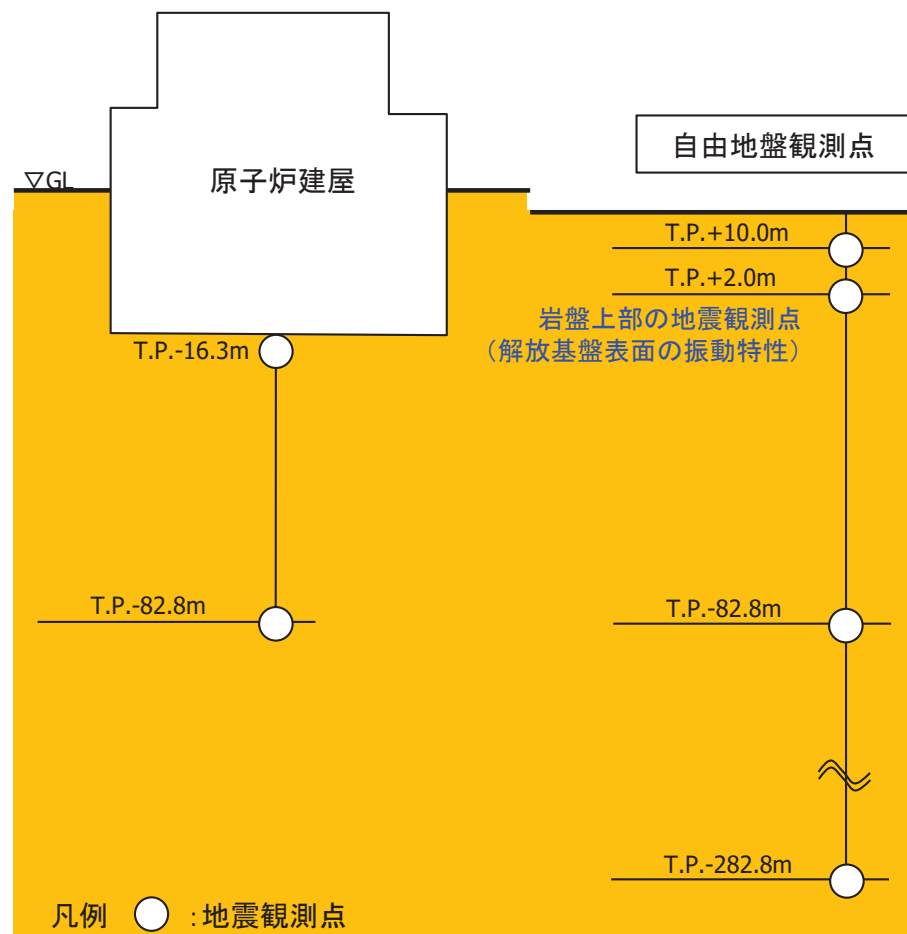
(3) 敷地における本設地震計(鉛直アレイと水平アレイ)

S165

- 敷地においては、自由地盤系では1994年4月から、原子炉建屋直下では2004年8月から地震観測を行っている。
- 解放基盤表面(原子炉建屋設置レベル, T.P.-16.3m)には火山砕屑岩が分布し、PS検層の速度層構造から、 V_s は1.4km/sである(PS検層結果は、補足説明資料2章を参照)。
- 解放基盤表面の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点には火山砕屑岩が分布し、地震観測記録を用いた最適化を行った結果、 V_s は1.3km/sである(検討は本資料4章で後述する。ボーリング柱状図及びPS検層結果は、補足説明資料4章を参照)。



平面配置図

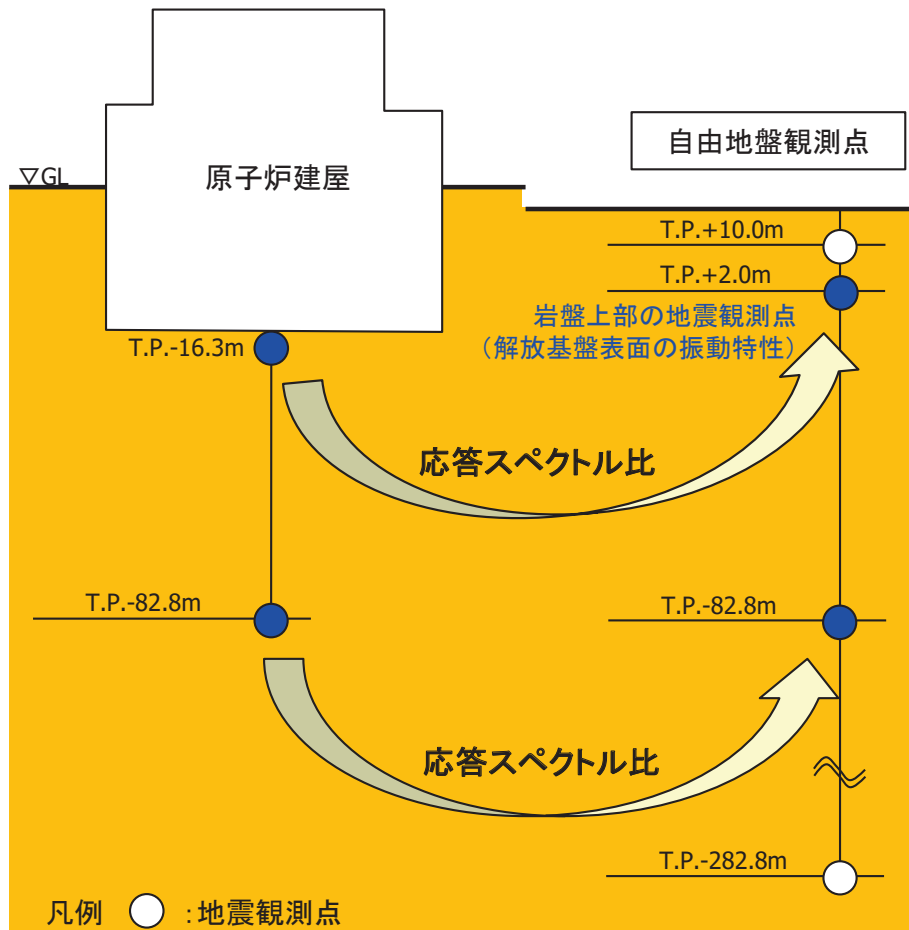


敷地内地盤系の地震観測点

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

(1) 原子炉建屋直下と自由地盤の地震観測記録の比較 概要

【目的】 水平アレイ観測記録を用いて、自由地盤の岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の揺れが解放基盤表面(原子炉建屋直下T.P.-16.3m)の揺れに対し同等以上であることを確認する。



検討の模式図

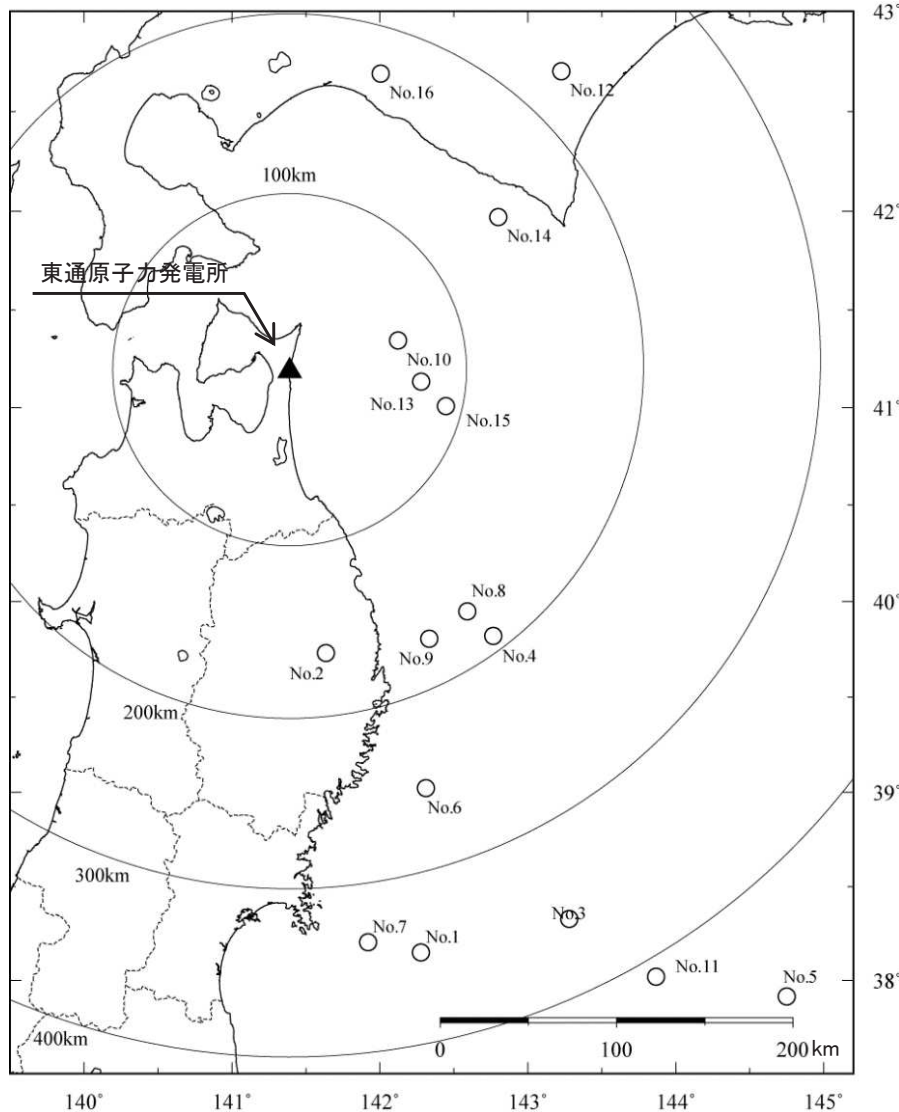


検討に用いた地震観測点

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

(2) 検討対象地震

- 検討に用いた記録は、原子炉建屋と地盤の相互作用の影響も踏まえ、M6.0以上を目安に、地震規模が大きく継続時間の長い地震として、以下の16地震を対象とした。



検討に用いた観測地震

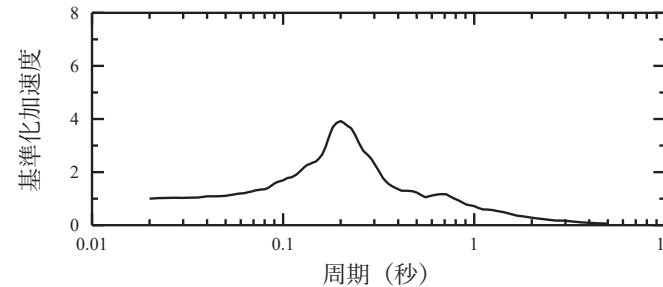
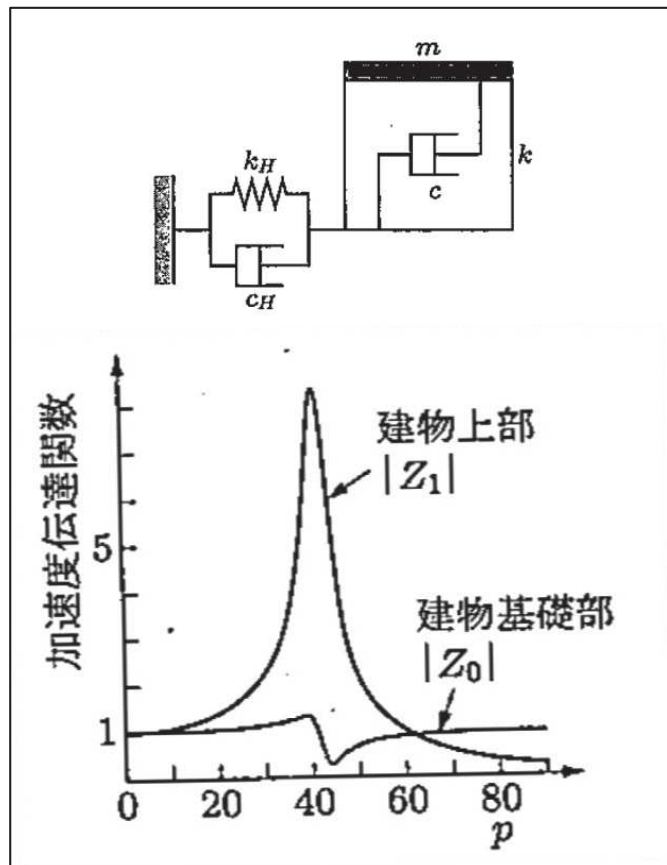
| No. | 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 東経 | | 北緯 | | M | 震源 深さ (km) | 震央 距離 (km) |
|-----|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|
| | | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | |
| 1 | 2005 | 8 | 16 | 11 | 46 | 142 | 16.67 | 38 | 8.97 | 7.2 | 42 | 346 |
| 2 | 2008 | 7 | 24 | 0 | 26 | 141 | 38.12 | 39 | 43.92 | 6.8 | 108 | 163 |
| 3 | 2011 | 3 | 9 | 11 | 45 | 143 | 16.79 | 38 | 19.71 | 7.3 | 8 | 356 |
| 4 | 2011 | 3 | 11 | 15 | 8 | 142 | 46.01 | 39 | 49.24 | 7.4 | 32 | 192 |
| 5 | 2011 | 3 | 11 | 15 | 25 | 144 | 45.06 | 37 | 54.86 | 7.5 | 11 | 464 |
| 6 | 2011 | 3 | 11 | 16 | 28 | 142 | 18.67 | 39 | 1.35 | 6.6 | 17 | 253 |
| 7 | 2011 | 4 | 7 | 23 | 32 | 141 | 55.21 | 38 | 12.25 | 7.2 | 66 | 334 |
| 8 | 2011 | 6 | 23 | 6 | 50 | 142 | 35.45 | 39 | 56.87 | 6.9 | 36 | 171 |
| 9 | 2012 | 3 | 27 | 20 | 0 | 142 | 20.03 | 39 | 48.38 | 6.6 | 21 | 173 |
| 10 | 2012 | 5 | 24 | 0 | 2 | 142 | 7.42 | 41 | 20.62 | 6.1 | 60 | 64 |
| 11 | 2012 | 12 | 7 | 17 | 18 | 143 | 52.02 | 38 | 1.19 | 7.3 | 49 | 411 |
| 12 | 2013 | 2 | 2 | 23 | 17 | 143 | 13.65 | 42 | 42.12 | 6.5 | 102 | 227 |
| 13 | 2014 | 8 | 10 | 12 | 43 | 142 | 16.74 | 41 | 8.04 | 6.1 | 51 | 75 |
| 14 | 2016 | 1 | 14 | 12 | 25 | 142 | 48.07 | 41 | 58.21 | 6.7 | 52 | 146 |
| 15 | 2018 | 1 | 24 | 19 | 51 | 142 | 26.88 | 41 | 0.58 | 6.3 | 34 | 91 |
| 16 | 2018 | 9 | 6 | 3 | 7 | 142 | 0.4 | 42 | 41.4 | 6.7 | 37 | 174 |

検討に用いた観測地震の震央分布

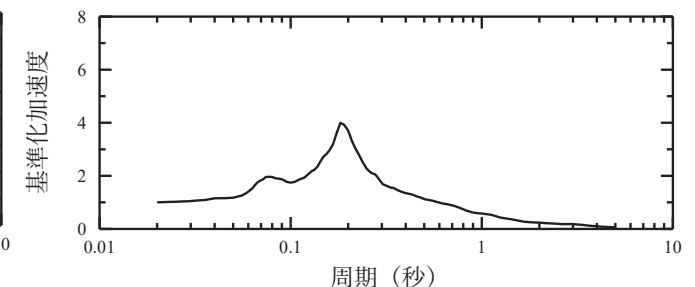
3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

(3) 原子炉建屋直下と支持地盤の相互作用

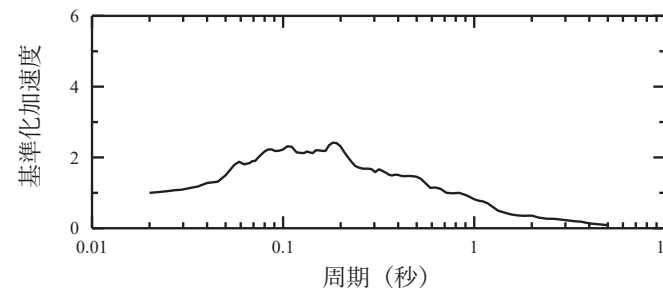
- 原子炉建屋直下地中の観測記録は、建屋の振動特性の影響を受けていることが考えられる。一般に、建屋直下の支持地盤には、建屋の1次固有周期前後において「山」と「谷」が生じる。
- そこで、検討に用いた16地震における原子炉建屋の卓越周期を確認するために、3F(オペレーションフロア)に設置されている地震計の観測記録を用い、周期0.02秒の応答値を1とした基準化応答スペクトルの平均値を算定した。
- NS成分, EW成分とも周期約0.2秒付近にピークが認められる。UD成分については水平動のような明瞭なピークは認められない。従って、原子炉建屋直下地中の振動特性としては、**水平動の周期0.2秒前後に山, 谷のピークが生じていることが予想される。**



(a) NS成分



(b) EW成分



(c) UD成分

※下記の地震については、UD成分については、3Fの観測記録が欠測(ノイズ)のため算定から除外した。
2018年1月24日青森県沖の地震
2018年9月6日胆振地方中東部の地震

原子炉建屋3Fの卓越周期(PN基準)
(3F観測記録の基準化応答スペクトル(h=0.05)の平均)

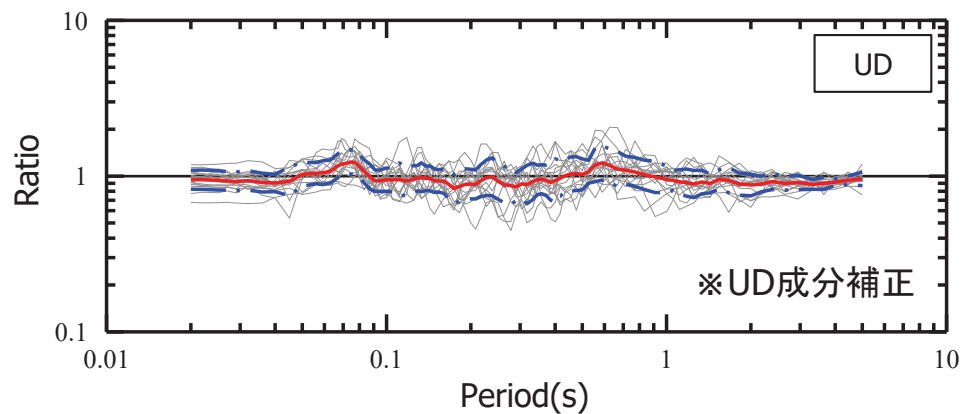
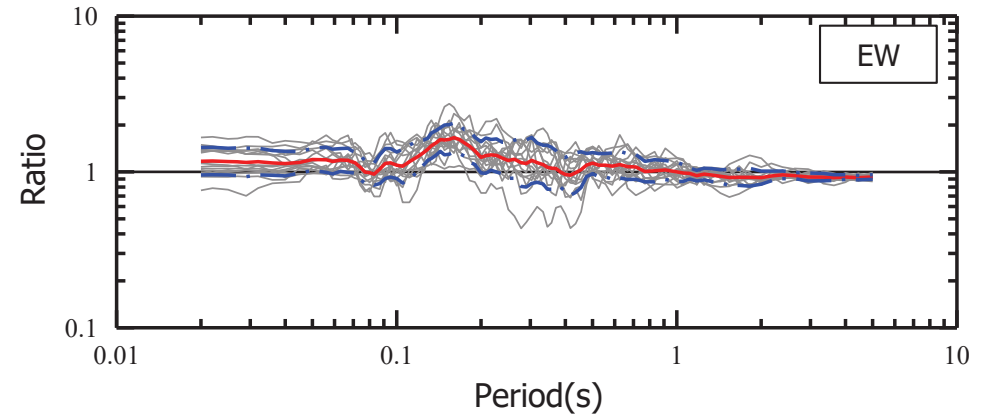
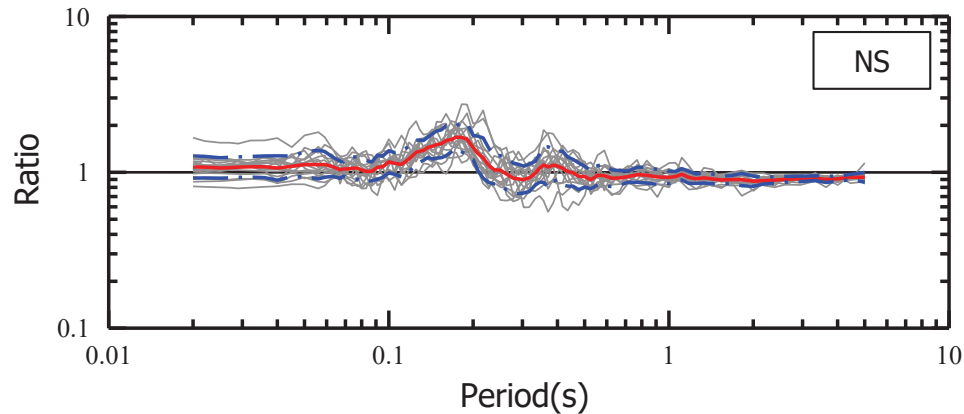
建物と地盤の相互作用を持つ1質点系
建物基礎部の応答
〔柴田(2014)より抜粋〕

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

(4) 原子炉建屋設置レベル(T.P.-16.3m)に対する自由地盤(T.P.+2.0m)の応答スペクトル比

【原子炉建屋設置レベル(T.P.-16.3m)に対する自由地盤岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の応答スペクトル比】

- NS成分については周期0.2秒前後にピーク(「山」,「谷」)が, EW成分にも「山」が認められるが, その他の周期帯では両者はほぼ同等(自由地盤がやや大きい)傾向にある。
- UD成分については, 両者はほぼ同等となっている。



— 地震毎の比率 — 平均
- - - 平均±標準偏差

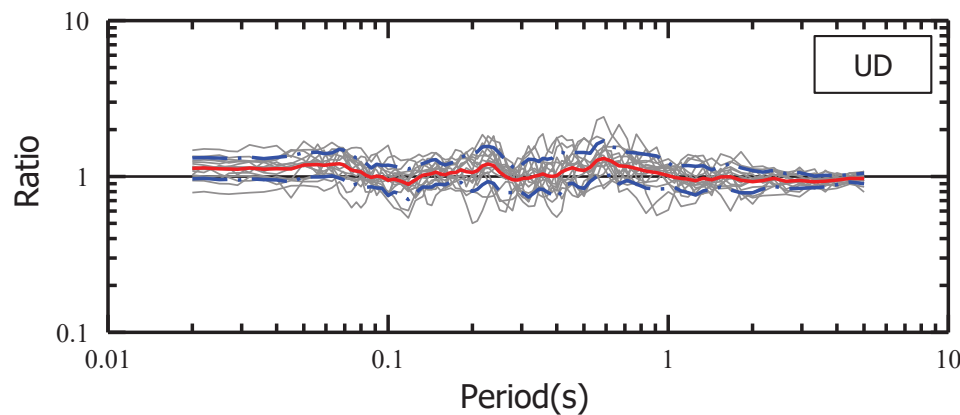
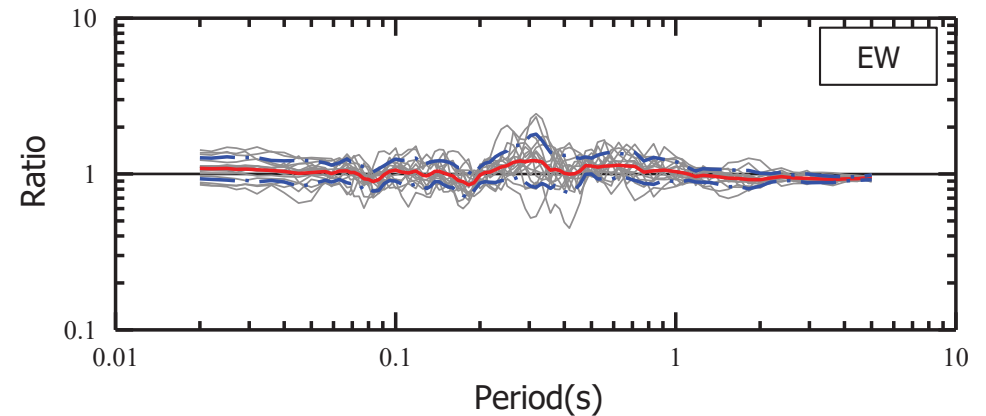
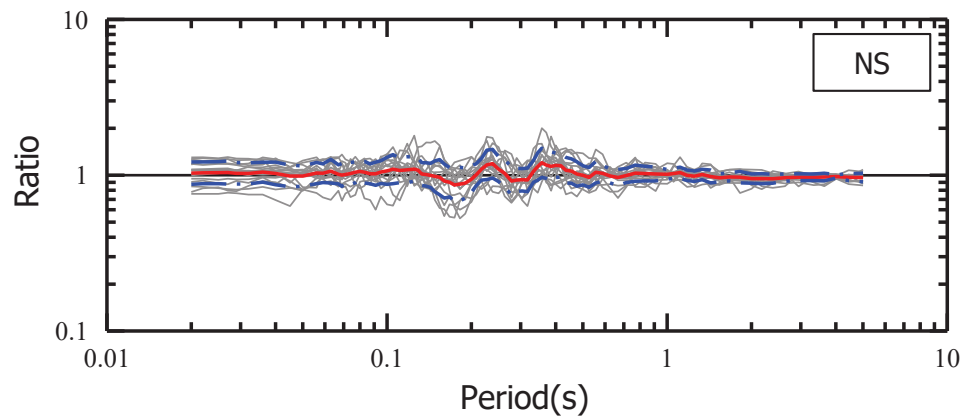
原子炉建屋設置レベル(T.P.-16.3m)に対する自由地盤(T.P.+2.0m)の観測記録の応答スペクトル比(PN基準)
自由地盤岩盤上部(T.P.+2.0m)／原子炉建屋地中(T.P.-16.3m)

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

(5) 原子炉建屋直下(T.P.-82.8m)に対する自由地盤(T.P.-82.8m)の応答スペクトル比

【原子炉建屋直下(T.P.-82.8m)に対する自由地盤(T.P.-82.8m)の観測記録の応答スペクトル比】

➤ このレベルでは建屋の影響は小さく、原子炉建屋直下と自由地盤の振動特性は概ね同等である。



— 地震毎の比率 — 平均
- - 平均±標準偏差

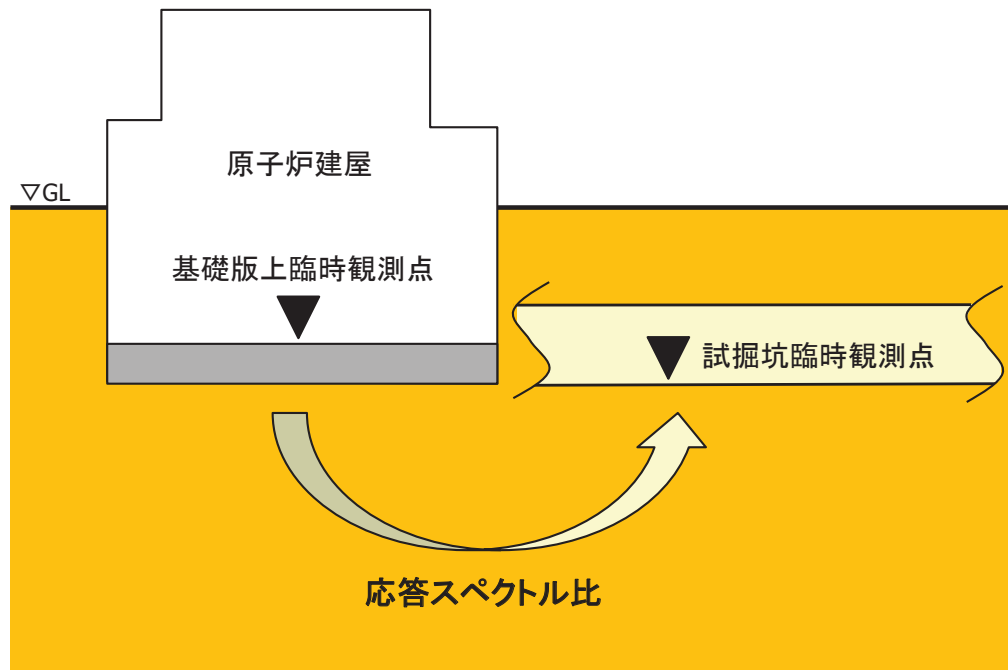
原子炉建屋直下(T.P.-82.8m)に対する自由地盤(T.P.-82.8m)の観測記録の応答スペクトル比(PN基準)
自由地盤(T.P.-82.8m)／原子炉建屋地中(T.P.-82.8m)

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

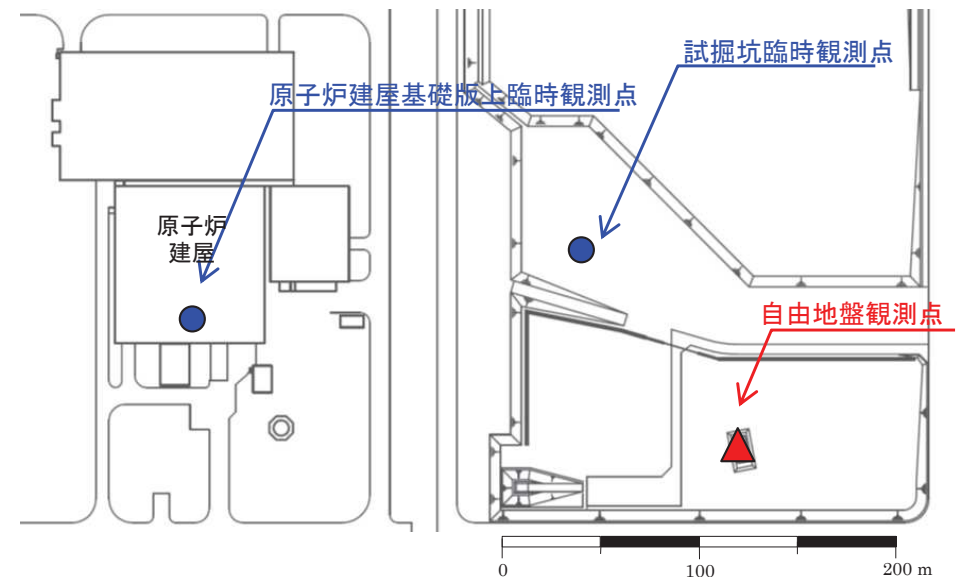
(6) 臨時地震観測による原子炉建屋が支持地盤に与える影響の確認

- 東通原子力発電所では原子炉建屋基礎版上 (T.P.-10.8m) と試掘坑 [約T.P.-16m, 第1速度層 (約Vs1.5km/sレベル)] で臨時地震観測を実施しており, 両者の記録を比較することにより, 原子炉建屋が支持地盤 (基礎版と同等の揺れを示す*) に与える影響について確認した。

※補足説明資料3章参照。



検討の模式図



検討に用いた地震観測点

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

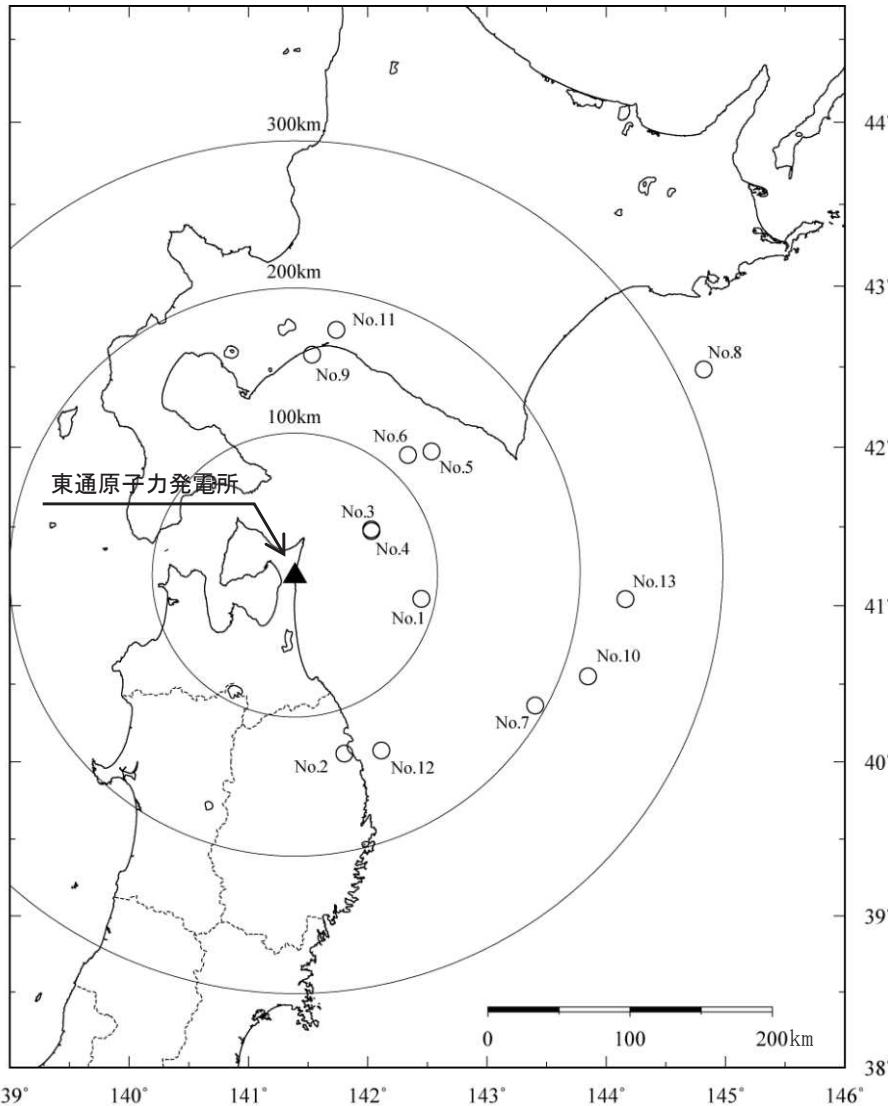
(7) 臨時地震観測の検討に用いた地震

- 検討に用いた記録は、2018年12月～2019年11月に臨時地震観測点で得た記録のうち、原子炉建屋基礎版上の最大加速度振幅が 0.1cm/s^2 以上の13地震とした。

検討に用いた観測地震

| No. | 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 東経 | | 北緯 | | M | 震源 深さ (km) | 震央 距離 (km) | A_{\max} (cm/s^2) |
|-----|------|---|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|-----------------------------------|
| | | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | |
| 1 | 2019 | 3 | 18 | 7 | 53 | 142 | 27.03 | 41 | 2.63 | 4.1 | 49 | 139 | 0.27 |
| 2 | 2019 | 3 | 18 | 9 | 33 | 141 | 48.32 | 40 | 3.23 | 3.7 | 57 | 179 | 0.12 |
| 3 | 2019 | 3 | 30 | 19 | 59 | 142 | 1.76 | 41 | 29.06 | 3.9 | 63 | 93 | 0.28 |
| 4 | 2019 | 3 | 31 | 8 | 20 | 142 | 1.91 | 41 | 28.42 | 3.6 | 63 | 93 | 0.12 |
| 5 | 2019 | 4 | 3 | 5 | 29 | 142 | 32.17 | 41 | 58.42 | 4.3 | 62 | 144 | 0.11 |
| 6 | 2019 | 4 | 8 | 22 | 22 | 142 | 20.33 | 41 | 57.11 | 4.2 | 71 | 128 | 0.15 |
| 7 | 2019 | 4 | 11 | 17 | 18 | 143 | 24.29 | 40 | 21.75 | 6.2 | 5 | 245 | 0.97 |
| 8 | 2019 | 4 | 15 | 5 | 28 | 144 | 49.09 | 42 | 29.12 | 5.1 | 43 | 340 | 0.11 |
| 9 | 2019 | 4 | 19 | 16 | 5 | 141 | 32.09 | 42 | 34.62 | 3.9 | 122 | 129 | 0.18 |
| 10 | 2019 | 4 | 23 | 2 | 45 | 143 | 50.81 | 40 | 32.98 | 5.6 | 57 | 268 | 0.27 |
| 11 | 2019 | 5 | 4 | 21 | 34 | 141 | 44.25 | 42 | 43.77 | 4.2 | 133 | 152 | 0.15 |
| 12 | 2019 | 5 | 8 | 9 | 20 | 142 | 6.93 | 40 | 4.48 | 4.4 | 48 | 189 | 0.53 |
| 13 | 2019 | 6 | 13 | 9 | 56 | 144 | 9.71 | 41 | 2.57 | 4.7 | 63 | 276 | 0.20 |

※ A_{\max} : 原子炉建屋基礎版上の臨時観測点における水平成分の最大加速度(cm/s^2)。
高感度速度計の速度記録を加速度に変換。



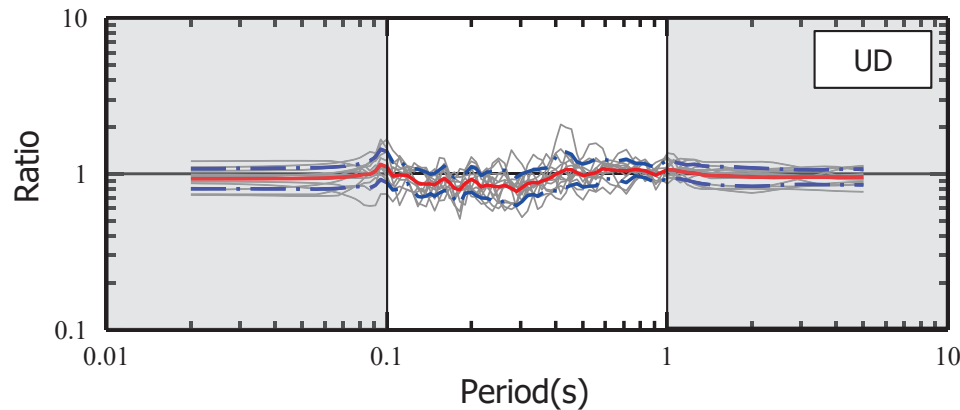
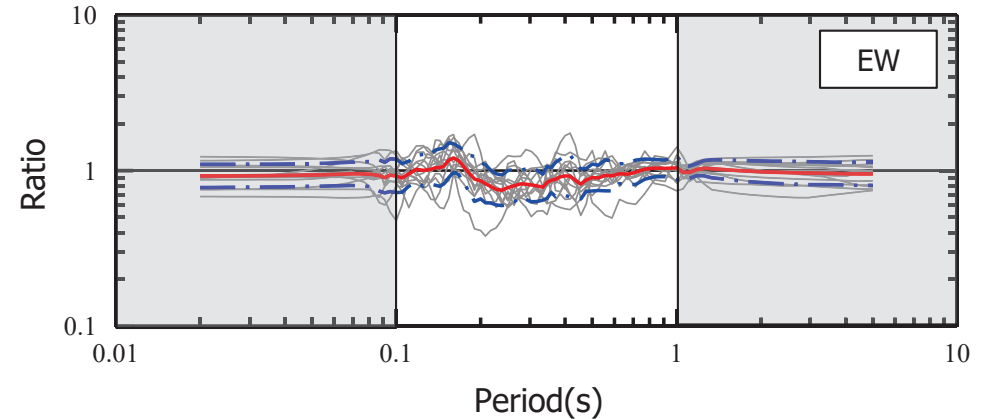
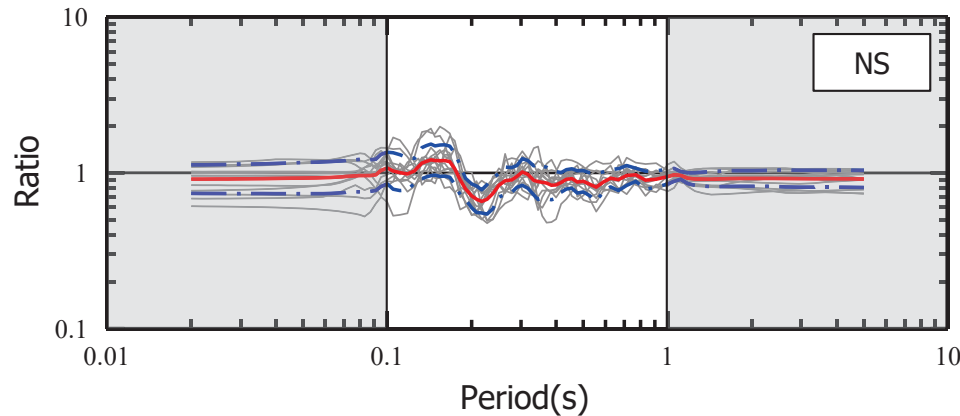
検討に用いた観測地震の震央分布

3.2 水平アレイ観測記録の検討(原子炉建屋直下と自由地盤)

(8) 臨時地震観測による原子炉建屋基礎版上と試掘坑の比較

【原子炉建屋基礎版上に対する試掘坑(約T.P.-16m)の応答スペクトル比】

- NS成分, EW成分とも周期0.2秒前後にピーク(「山」, 「谷」)が認められる。一方UD成分は両者はほぼ同等である。得られた水平動の「山」, 「谷」の傾向は, 自由地盤(T.P.+2.0m)／建屋直下(T.P.-16.3m)のスペクトル比の傾向と同じであり, このことから, 自由地盤(T.P.+2.0m)／建屋直下(T.P.-16.3m)のスペクトル比の「山」, 「谷」は建屋の影響によるものと判断される。



— 地震毎の比率 — 平均
— 平均±標準偏差

※ 臨時地震観測は高感度速度計の記録を用いた。速度から加速度に変換する際に発生するノイズを除去するため1~10Hzのバンドパスフィルタ処理を行った。したがって, 本検討における有効周期帯は, 網掛を行っていない周期0.1~1秒の範囲である。

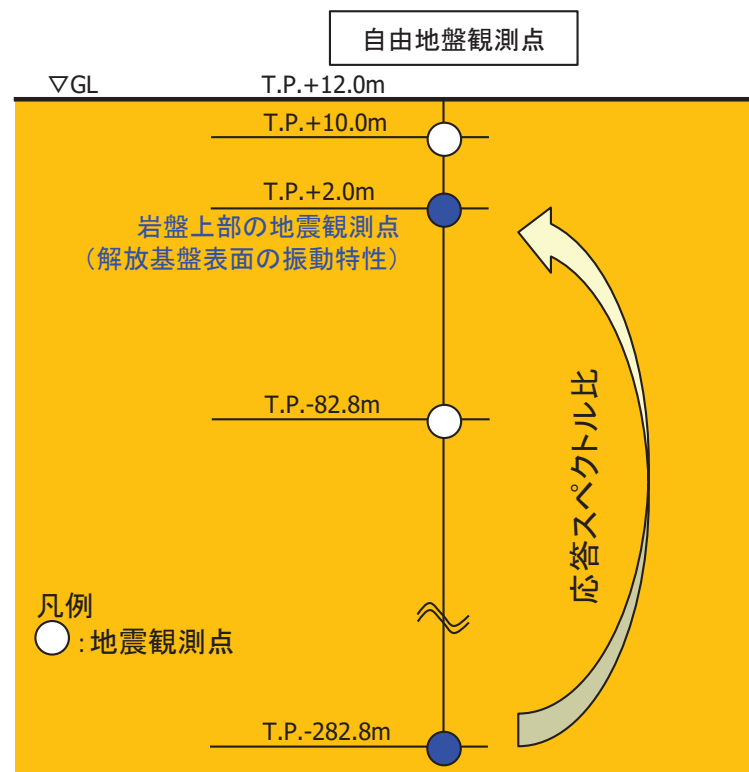
原子炉建屋基礎版上に対する試掘坑の観測記録の応答スペクトル比(PN基準)
試掘坑観測点(約T.P.-16m)／原子炉建屋基礎版上観測点

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

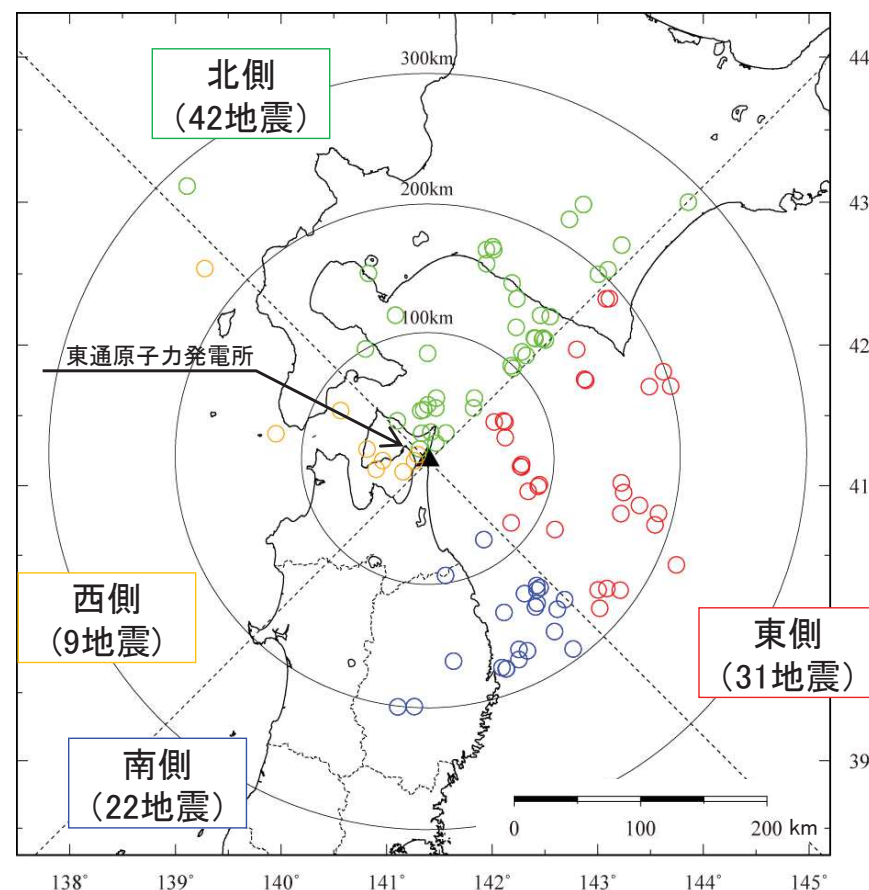
(1) 自由地盤の増幅特性に関する検討

【目的】自由地盤の鉛直アレイ記録を用いて、①増幅特性に著しく大きい周期帯はないこと、②各地震の増幅特性のばらつきも大きいものではないこと、③地震波到来方向の違いによる増幅特性のばらつきも小さいことを確認する。

- 増幅特性の検討は、T.P.-282.8mの地震観測点に対する解放基盤表面の振動特性を表す岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の応答スペクトル比を用いた。
- 検討に用いた観測記録は、観測開始(1994年)～2018年の期間に敷地の自由地盤観測点で得られた地震のうち、Noda et al.(2002)の適用範囲であるM5.5以上、震源距離200km程度以内の57地震に加え、地震数の少ない西側及び北側については、地震規模の小さなものも含め震央距離300km以内の47地震を追加し、計104地震を検討対象とした。
- なお、地震規模の小さい地震に対しては信頼限界周期を評価した上で検討に使用した。



検討に用いた地震観測点



対象地震の分布(震央位置)

全方位:地震規模M5.5以上、震源距離200km程度以内の57地震とした。
西側・北側:上記のほか、震央距離300km以内の47地震を追加した。

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

(2) 自由地盤の検討に用いた地震観測記録① (Noda et al.(2002)の検討にも使用した地震)

| 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) | 震央 方位 | 備考 | 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) | 震央 方位 | 備考 | |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|--------|--|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|-------|--|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | | | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | | |
| | | | | | つづき | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1994 | 12 | 28 | 21 | 19 | 143 | 44.7 | 40 | 25.8 | 7.6 | 0 | 216 | 216 | 東 | プレート間 | 2011 | 3 | 11 | 15 | 49 | 142 | 37.08 | 40 | 6.57 | 5.9 | 7 | 159 | 159 | 南 | プレート間 | |
| 1994 | 12 | 29 | 5 | 52 | 143 | 1.2 | 40 | 7 | 6.5 | 0 | 182 | 182 | 東 | プレート間 | 2011 | 3 | 17 | 13 | 13 | 142 | 24.69 | 40 | 7.58 | 5.9 | 31 | 146 | 149 | 南 | プレート間 | |
| 1994 | 12 | 30 | 0 | 29 | 142 | 10.8 | 40 | 44 | 5.6 | 53 | 84 | 99 | 東 | プレート間 | 2011 | 6 | 23 | 6 | 50 | 142 | 35.45 | 39 | 56.87 | 6.9 | 36 | 171 | 175 | 南 | プレート間 | |
| 1994 | 12 | 31 | 22 | 50 | 142 | 41.2 | 40 | 10.8 | 5.8 | 24 | 157 | 159 | 南 | プレート間 | 2011 | 8 | 1 | 22 | 44 | 142 | 15.21 | 39 | 48.96 | 5.8 | 43 | 169 | 174 | 南 | プレート間 | |
| 1995 | 1 | 7 | 7 | 37 | 142 | 18.33 | 40 | 13.4 | 7.2 | 48 | 132 | 141 | 南 | プレート間 | 2011 | 9 | 17 | 4 | 26 | 143 | 5.17 | 40 | 15.55 | 6.6 | 7 | 177 | 177 | 東 | プレート間 | |
| 1995 | 1 | 7 | 11 | 36 | 142 | 25.28 | 40 | 16.81 | 6.2 | 38 | 133 | 139 | 南 | プレート間 | 2011 | 9 | 17 | 6 | 8 | 143 | 12.77 | 40 | 14.84 | 6.1 | 4 | 186 | 186 | 東 | プレート間 | |
| 1995 | 2 | 6 | 22 | 51 | 142 | 16.12 | 41 | 8.36 | 5.6 | 56 | 74 | 93 | 東 | プレート間 | 2011 | 9 | 17 | 16 | 33 | 143 | 0.18 | 40 | 14.98 | 5.5 | 14 | 172 | 172 | 東 | プレート間 | |
| 1995 | 9 | 26 | 16 | 14 | 143 | 29.27 | 41 | 42.38 | 5.9 | 38 | 185 | 188 | 東 | プレート間 | 2011 | 11 | 24 | 19 | 25 | 142 | 53.24 | 41 | 45.02 | 6.2 | 43 | 140 | 146 | 東 | プレート間 | |
| 1995 | 12 | 30 | 21 | 17 | 143 | 32.58 | 40 | 43.13 | 6.2 | 0 | 189 | 189 | 東 | プレート間 | 2012 | 1 | 28 | 9 | 22 | 142 | 25.61 | 40 | 9.19 | 5.7 | 36 | 145 | 149 | 南 | プレート間 | |
| 1995 | 12 | 31 | 5 | 45 | 143 | 34.59 | 40 | 48.05 | 5.6 | 3 | 189 | 189 | 東 | プレート間 | 2012 | 3 | 27 | 20 | 0 | 142 | 20.03 | 39 | 48.38 | 6.6 | 21 | 173 | 174 | 南 | 内陸 | |
| 1997 | 2 | 20 | 16 | 55 | 142 | 52.45 | 41 | 45.57 | 5.9 | 49 | 139 | 148 | 東 | プレート間※ | 2012 | 4 | 30 | 0 | 2 | 142 | 15.3 | 39 | 44.53 | 5.6 | 23 | 177 | 178 | 南 | 内陸 | |
| 1999 | 3 | 19 | 2 | 55 | 143 | 13.39 | 41 | 1.25 | 5.8 | 29 | 155 | 158 | 東 | プレート間 | 2012 | 5 | 24 | 0 | 2 | 142 | 7.42 | 41 | 20.62 | 6.1 | 60 | 64 | 87 | 東 | プレート間 | |
| 2001 | 4 | 3 | 4 | 54 | 141 | 55.27 | 40 | 36.78 | 5.6 | 63 | 78 | 101 | 南 | プレート内 | 2012 | 8 | 25 | 23 | 16 | 143 | 6.64 | 42 | 19.67 | 6.1 | 49 | 191 | 197 | 東 | プレート間 | |
| 2001 | 8 | 14 | 5 | 11 | 142 | 26.19 | 40 | 59.73 | 6.4 | 38 | 90 | 98 | 東 | プレート間 | 2014 | 6 | 15 | 2 | 31 | 141 | 6.46 | 39 | 23.77 | 5.5 | 94 | 200 | 221 | 南 | プレート内 | |
| 2001 | 12 | 2 | 22 | 1 | 141 | 15.79 | 39 | 23.9 | 6.4 | 122 | 199 | 233 | 南 | プレート内 | 2014 | 7 | 5 | 7 | 42 | 142 | 8.16 | 39 | 40.55 | 5.9 | 49 | 179 | 186 | 南 | プレート間 | |
| 2002 | 10 | 14 | 23 | 12 | 142 | 16.85 | 41 | 9.11 | 6.1 | 53 | 75 | 92 | 東 | プレート間 | 2014 | 8 | 10 | 12 | 43 | 142 | 16.74 | 41 | 8.04 | 6.1 | 51 | 75 | 90 | 東 | プレート間 | |
| 2003 | 4 | 17 | 2 | 59 | 142 | 20.51 | 40 | 57.64 | 5.6 | 40 | 84 | 93 | 東 | プレート間 | 2014 | 10 | 11 | 11 | 35 | 143 | 14.68 | 40 | 57.13 | 6.1 | 36 | 158 | 162 | 東 | プレート間 | |
| 2003 | 9 | 26 | 6 | 8 | 143 | 41.49 | 41 | 42.59 | 7.1 | 21 | 201 | 202 | 東 | プレート間 | 2015 | 2 | 17 | 13 | 46 | 142 | 6.72 | 40 | 5.12 | 5.7 | 50 | 137 | 146 | 南 | プレート間 | |
| 2004 | 7 | 21 | 9 | 11 | 143 | 23.68 | 40 | 51.54 | 5.5 | 37 | 173 | 176 | 東 | プレート間 | 2015 | 6 | 8 | 15 | 1 | 142 | 1.19 | 41 | 27.35 | 5.6 | 66 | 61 | 90 | 東 | プレート間 | |
| 2004 | 8 | 10 | 15 | 13 | 142 | 7.93 | 39 | 40.44 | 5.8 | 48 | 180 | 186 | 南 | プレート間 | 2015 | 7 | 10 | 3 | 32 | 141 | 33.59 | 40 | 21.24 | 5.7 | 88 | 94 | 129 | 南 | プレート内 | |
| 2004 | 11 | 27 | 7 | 42 | 143 | 4.81 | 42 | 19.55 | 5.6 | 51 | 189 | 196 | 東 | プレート間 | 2016 | 1 | 14 | 12 | 25 | 142 | 48.07 | 41 | 58.21 | 6.7 | 52 | 146 | 155 | 東 | プレート間 | |
| 2005 | 2 | 26 | 21 | 37 | 142 | 35.77 | 40 | 41.12 | 5.7 | 45 | 116 | 124 | 東 | プレート内 | 2017 | 9 | 10 | 17 | 44 | 142 | 52.67 | 41 | 45.55 | 5.6 | 43 | 139 | 146 | 東 | プレート間 | |
| 2007 | 4 | 19 | 0 | 7 | 141 | 56.8 | 42 | 40.24 | 5.6 | 126 | 171 | 213 | 北 | プレート内 | 2017 | 9 | 27 | 5 | 22 | 142 | 27.32 | 40 | 16 | 6.1 | 35 | 136 | 141 | 南 | プレート間 | |
| 2008 | 4 | 29 | 14 | 26 | 142 | 6.5 | 41 | 27.78 | 5.7 | 62 | 67 | 91 | 東 | プレート間 | 2017 | 12 | 16 | 2 | 58 | 142 | 5.69 | 39 | 41.17 | 5.5 | 52 | 177 | 185 | 南 | プレート内 | |
| 2008 | 7 | 24 | 0 | 26 | 141 | 38.12 | 39 | 43.92 | 6.8 | 108 | 163 | 196 | 南 | プレート内 | 2018 | 1 | 24 | 19 | 51 | 142 | 26.88 | 41 | 0.58 | 6.3 | 34 | 91 | 97 | 東 | プレート間 | |
| 2008 | 9 | 22 | 16 | 31 | 140 | 33.93 | 41 | 32.28 | 5.6 | 152 | 79 | 171 | 西 | プレート内 | 2018 | 9 | 6 | 3 | 7 | 142 | 0.4 | 42 | 41.4 | 6.7 | 37 | 174 | 178 | 北 | 内陸 | |
| 2009 | 2 | 15 | 18 | 24 | 142 | 25.41 | 40 | 15.01 | 5.9 | 36 | 136 | 141 | 南 | プレート間 | 2018 | 9 | 6 | 3 | 20 | 141 | 56.9 | 42 | 34.3 | 5.5 | 36 | 160 | 164 | 北 | 内陸 | |
| 2009 | 6 | 5 | 12 | 30 | 143 | 37.22 | 41 | 48.74 | 6.4 | 31 | 199 | 201 | 東 | プレート間 | 本リストは、増幅特性の検討及びNoda et al.(2002)の比較に用いる。全地震の信頼限界周期は5秒以上であることを確認している。 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2010 | 9 | 13 | 14 | 47 | 142 | 7.31 | 41 | 27.36 | 5.8 | 63 | 68 | 93 | 東 | プレート間 | ※ 1997年2月20日の地震については、T.P.-282.8mの観測記録が欠測のため、増幅特性の検討からは除く。 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2010 | 12 | 6 | 16 | 30 | 143 | 13.1 | 40 | 47.95 | 5.8 | 7 | 160 | 160 | 東 | プレート間 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2011 | 3 | 11 | 15 | 8 | 142 | 46.01 | 39 | 49.24 | 7.4 | 32 | 192 | 194 | 南 | プレート間 | | | | | | | | | | | | | | | | |

つづく

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

(2) 自由地盤の検討に用いた地震観測記録② (西側・北側で追加した地震, $\Delta \leq 300\text{km}$)

西側で追加した地震

| 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) | 震央 方位 | 備考※ |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|--------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | |
| 1996 | 2 | 23 | 0 | 0 | 139 | 16.75 | 42 | 32.30 | - | 3 | 231 | 231 | 西 | - |
| 1996 | 4 | 24 | 9 | 18 | 141 | 17.74 | 41 | 13.35 | 3.3 | 12 | 9 | 15 | 西 | - |
| 1999 | 2 | 23 | 2 | 5 | 141 | 9.38 | 41 | 5.98 | 2.8 | 13 | 22 | 25 | 西 | (1秒) |
| 2000 | 4 | 12 | 0 | 8 | 139 | 57.21 | 41 | 22.34 | 4.3 | 12 | 122 | 123 | 西 | (1秒) |
| 2001 | 12 | 6 | 15 | 13 | 140 | 54.17 | 41 | 7.08 | 3.6 | 12 | 42 | 43 | 西 | (1.5秒) |
| 2004 | 9 | 4 | 11 | 18 | 140 | 48.98 | 41 | 15.69 | 3.8 | 14 | 49 | 51 | 西 | (2秒) |
| 2018 | 3 | 9 | 18 | 15 | 141 | 15.91 | 41 | 10.77 | 4.4 | 93 | 11 | 94 | 西 | - |
| 2018 | 4 | 29 | 21 | 31 | 140 | 57.86 | 41 | 10.82 | 3.3 | 7 | 36 | 36 | 西 | (1.5秒) |

北側で追加した地震

| 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) | 震央 方位 | 備考※ |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|--------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | |
| 1994 | 4 | 26 | 16 | 36 | 141 | 21.10 | 41 | 32.50 | 3.6 | 92 | 39 | 100 | 北 | (1秒) |
| 1994 | 4 | 29 | 22 | 38 | 142 | 51.90 | 42 | 59.10 | 4.8 | 127 | 234 | 266 | 北 | - |
| 1994 | 8 | 5 | 14 | 53 | 142 | 24.4 | 42 | 2.80 | 4.2 | 67 | 128 | 144 | 北 | (1.5秒) |
| 1994 | 12 | 10 | 7 | 48 | 142 | 16.90 | 41 | 57.1 | 4.7 | 65 | 113 | 130 | 北 | - |
| 1995 | 4 | 16 | 0 | 14 | 141 | 28.25 | 41 | 37.53 | 4.2 | 86 | 49 | 99 | 北 | - |
| 1995 | 6 | 25 | 10 | 12 | 141 | 23.51 | 41 | 34.69 | 3.6 | 95 | 43 | 104 | 北 | (2秒) |
| 1995 | 9 | 16 | 8 | 52 | 143 | 51.50 | 43 | 0.02 | 5.2 | 110 | 287 | 307 | 北 | - |
| 1995 | 11 | 26 | 4 | 36 | 142 | 14.08 | 42 | 19.58 | 4.3 | 104 | 145 | 178 | 北 | - |
| 1995 | 12 | 30 | 3 | 17 | 141 | 19.92 | 41 | 22.48 | 3.6 | 92 | 21 | 94 | 北 | (2秒) |
| 1996 | 1 | 2 | 19 | 55 | 142 | 11.28 | 42 | 26.19 | 4.8 | 93 | 154 | 179 | 北 | (3秒) |
| 1996 | 4 | 15 | 6 | 44 | 142 | 28.68 | 42 | 2.55 | 4.9 | 66 | 131 | 147 | 北 | - |
| 1996 | 12 | 22 | 23 | 53 | 139 | 6.66 | 43 | 6.77 | 6.4 | 254 | 285 | 382 | 北 | (2秒) |
| 1997 | 3 | 17 | 18 | 23 | 142 | 10.82 | 41 | 51.24 | 4.8 | 66 | 99 | 119 | 北 | (3秒) |
| 1999 | 1 | 19 | 2 | 35 | 141 | 28.00 | 41 | 33.29 | 4.4 | 85 | 41 | 94 | 北 | - |
| 2000 | 2 | 24 | 3 | 41 | 141 | 25.14 | 41 | 23.01 | 3.0 | 86 | 22 | 89 | 北 | (1秒) |

つづく

つづき

| 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) | 震央 方位 | 備考※ |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | |
| 2000 | 4 | 1 | 3 | 12 | 140 | 49.68 | 42 | 30.25 | 4.9 | 7 | 153 | 154 | 北 | - |
| 2000 | 6 | 16 | 16 | 35 | 141 | 6.11 | 41 | 27.82 | 4.3 | 132 | 39 | 138 | 北 | (3秒) |
| 2000 | 8 | 27 | 0 | 30 | 142 | 33.02 | 42 | 12.07 | 4.8 | 30 | 148 | 151 | 北 | - |
| 2000 | 9 | 3 | 21 | 35 | 142 | 24.02 | 42 | 3.09 | 4.0 | 60 | 128 | 141 | 北 | (2秒) |
| 2001 | 8 | 16 | 5 | 32 | 142 | 27.56 | 42 | 12.62 | 4.4 | 63 | 144 | 158 | 北 | (2秒) |
| 2002 | 8 | 29 | 18 | 4 | 142 | 19.31 | 41 | 55.70 | 4.7 | 67 | 113 | 131 | 北 | - |
| 2002 | 10 | 19 | 5 | 26 | 142 | 13.64 | 42 | 7.49 | 4.4 | 80 | 125 | 149 | 北 | (2秒) |
| 2002 | 10 | 31 | 12 | 15 | 142 | 43.88 | 42 | 52.86 | 4.2 | 114 | 218 | 246 | 北 | (2秒) |
| 2003 | 1 | 13 | 13 | 38 | 141 | 49.41 | 41 | 33.27 | 4.2 | 71 | 54 | 89 | 北 | (2秒) |
| 2003 | 2 | 23 | 22 | 38 | 141 | 5.06 | 42 | 12.66 | 4.3 | 122 | 116 | 168 | 北 | (3秒) |
| 2003 | 3 | 16 | 14 | 35 | 143 | 0.34 | 42 | 29.88 | 4.7 | 100 | 198 | 222 | 北 | - |
| 2003 | 10 | 29 | 16 | 31 | 141 | 28.04 | 41 | 18.28 | 3.2 | 85 | 14 | 87 | 北 | (1秒) |
| 2003 | 11 | 14 | 7 | 39 | 142 | 11.87 | 41 | 50.20 | 4.8 | 70 | 99 | 121 | 北 | (4秒) |
| 2004 | 7 | 4 | 21 | 31 | 142 | 29.08 | 42 | 2.99 | 4.9 | 62 | 132 | 146 | 北 | - |
| 2004 | 7 | 20 | 5 | 58 | 143 | 5.83 | 42 | 31.81 | 5.0 | 98 | 206 | 228 | 北 | - |
| 2004 | 8 | 24 | 18 | 44 | 141 | 18.82 | 41 | 15.86 | 3.0 | 7 | 11 | 13 | 北 | (1秒) |
| 2004 | 9 | 22 | 20 | 3 | 141 | 33.78 | 41 | 22.64 | 4.8 | 109 | 26 | 112 | 北 | - |
| 2004 | 10 | 20 | 11 | 16 | 141 | 19.49 | 41 | 32.17 | 3.9 | 8 | 39 | 40 | 北 | (2秒) |
| 2007 | 3 | 15 | 14 | 43 | 141 | 23.31 | 41 | 56.51 | 4.5 | 123 | 84 | 148 | 北 | (2秒) |
| 2007 | 8 | 22 | 16 | 26 | 140 | 48.07 | 41 | 58.43 | 5.4 | 122 | 100 | 158 | 北 | - |
| 2010 | 6 | 28 | 6 | 3 | 141 | 49.99 | 41 | 37.56 | 5.1 | 57 | 61 | 84 | 北 | - |
| 2013 | 2 | 2 | 23 | 17 | 143 | 13.65 | 42 | 42.12 | 6.5 | 102 | 227 | 249 | 北 | - |
| 2017 | 12 | 2 | 5 | 48 | 142 | 30.33 | 42 | 2.22 | 4.9 | 67 | 132 | 148 | 北 | - |
| 2018 | 9 | 6 | 6 | 11 | 142 | 0.90 | 42 | 40.20 | 5.4 | 38 | 173 | 177 | 北 | - |

本リストで追加した地震は増幅特性の検討のみに用いる。

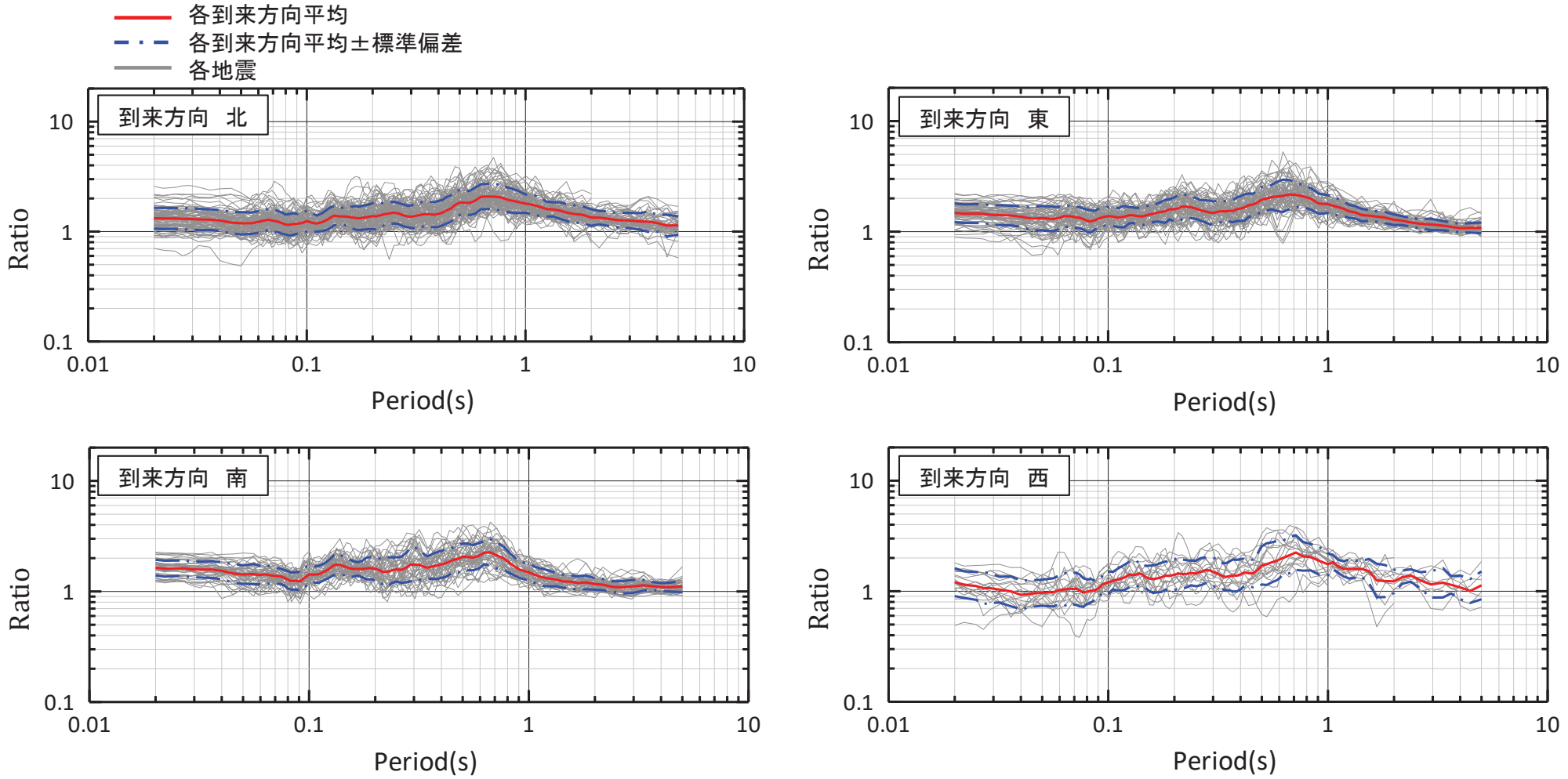
※ 表中備考の () は5秒未満の信頼限界周期を示す。また、表中備考の「-」は周期5秒までの信頼性を確認した記録に付した。

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

(3) 自由地盤の鉛直アレイの応答スペクトル比(T.P.+2.0m/T.P.-282.8m) 水平成分

【水平成分の応答スペクトル比(自由地盤 T.P.+2.0m/T.P.-282.8m)】

- 地盤の増幅特性は4方向とも特に著しく大きい周期帯はない。また、到来方向別の各地震の応答スペクトル比のばらつきは、小さい地震が多い西側のばらつきは多少大きいものの、その他の方向は大きいものではない。
- なお、周期0.7秒付近のピークは、観測記録から求めた地盤の一次固有周期に対応している(対応する伝達関数をp.102に記載)。



地震波到来方向別の応答スペクトル比 自由地盤 水平成分(PN基準)

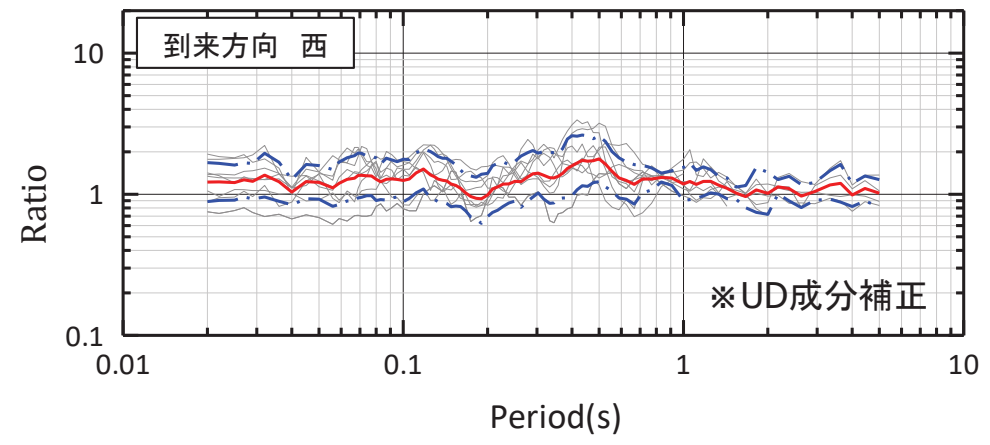
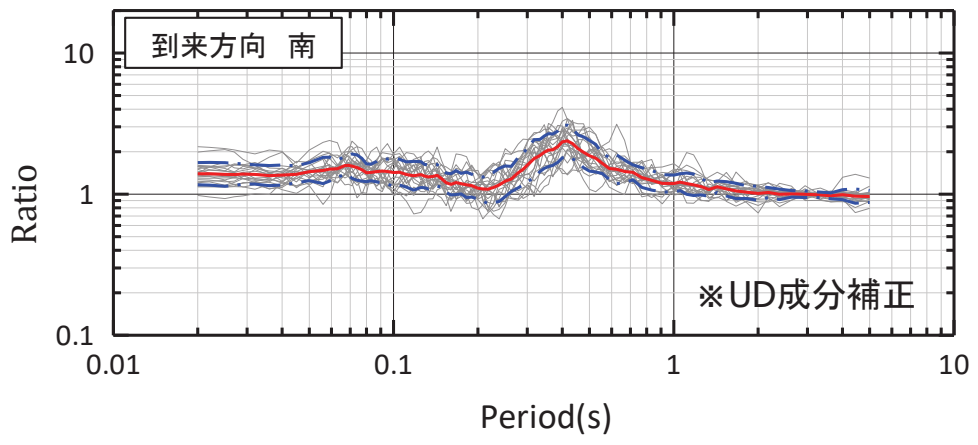
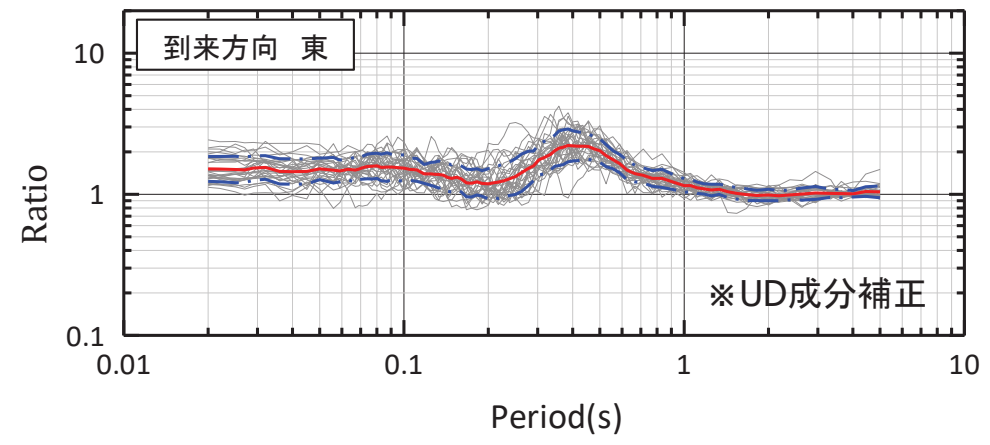
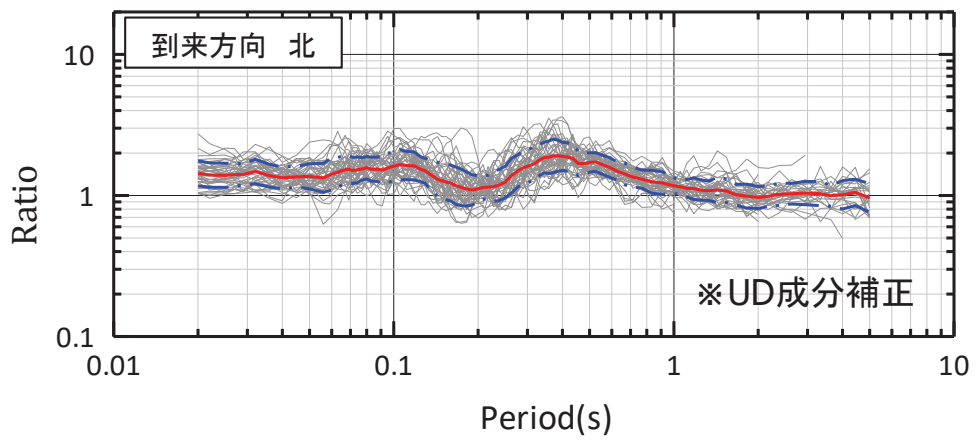
3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

(3) 自由地盤の鉛直アレイの応答スペクトル比(T.P.+2.0m/T.P.-282.8m) 鉛直成分

【鉛直成分の応答スペクトル比(自由地盤 T.P.+2.0m/T.P.-282.8m)】

- 地盤の増幅特性は4方向とも特に著しく大きい周期帯はない。また、到来方向別の各地震の応答スペクトル比のばらつきは、小さい地震が多い西側のばらつきは多少大きいものの、その他の方向は大きいものではない。
- なお、周期0.4秒付近のピークは、観測記録から求めた地盤の一次固有周期に対応している(対応する伝達関数をp.102に記載)。

— 各到来方向平均
 - - 各到来方向平均±標準偏差
 — 各地震

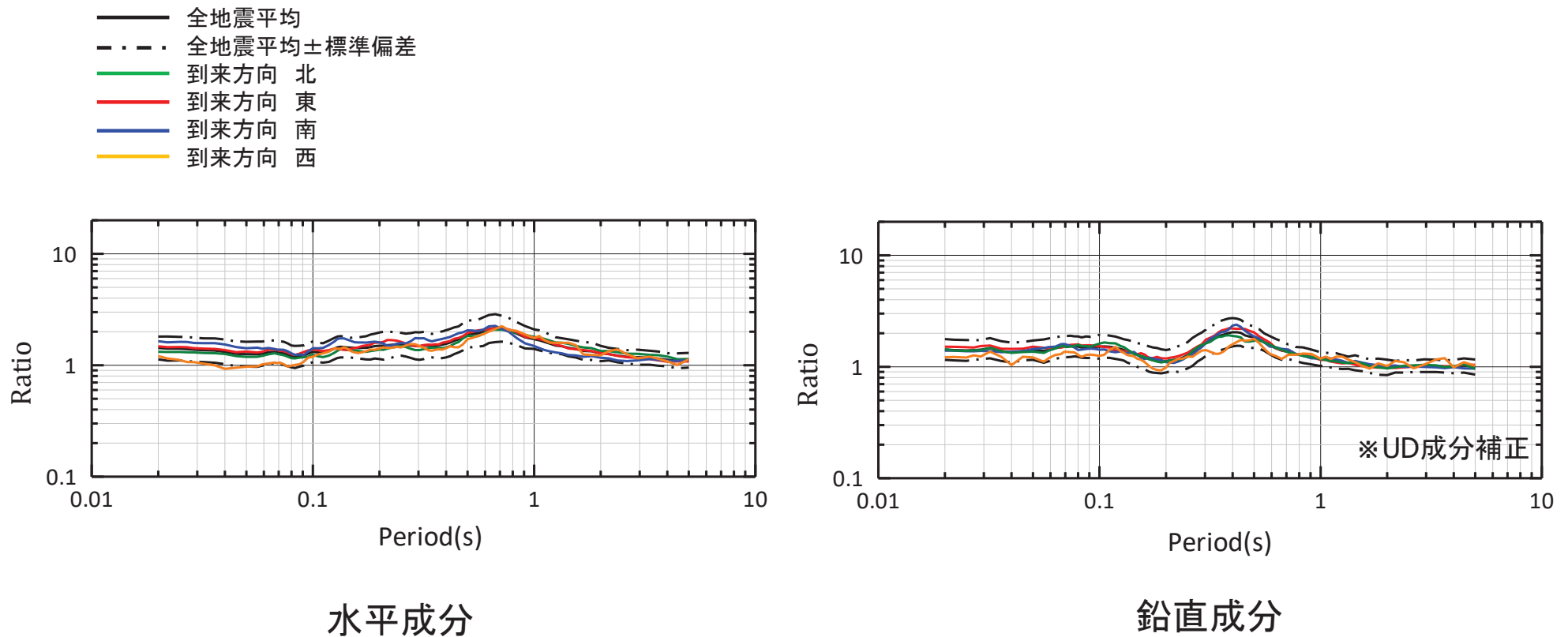


地震波到来方向別の応答スペクトル比 自由地盤 鉛直成分

(4) 自由地盤の鉛直アレイの応答スペクトル比 (T.P.+2.0m/T.P.-282.8m) 平均の比較

【地震波到来方向別の平均増幅特性の比較】

➤ 地震波到来方向別の平均増幅特性の違いは小さい。



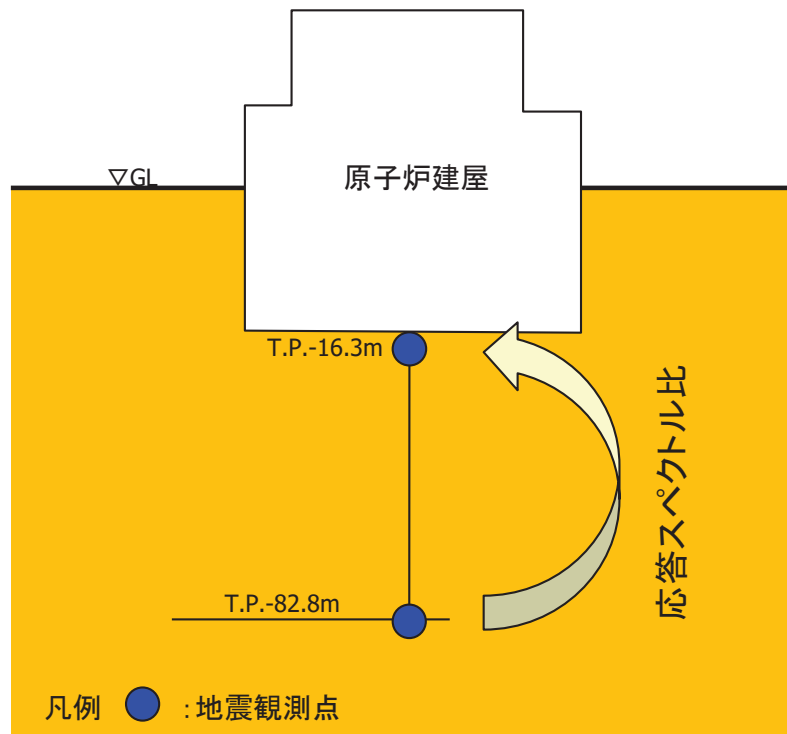
地震波到来方向別の平均応答スペクトル比の比較 自由地盤

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討 (5) 原子炉建屋直下地盤の増幅特性に関する検討

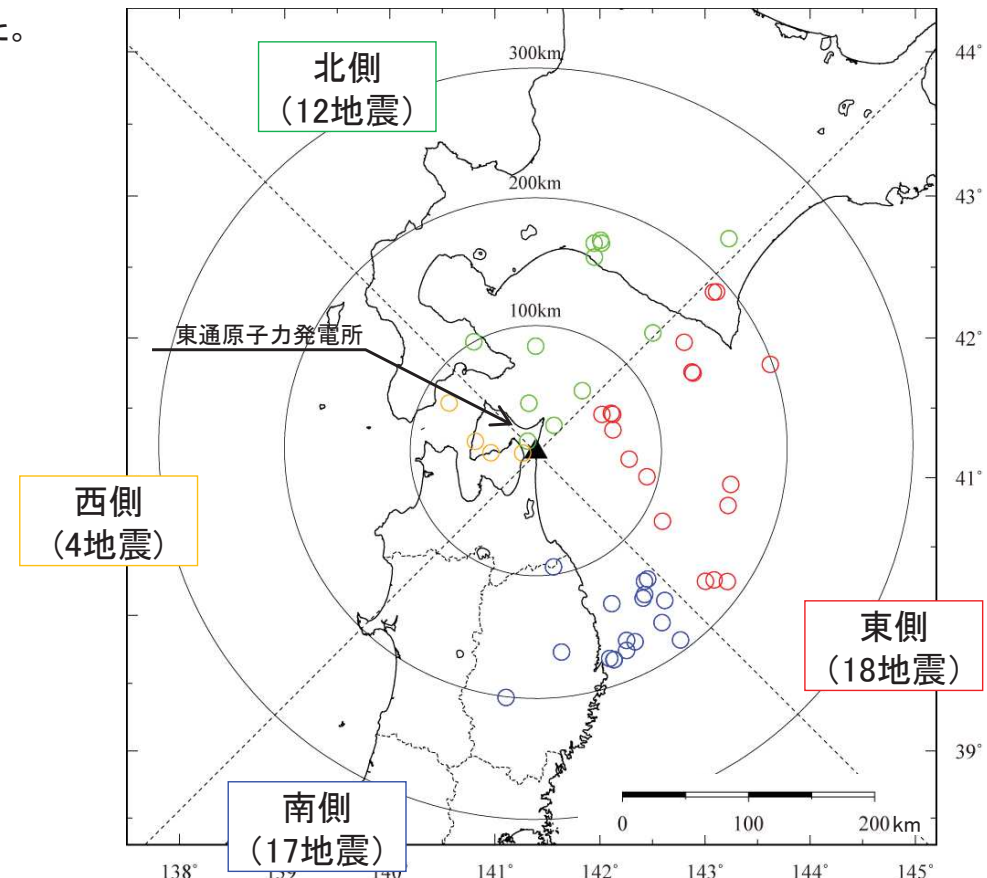
【目的】原子炉建屋直下地盤の鉛直アレイ観測記録においても、自由地盤の増幅特性と同様の傾向にあることを確認する。

- 振動特性の検討は、原子炉建屋直下深部の地震観測点 (T.P.-82.8m) に対する原子炉建屋基礎版下の地震観測点 (T.P.-16.3m) の応答スペクトル比を用いた。
- 鉛直アレイの増幅特性の検討に用いた観測地震の震央分布及び地震観測点を以下に示す。
- 検討に用いた観測記録は、自由地盤鉛直アレイの検討に用いた104地震(※)のうち、原子炉建屋直下の観測開始(2004年8月)～2018年の期間で得られた51地震とした。なお、西側については、検討対象地震が4地震と少ないことから参考扱いとする。

※ 全 方 位:地震規模M5.5以上,震源距離200km程度以内とした。
西側・北側:上記のほか,震央距離300km以内とした。



検討に用いた地震観測点



対象地震の分布(震央位置)

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討 (6) 原子炉建屋直下の検討に用いた地震観測記録

検討に用いた地震観測記録(M \geq 5.5, X \leq 200km程度)

| 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) | 震央 方位 | 備考 |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|-------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | |
| 2004 | 8 | 10 | 15 | 13 | 142 | 7.93 | 39 | 40.44 | 5.8 | 48 | 180 | 186 | 南 | プレート間 |
| 2004 | 11 | 27 | 7 | 42 | 143 | 4.81 | 42 | 19.55 | 5.6 | 51 | 189 | 196 | 東 | プレート間 |
| 2005 | 2 | 26 | 21 | 37 | 142 | 35.77 | 40 | 41.12 | 5.7 | 45 | 116 | 124 | 東 | プレート内 |
| 2007 | 4 | 19 | 0 | 7 | 141 | 56.8 | 42 | 40.24 | 5.6 | 126 | 171 | 213 | 北 | プレート内 |
| 2008 | 4 | 29 | 14 | 26 | 142 | 6.5 | 41 | 27.78 | 5.7 | 62 | 67 | 91 | 東 | プレート間 |
| 2008 | 7 | 24 | 0 | 26 | 141 | 38.12 | 39 | 43.92 | 6.8 | 108 | 163 | 196 | 南 | プレート内 |
| 2008 | 9 | 22 | 16 | 31 | 140 | 33.93 | 41 | 32.28 | 5.6 | 152 | 79 | 171 | 西 | プレート内 |
| 2009 | 2 | 15 | 18 | 24 | 142 | 25.41 | 40 | 15.01 | 5.9 | 36 | 136 | 141 | 南 | プレート間 |
| 2009 | 6 | 5 | 12 | 30 | 143 | 37.22 | 41 | 48.74 | 6.4 | 31 | 199 | 201 | 東 | プレート間 |
| 2010 | 9 | 13 | 14 | 47 | 142 | 7.31 | 41 | 27.36 | 5.8 | 63 | 68 | 93 | 東 | プレート間 |
| 2010 | 12 | 6 | 16 | 30 | 143 | 13.1 | 40 | 47.95 | 5.8 | 7 | 160 | 160 | 東 | プレート間 |
| 2011 | 3 | 11 | 15 | 8 | 142 | 46.01 | 39 | 49.24 | 7.4 | 32 | 192 | 194 | 南 | プレート間 |
| 2011 | 3 | 11 | 15 | 49 | 142 | 37.08 | 40 | 6.57 | 5.9 | 7 | 159 | 159 | 南 | プレート間 |
| 2011 | 3 | 17 | 13 | 13 | 142 | 24.69 | 40 | 7.58 | 5.9 | 31 | 146 | 149 | 南 | プレート間 |
| 2011 | 6 | 23 | 6 | 50 | 142 | 35.45 | 39 | 56.87 | 6.9 | 36 | 171 | 175 | 南 | プレート間 |
| 2011 | 8 | 1 | 22 | 44 | 142 | 15.21 | 39 | 48.96 | 5.8 | 43 | 169 | 174 | 南 | プレート間 |
| 2011 | 9 | 17 | 4 | 26 | 143 | 5.17 | 40 | 15.55 | 6.6 | 7 | 177 | 177 | 東 | プレート間 |
| 2011 | 9 | 17 | 6 | 8 | 143 | 12.77 | 40 | 14.84 | 6.1 | 4 | 186 | 186 | 東 | プレート間 |
| 2011 | 9 | 17 | 16 | 33 | 143 | 0.18 | 40 | 14.98 | 5.5 | 14 | 172 | 172 | 東 | プレート間 |
| 2011 | 11 | 24 | 19 | 25 | 142 | 53.24 | 41 | 45.02 | 6.2 | 43 | 140 | 146 | 東 | プレート間 |
| 2012 | 1 | 28 | 9 | 22 | 142 | 25.61 | 40 | 9.19 | 5.7 | 36 | 145 | 149 | 南 | プレート間 |
| 2012 | 3 | 27 | 20 | 0 | 142 | 20.03 | 39 | 48.38 | 6.6 | 21 | 173 | 174 | 南 | 内陸 |
| 2012 | 4 | 30 | 0 | 2 | 142 | 15.3 | 39 | 44.53 | 5.6 | 23 | 177 | 178 | 南 | 内陸 |
| 2012 | 5 | 24 | 0 | 2 | 142 | 7.42 | 41 | 20.62 | 6.1 | 60 | 64 | 87 | 東 | プレート間 |
| 2012 | 8 | 25 | 23 | 16 | 143 | 6.64 | 42 | 19.67 | 6.1 | 49 | 191 | 197 | 東 | プレート間 |
| 2014 | 6 | 15 | 2 | 31 | 141 | 6.46 | 39 | 23.77 | 5.5 | 94 | 200 | 221 | 南 | プレート内 |
| 2014 | 7 | 5 | 7 | 42 | 142 | 8.16 | 39 | 40.55 | 5.9 | 49 | 179 | 186 | 南 | プレート間 |
| 2014 | 8 | 10 | 12 | 43 | 142 | 16.74 | 41 | 8.04 | 6.1 | 51 | 75 | 90 | 東 | プレート間 |
| 2014 | 10 | 11 | 11 | 35 | 143 | 14.68 | 40 | 57.13 | 6.1 | 36 | 158 | 162 | 東 | プレート間 |

つづく

つづき

| 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) | 震央 方位 | 備考 |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|-------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | |
| 2015 | 2 | 17 | 13 | 46 | 142 | 6.72 | 40 | 5.12 | 5.7 | 50 | 137 | 146 | 南 | プレート間 |
| 2015 | 6 | 8 | 15 | 1 | 142 | 1.19 | 41 | 27.35 | 5.6 | 66 | 61 | 90 | 東 | プレート間 |
| 2015 | 7 | 10 | 3 | 32 | 141 | 33.59 | 40 | 21.24 | 5.7 | 88 | 94 | 129 | 南 | プレート内 |
| 2016 | 1 | 14 | 12 | 25 | 142 | 48.07 | 41 | 58.21 | 6.7 | 52 | 146 | 155 | 東 | プレート間 |
| 2017 | 9 | 10 | 17 | 44 | 142 | 52.6 | 41 | 45.5 | 5.6 | 43 | 139 | 146 | 東 | プレート間 |
| 2017 | 9 | 27 | 5 | 22 | 142 | 27.3 | 40 | 16 | 6.1 | 35 | 136 | 141 | 南 | プレート間 |
| 2017 | 12 | 16 | 2 | 58 | 142 | 5.6 | 39 | 41.1 | 5.5 | 52 | 177 | 185 | 南 | プレート内 |
| 2018 | 1 | 24 | 19 | 51 | 142 | 26.8 | 41 | 0.5 | 6.3 | 34 | 91 | 97 | 東 | プレート間 |
| 2018 | 9 | 6 | 3 | 7 | 142 | 0.4 | 42 | 41.4 | 6.7 | 37 | 174 | 178 | 北 | 内陸 |
| 2018 | 9 | 6 | 3 | 20 | 141 | 56.9 | 42 | 34.3 | 5.5 | 36 | 160 | 164 | 北 | 内陸 |

信頼限界周期が5秒以上であることを確認済み。

西側及び北側で追加した観測記録($\Delta \leq 300$ km)

| 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) | 震央 方位 | 備考* |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|------------------|------------------|------------------|----------|--------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | | | |
| 2004 | 8 | 24 | 18 | 44 | 141 | 18.82 | 41 | 15.86 | 3.0 | 7 | 11 | 13 | 北 | (1秒) |
| 2004 | 9 | 4 | 11 | 18 | 140 | 48.98 | 41 | 15.69 | 3.8 | 14 | 49 | 51 | 西 | (2秒) |
| 2004 | 9 | 22 | 20 | 3 | 141 | 33.78 | 41 | 22.64 | 4.8 | 109 | 26 | 112 | 北 | - |
| 2004 | 10 | 20 | 11 | 16 | 141 | 19.49 | 41 | 32.17 | 3.9 | 8 | 39 | 40 | 北 | (2秒) |
| 2007 | 3 | 15 | 14 | 43 | 141 | 23.31 | 41 | 56.51 | 4.5 | 123 | 84 | 148 | 北 | (2秒) |
| 2007 | 8 | 22 | 16 | 26 | 140 | 48.07 | 41 | 58.43 | 5.4 | 122 | 100 | 158 | 北 | - |
| 2010 | 6 | 28 | 6 | 3 | 141 | 49.99 | 41 | 37.56 | 5.1 | 57 | 61 | 84 | 北 | - |
| 2013 | 2 | 2 | 23 | 17 | 143 | 13.65 | 42 | 42.12 | 6.5 | 102 | 227 | 249 | 北 | - |
| 2017 | 12 | 2 | 5 | 48 | 142 | 30.3 | 42 | 2.2 | 4.9 | 67 | 132 | 148 | 北 | - |
| 2018 | 3 | 9 | 18 | 15 | 141 | 15.90 | 41 | 10.70 | 4.4 | 93 | 11 | 94 | 西 | - |
| 2018 | 4 | 29 | 21 | 31 | 140 | 57.80 | 41 | 10.80 | 3.3 | 7 | 36 | 36 | 西 | (1.5秒) |
| 2018 | 9 | 6 | 6 | 11 | 142 | 0.90 | 42 | 40.20 | 5.4 | 38 | 173 | 177 | 北 | - |

* ()は5秒未満の信頼限界周期を示す。その他の観測記録は5秒以上を確認済み。

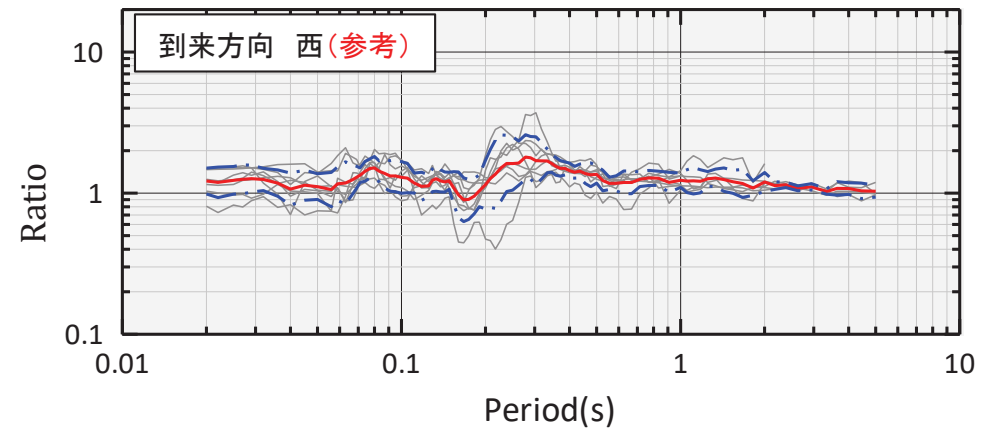
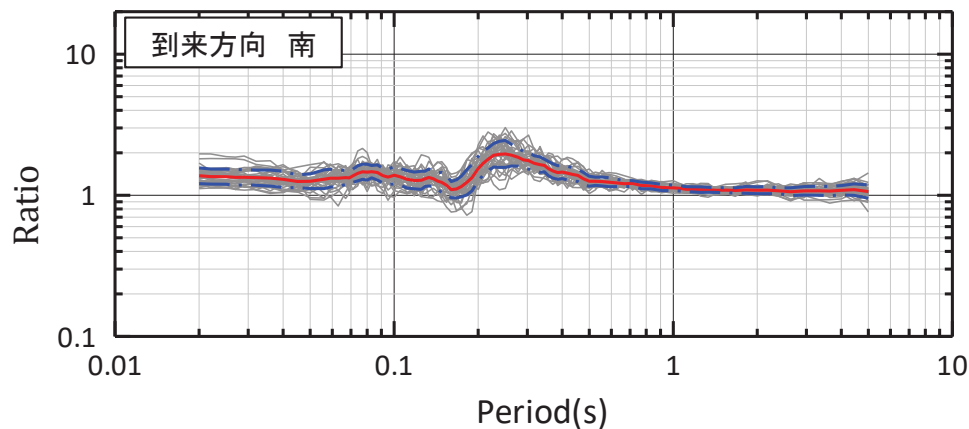
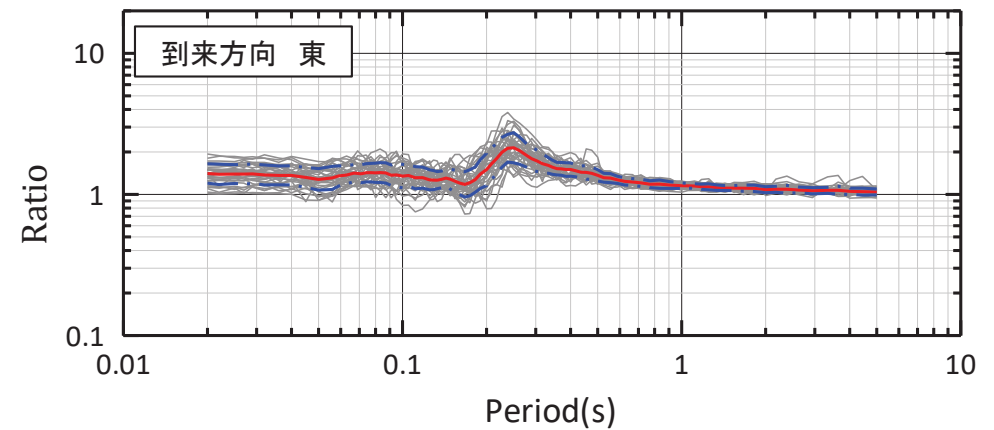
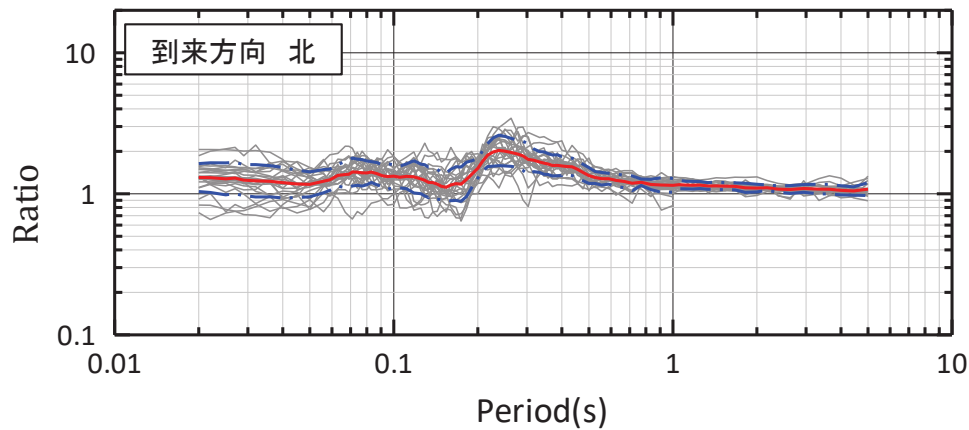
3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

(7) 原子炉建屋直下の鉛直アレイの応答スペクトル比 (T.P.-16.3m/T.P.-82.8m) 水平成分

【水平成分の応答スペクトル比 (原子炉建屋直下 T.P.-16.3m/T.P.-82.8m)】

- 地盤の増幅特性は4方向とも特に著しく大きい周期帯はない。また、地震波到来方向別の各地震の応答スペクトル比のばらつきは、規模が小さい地震が多い北側及び西側は多少大きいものの、東側及び南側では大きいものではない。
- なお、卓越周期については建屋直下の地盤は建屋の相互作用の影響を受けているため、純粋な地盤の卓越周期とは異なるものと考えられる。

— 各到来方向平均
- - 各到来方向平均±標準偏差
— 各地震



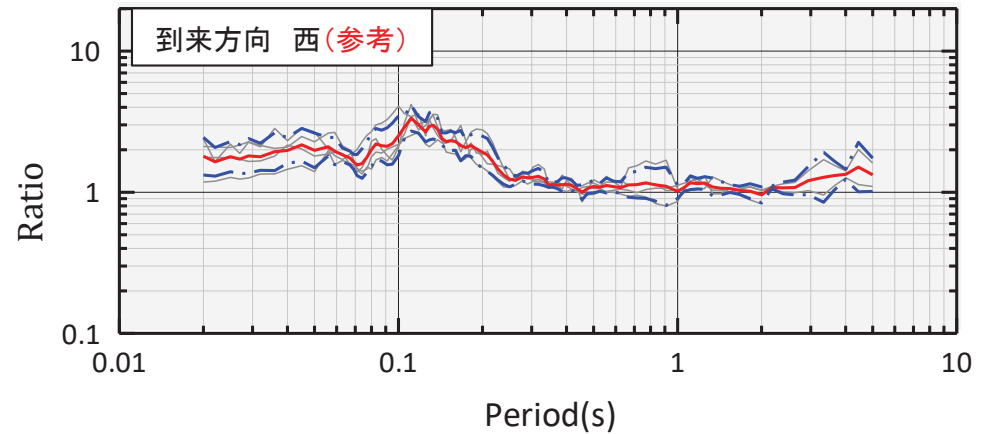
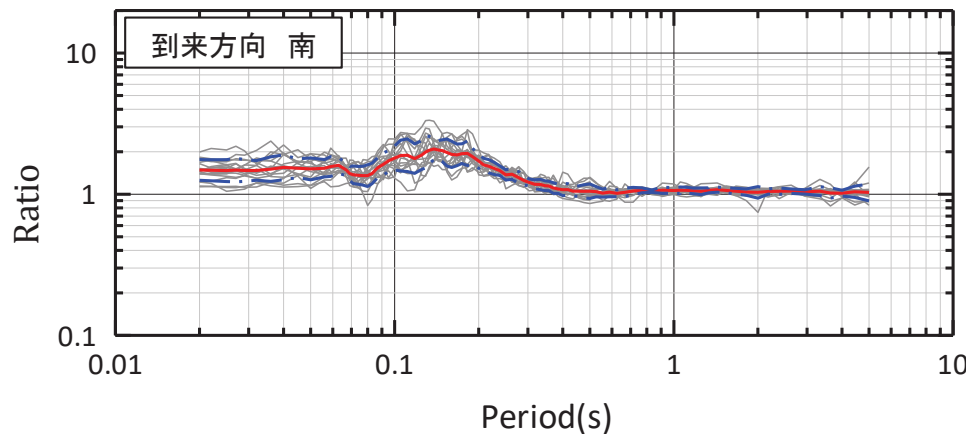
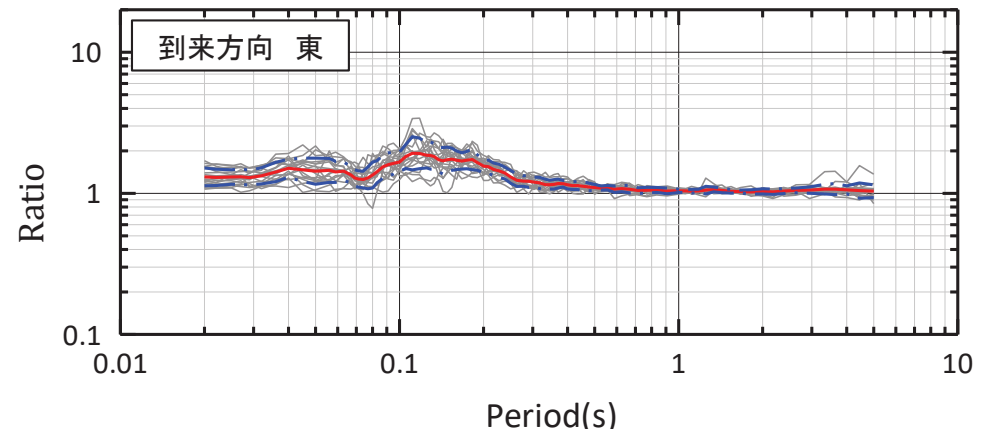
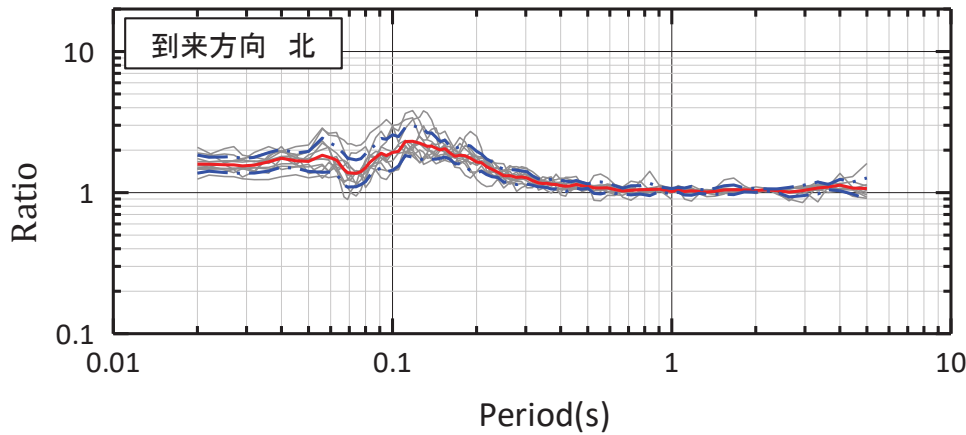
地震波到来方向別の応答スペクトル比 原子炉建屋直下 水平成分 (PN基準)

(7)原子炉建屋直下の鉛直アレイの応答スペクトル比(T.P.-16.3m/T.P.-82.8m) 鉛直成分

【鉛直成分の応答スペクトル比(原子炉建屋直下 T.P.-16.3m/T.P.-82.8m)】

- 地盤の増幅特性は特に著しく大きい周期帯はなく、また、到来方向別にみても各地震の応答スペクトル比のばらつきは大きいものではない。
- なお、卓越周期については建屋直下の地盤は建屋の相互作用の影響を受けているため、純粋な地盤の卓越周期とは異なるものと考えられる。

— 各到来方向平均
- - 各到来方向平均±標準偏差
— 各地震



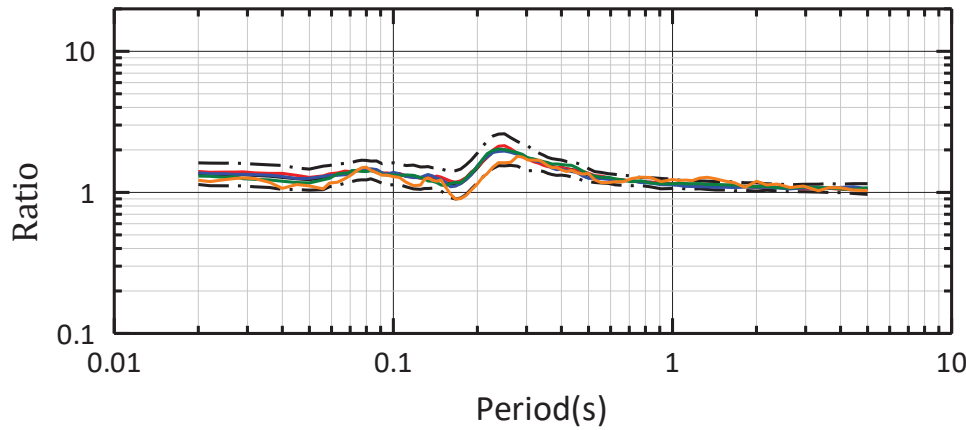
地震波到来方向別の応答スペクトル比 原子炉建屋直下 鉛直成分

(7)原子炉建屋直下の鉛直アレイの応答スペクトル比(T.P.-16.3m/T.P.-82.8m) 平均の比較

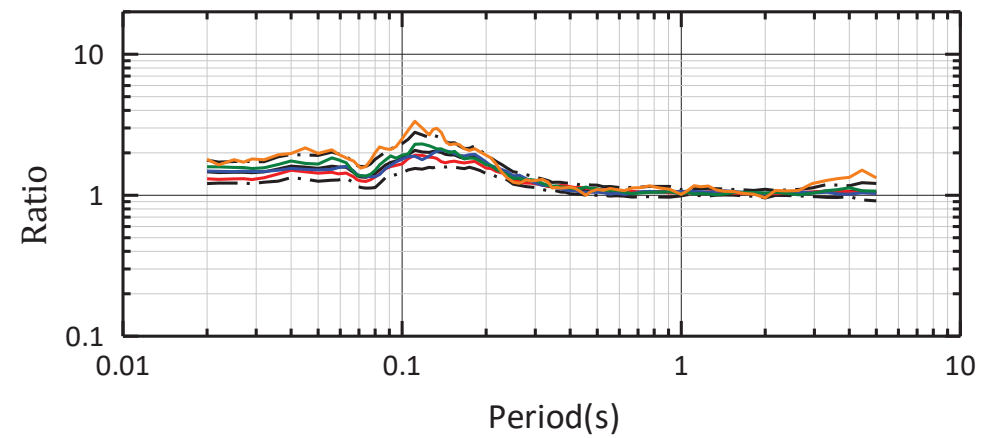
【原子炉建屋直下の応答スペクトル比(原子炉建屋直下 T.P.-16.3m/T.P.-82.8m)】

➤ 地震波到来方向別の平均増幅特性の違いは小さい。

- 全地震平均
- - - 全地震平均±標準偏差
- 到来方向 北
- 到来方向 東
- 到来方向 南
- 到来方向 西 (参考)



水平成分



鉛直成分

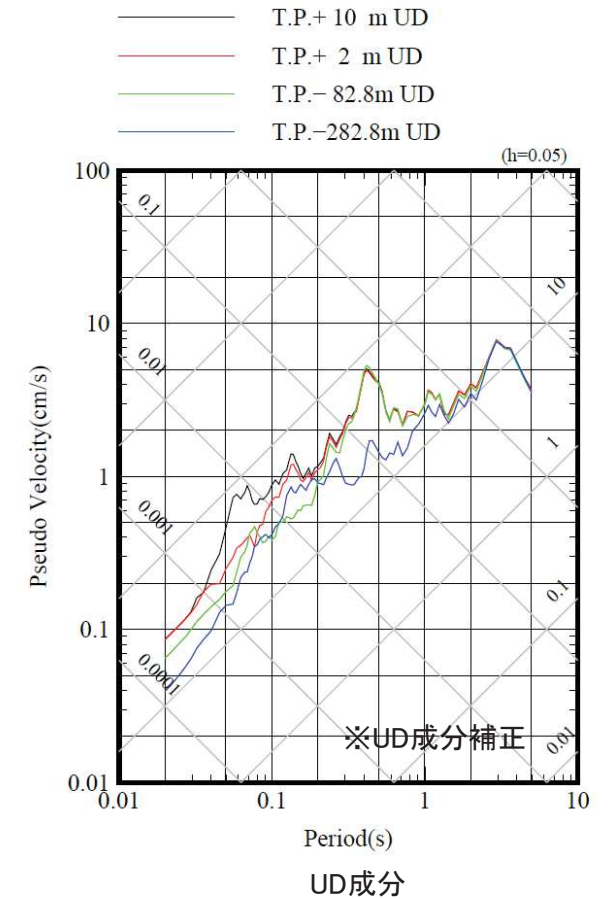
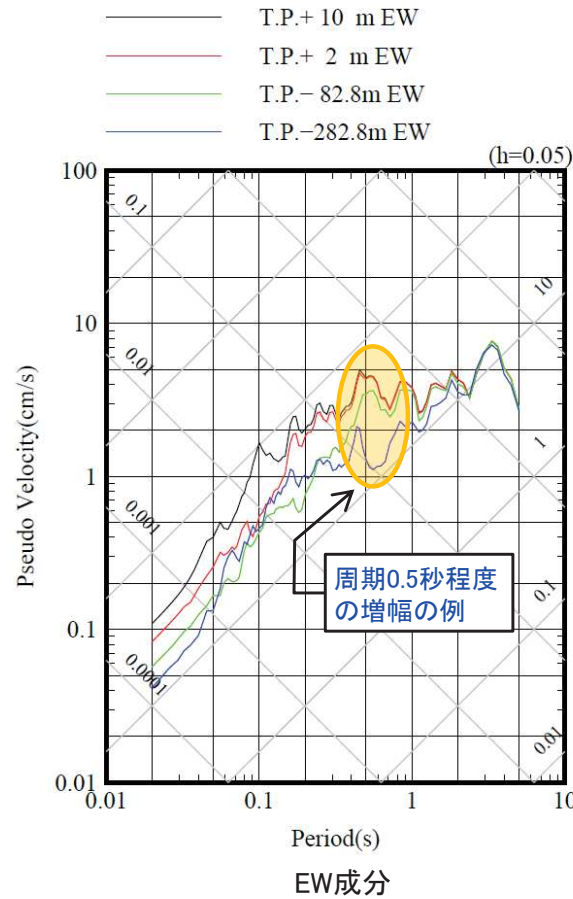
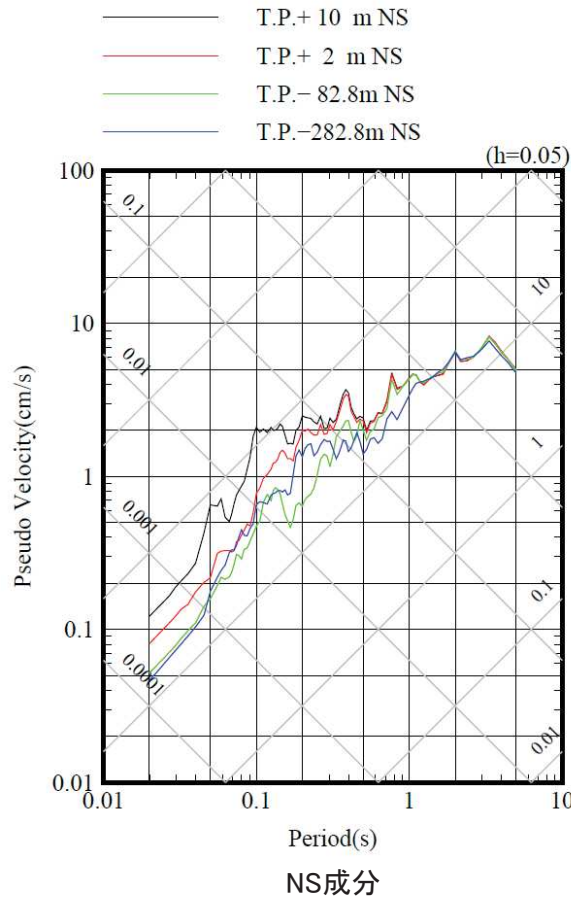
地震波到来方向別の平均応答スペクトル比の比較 原子炉建屋直下

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

(8) 自由地盤T.P.-82.8mの周期0.5秒程度の卓越に関する分析 検討方針

【目的】 自由地盤のT.P.-82.8m観測点の水平動には周期0.5秒程度にピークを持つ記録が幾つか認められるため、その成因について分析を行う。

- T.P.-82.8m観測点の水平動の周期0.5秒付近にピークをもつ地震として、1995年1月7日岩手県沖の地震(M7.2)がある。この地震を例に周期0.5秒の成因について分析する。



自由地盤観測点の増幅の例(1995年1月7日7時37分 岩手県沖の地震 M7.2) (PN基準)

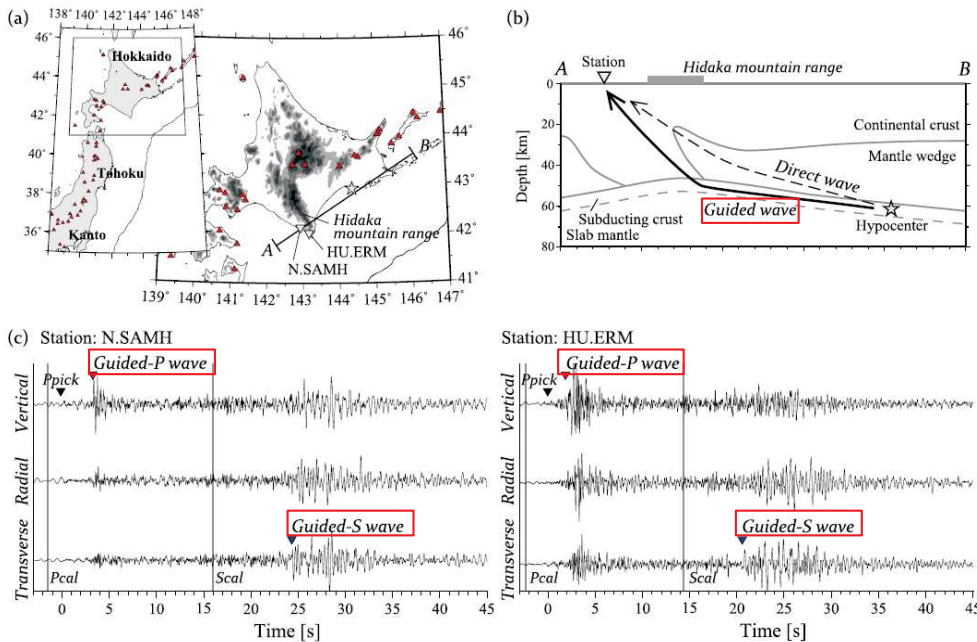
3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討 (参考) 自由地盤T.P.-82.8mの周期0.5秒程度の卓越に関する分析 ガイド波の例

- 周期0.5秒付近のピークの要因候補としては、地盤の増幅の影響の他に、特定の弱層を地震波が伝わることによって生じる波の影響(ガイド波)も考えられる。
- 低速度層を伝搬するガイド波としては、沈み込んだ海洋プレートを伝播する例[Shiina et al.(2017)]や断層破碎帯を伝播する例[Li et al.(1990)等]が報告されている。

沈み込み帯のガイド波の例

【Shiina et al.(2017)に一部加筆】

- 海洋プレート内地震のガイド波の例。
- 沈み込んだ海洋地殻の低速度域を伝搬した地震動は陸側プレートの低速度域に効率的に伝播する。



断層破碎帯のトラップ波の例(1)

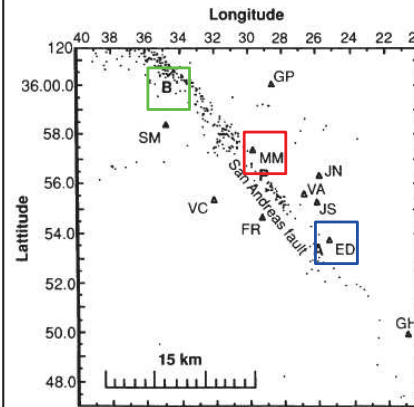
【伊藤(1995)】

- 断層破碎帯は低速度であることから、断層破碎帯中に特有の地震波のモードが存在する。
- トラップ波は震源と観測点の両方が断層内にある場合のみ観測される。

断層破碎帯のトラップ波の例(2)

【Li et al.(1990)に一部加筆】

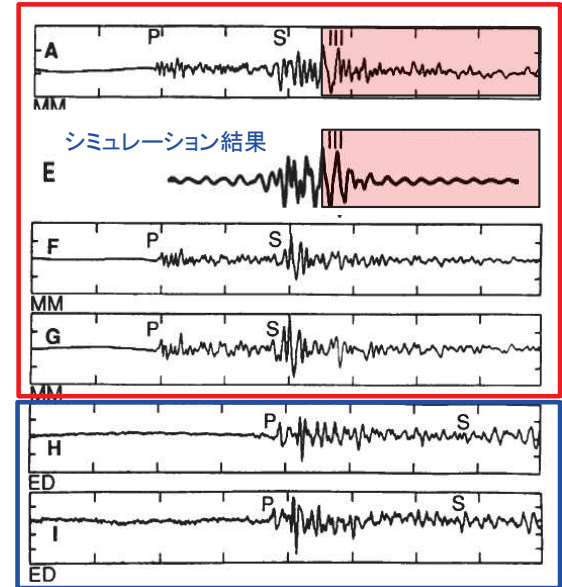
- 断層における地震波のトラップモードは、地震波速度が大きい岩盤で区切られた低速度層を伝搬する地震波のコヒーレントな干渉として現れる。



サンアンドレアス断層と観測点の配置

▲: 観測点
B: 検討した地震Bの震央

- 地震Bでトラップ波を観測したMM観測点は、サンアンドレアス断層の地表トレースから0.3 kmに位置している。
- 一方、同地震でトラップ波を観測しなかったED観測点は1.5 km離れている。



MM観測点における波形の比較。A図: 低速度層で発生した地震Bではトラップ波(網掛)がみられる。E図: 4層モデルによるシミュレーション結果で再現。F, G図: 地震Bと近いものの断層低速度層から離れた位置で発生した2地震ではトラップ波は見られない。

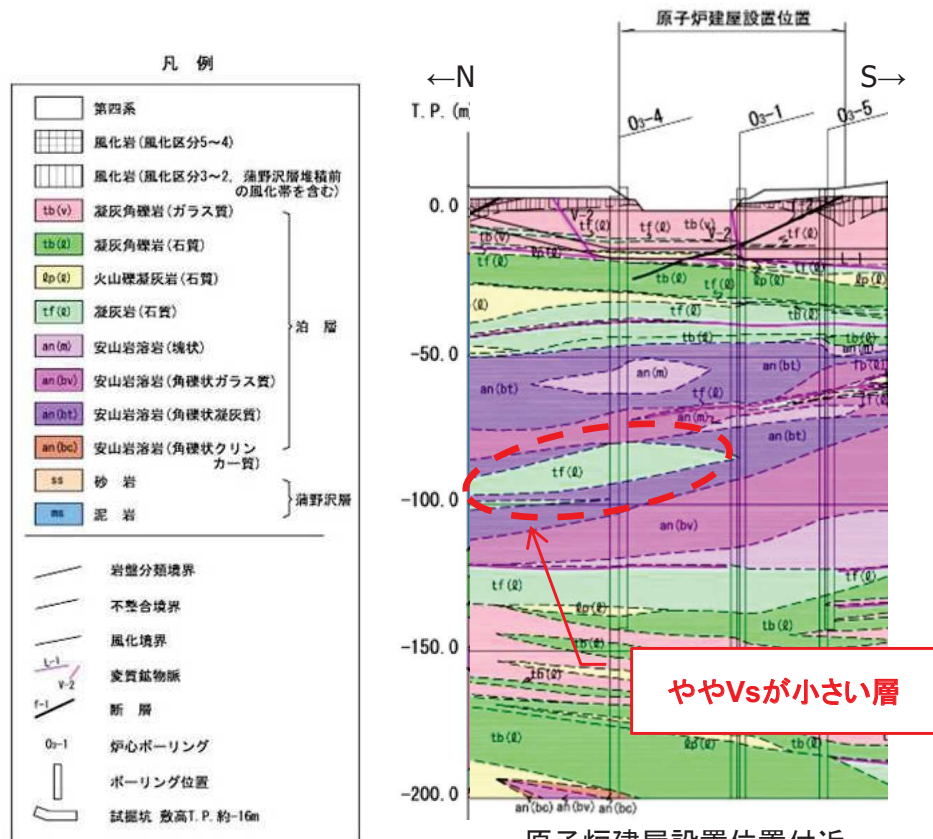
H, I図: 断層から離れたED観測点における地震Bの波形。トラップ波は見られない。

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

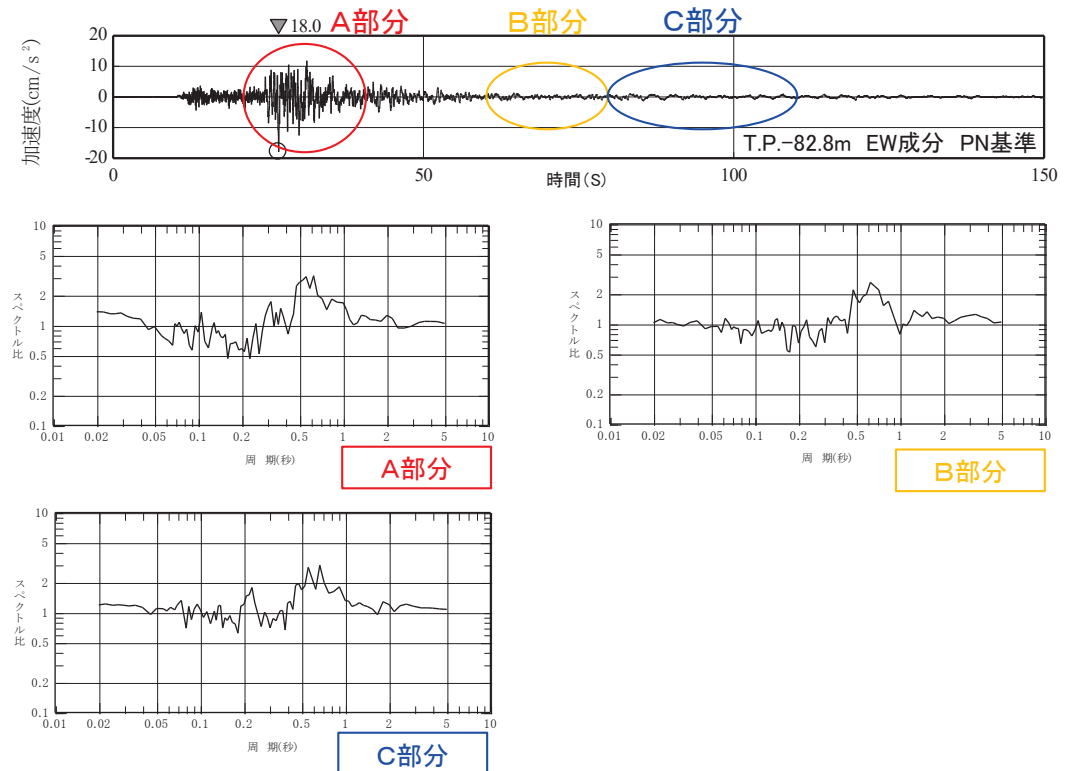
(8) 自由地盤T.P.-82.8mの周期0.5秒程度の卓越に関する分析

鉛直アレイの増幅における弱層の影響

- 敷地地盤には、T.P.-100m付近に周囲に比べてややVsが小さい層が分布している。しかし、当該層のVsは約1.4km/sと周辺層(約1.8km/s)とのインピーダンス比は小さく、また、その長さも数百mオーダーのものであり、また、分布形状もほぼ水平なため、当該レベルでは地震動はほぼ鉛直入射になっていることも踏まえると、周期0.5秒の卓越は弱層によるガイド波的效果によるものではないと考えられる。
- 伝播特性の多少の違いが卓越周期に与える影響を確認するために、1995年1月7日岩手県沖の地震(M7.2)のEW成分の観測記録に対し、主要動部分と後続波部分の応答スペクトル比の比較を行った。各部分のスペクトル比とも周期0.5秒過ぎに卓越周期を持っており、従って、T.P.-82.8mの周期0.5秒の卓越は地盤の増幅特性が起因しているものと判断される。
- なお、当該地震については、T.P.-282.8mのEW成分において周期0.5秒前にピークを持つ地震動であったため、震源特性と増幅特性の相乗効果でT.P.-82.8mの周期0.5秒の卓越が生じていると考えられる。



原子炉建屋設置位置付近における地質鉛直断面図



観測記録各区間の応答スペクトル比 (T.P.-82.8m/T.P.-282.8m, EW成分, h=0.01)

3.3 自由地盤及び原子炉建屋直下観測点の増幅特性に関する検討

(9)まとめ

- 地震観測記録を敷地を中心にした4方位に区分し、地震波到来方向の違いが増幅特性に与える影響について検討を行った。
- その結果、自由地盤の応答スペクトル比(自由地盤 T.P.+2.0m/T.P.-282.8m)、原子炉建屋直下の応答スペクトル比(原子炉建屋直下 T.P.-16.3m/T.P.-82.8m)とも、増幅特性に著しく大きい周期帯はないこと、各地震の増幅特性のばらつきも大きいものではないこと、地震波到来方向の違いによる増幅特性のばらつきも小さいことを確認した。
- なお、1995年1月7日岩手県沖の地震ではT.P.-82.8m 観測点において周期0.5秒が卓越しているが、これは震源特性と地盤の増幅特性の相乗効果によるものと考えられる。

以上の検討結果から、地下構造には振動特性に影響を与えるような著しい不均質性はないと判断される。

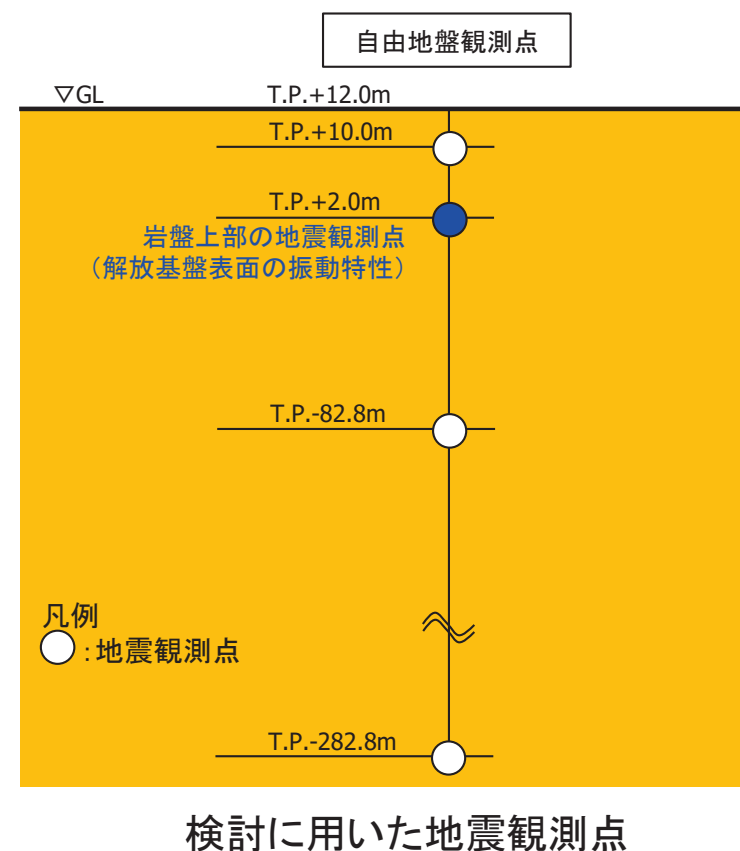
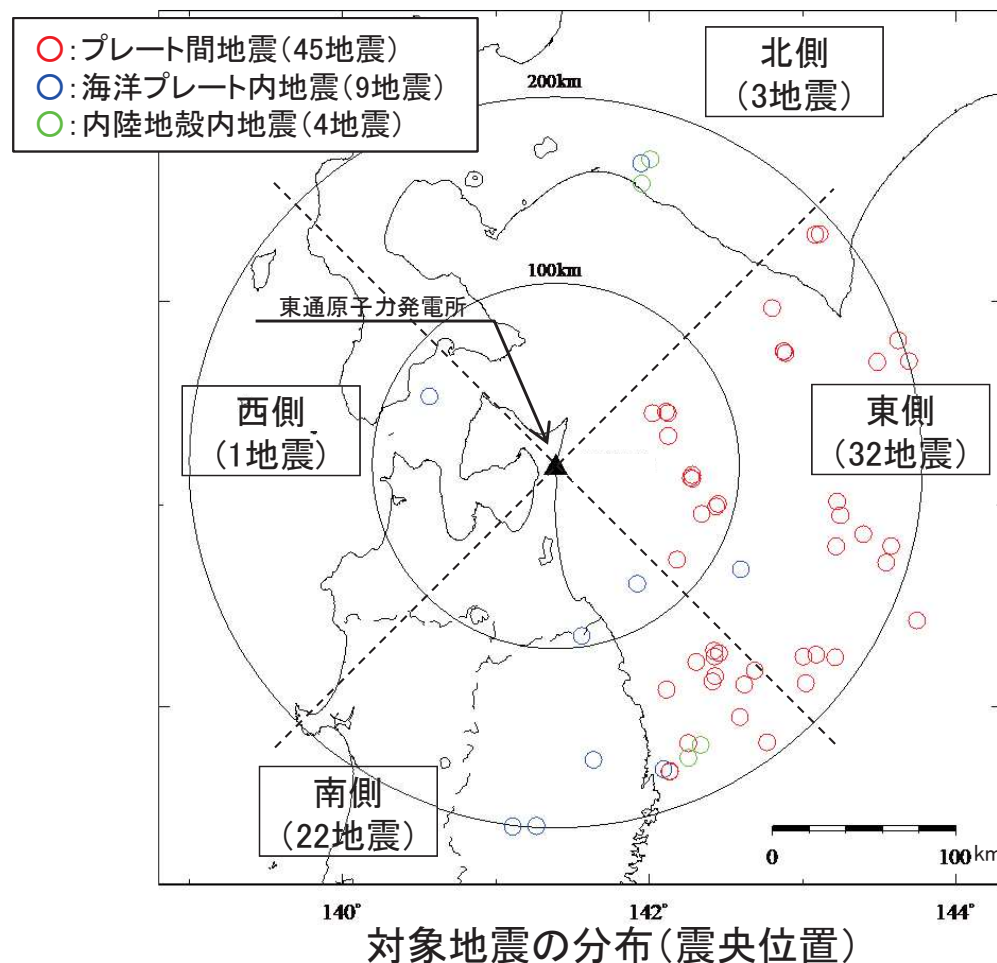
3. 4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較

(1) 検討方針と検討に用いる観測記録

【目的】 Noda et al.(2002)の方法により評価した応答スペクトルと観測記録の応答スペクトルの残差を用いて以下の検討を行う。

- ①地震タイプ別の残差の傾向が、著しく大きい結果になっていないこと
- ②地震波到来方向別に分類した場合の残差の形状が、特に大きな相違はないこと

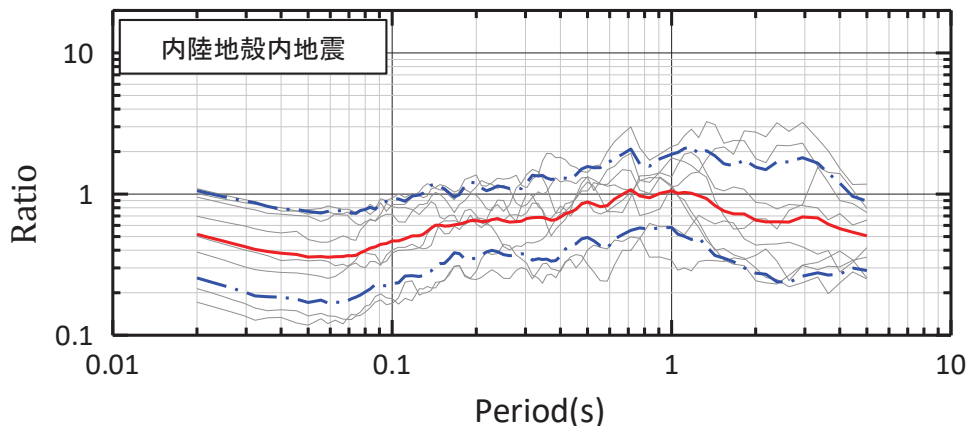
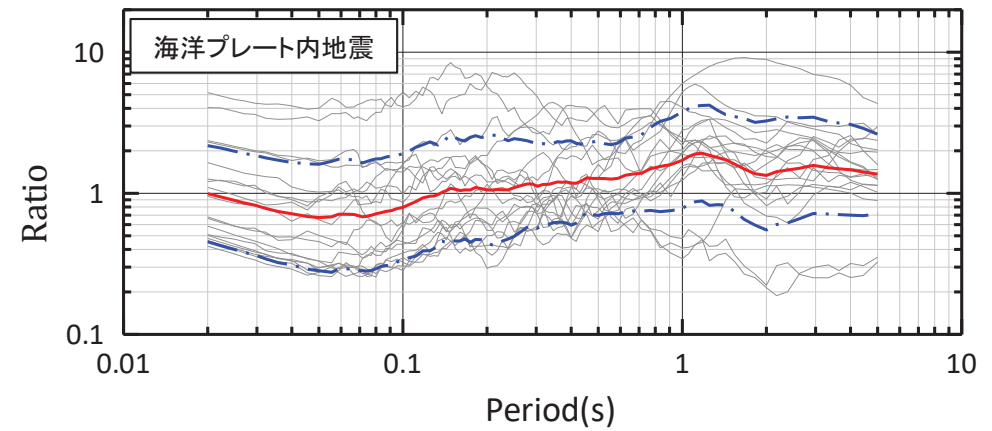
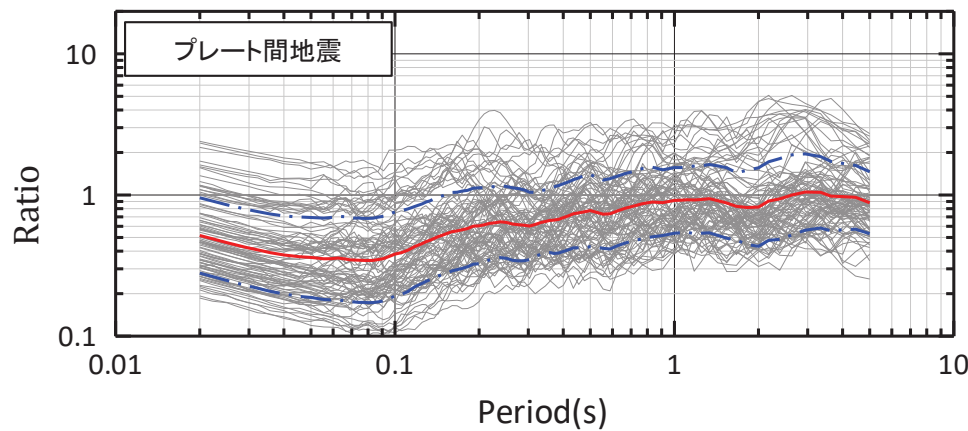
- 検討対象地震は、Noda et al.(2002)の適用範囲を踏まえ、観測開始(1994年)～2018年に得られた地震規模M5.5以上、震源距離200km程度以内の58地震(p.49)とする。なお、西側については、検討対象地震が1地震のみであることから、参考扱いとする。
- 観測記録は岩盤上部の観測点 (T.P.+2.0m)を用いるが、当該観測点の土被り深さは10m程度と浅いため、地中波の応答スペクトルと距離減衰式を比較した。



3.4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較

(2) 観測記録とNoda et al.(2002)との比較 地震タイプ別 水平成分

- ▶ プレート間地震の残差の平均は概ね1を下回る。Noda et al.(2002) は福島県沖の地震を中心に策定された式であり、青森県沖のプレート間地震とは震源の特徴、伝播特性の違いがあったとしても、少なくとも地盤で著しい増幅傾向はないと考えられる。
- ▶ 海洋プレート内地震の残差の平均は概ね2を下回る。プレート間地震と海洋プレート内地震の平均的な短周期レベルの違いは2倍程度であり(片岡ほか(2006)), 東通の傾向はこれと概ね整合している。このことから、少なくとも地盤で著しい増幅傾向はないと考えられる。
- ▶ 内陸地殻内地震は、内陸補正よりも一部の周期帯で大きい傾向にある。これは、今回検討の対象とした地震に平成30年北海道胆振東部地震等の震源深さが深く短周期レベルが大きい傾向にある地震が含まれているためと考えられる。
- ▶ 3つのタイプの地震とも、残差の形状は概ね同様であり、地盤増幅特性に顕著な違いはないと判断される。



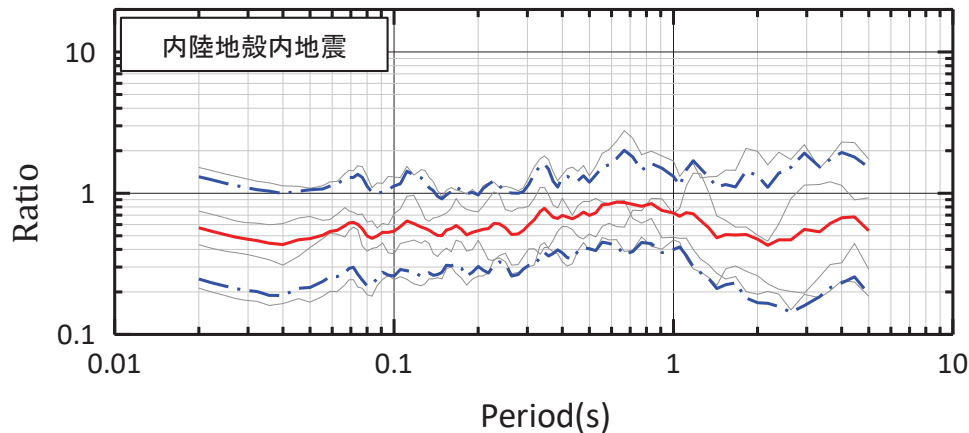
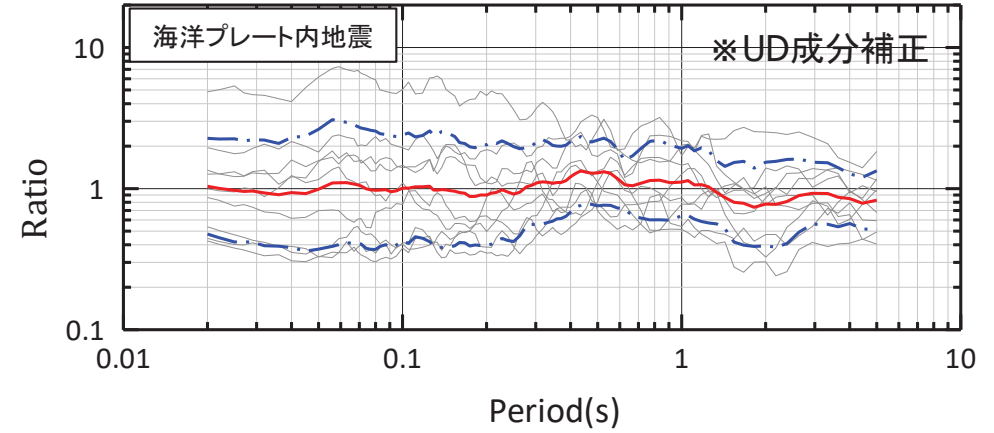
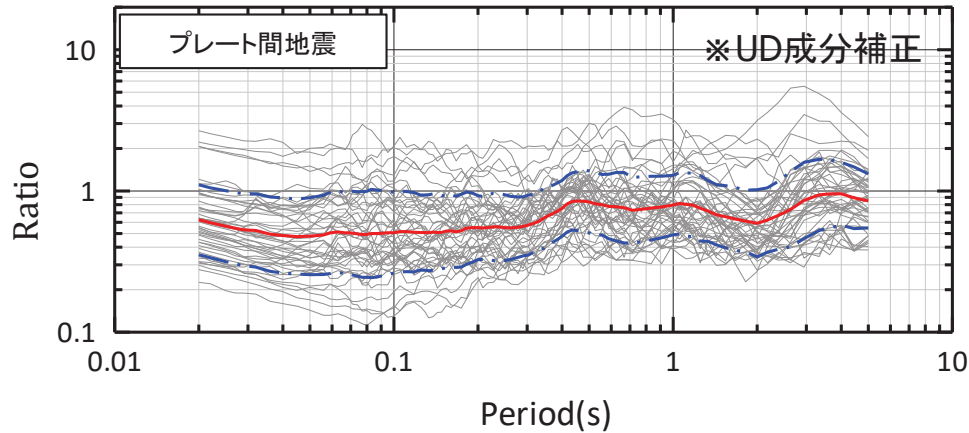
- 各地震の比の平均
- - 各地震の比の平均±標準偏差
- 各地震の比

観測記録とNoda et al.(2002)との比較 地震タイプ別 水平成分
自由地盤の岩盤上部地震観測点 (T.P.+2.0m)/Noda et al.(2002)

3.4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較

(2) 観測記録とNoda et al.(2002)との比較 地震タイプ別 鉛直成分

▶ 鉛直成分も水平成分と同様の傾向にある。



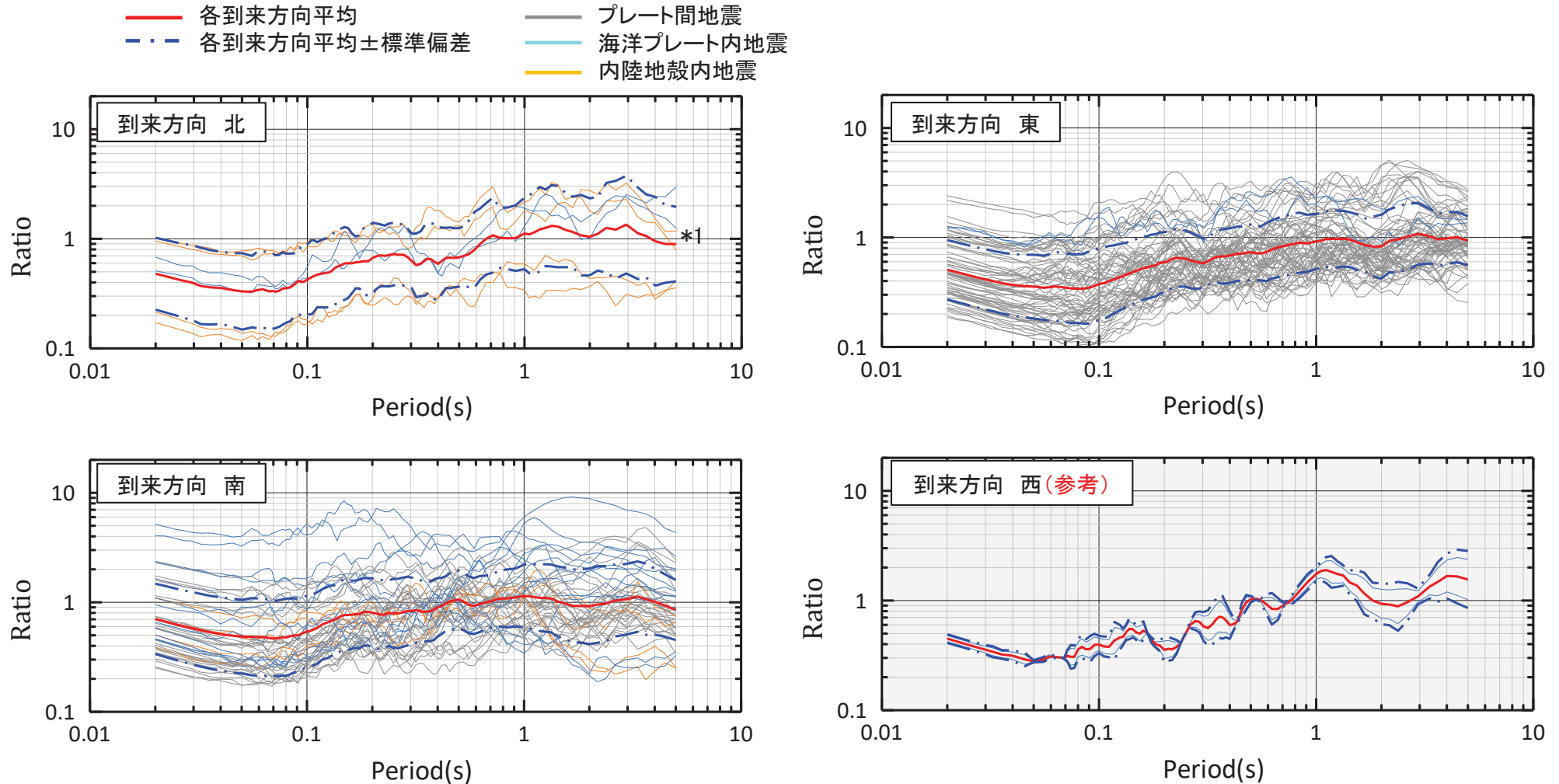
- 各地震の比の平均
- - 各地震の比の平均±標準偏差
- 各地震の比

観測記録とNoda et al.(2002)との比較 地震タイプ別 鉛直成分
自由地盤の岩盤上部地震観測点 (T.P.+2.0m)/Noda et al.(2002)

3.4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較

(3) 観測記録とNoda et al.(2002)との比較 到来方向による違い 水平成分

- 各地震波到来方向における残差は、その大きさについては地震タイプの違いに応じて多少違いはあるが著しいものではない。また、その形状は、地震波到来方向別に大きな違いはない。



観測記録とNoda et al.(2002)との比較 地震波到来方向別 水平成分

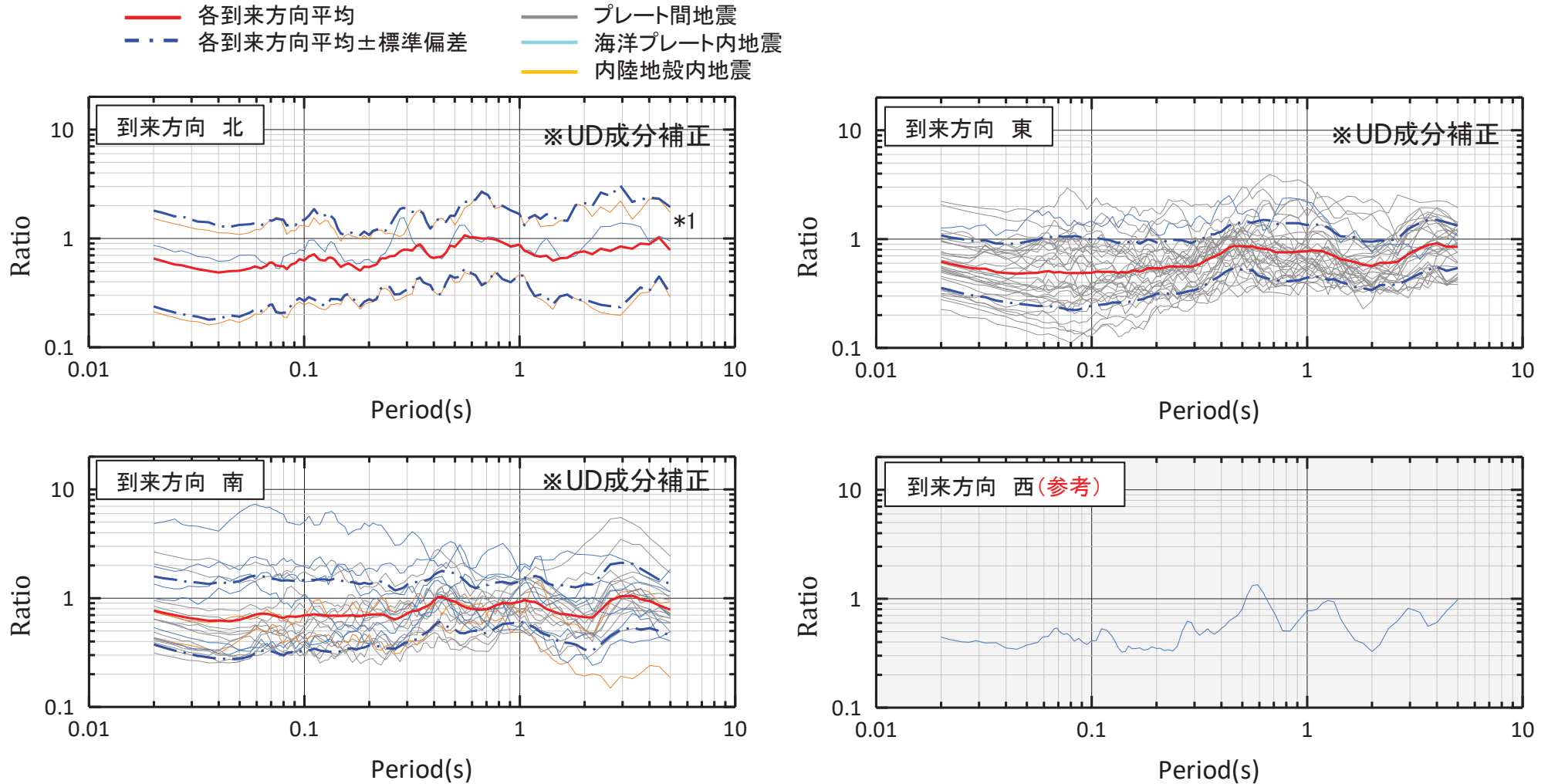
自由地盤の岩盤上部地震観測点 (T.P.+2.0m) / Noda et al.(2002)

*1 平成30年北海道胆振東部地震: 震源深さが深く短周期レベルが大きい傾向にある。

3. 4 Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比較

(3) 観測記録とNoda et al.(2002)との比較 到来方向による違い 鉛直成分

▶ 鉛直成分も水平成分と同様の傾向にある。



観測記録とNoda et al.(2002)との比較 地震波到来方向別 鉛直成分
自由地盤の岩盤上部地震観測点 (T.P.+2.0m) / Noda et al.(2002)

*1 平成30年北海道胆振東部地震: 震源深さが深く短周期レベルが大きい傾向にある。

(4)まとめ

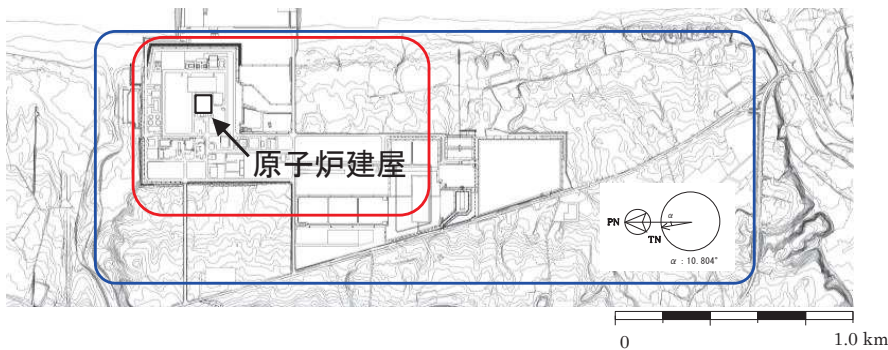
- Noda et al.(2002)の方法により評価した応答スペクトルと観測記録の応答スペクトルの残差を用いた検討から、地震タイプ別の残差の傾向が著しく大きい結果になっていないこと、また、地震波到来方向別に分類した場合の残差の形状が、特に大きな相違はないことを確認した。

以上の検討結果から、当該自由地盤(T.P.+2.0m)の振動特性は一般的な岩盤における振動特性と同等であり、また、地下構造には振動特性に影響を与えるような著しい不均質性はないと判断される。

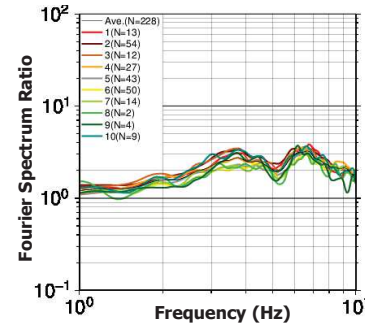
3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

(1) 検討概要①

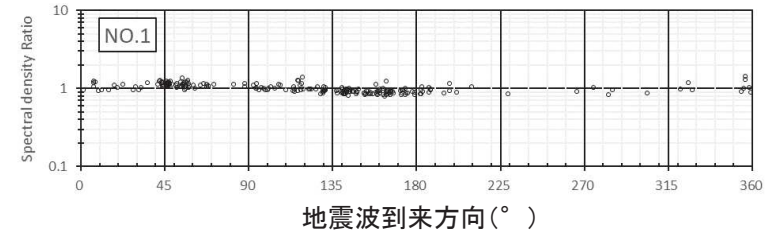
【目的】 敷地内臨時高密度観測を実施し、各観測点の地震波到来方向の違いによる基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきは小さいことを確認する。



検討範囲イメージ



基準化スペクトル(例)
(地震波到来方向の比較)



※地震波到来方向は真北(TN)を0°とし、時計回りとした。
スペクトル密度比(例)

3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

- 原子炉建屋等の重要施設の周辺で稠密に地震計を配置
- 敷地地表24箇所

記録の傾向確認(表層の影響等)

- ① 到来方向別 基準化スペクトル(各観測点/地表基準観測点)
- ② 到来方向別 スペクトル密度比(基準化スペクトル/平均基準化スペクトル)

基準化スペクトル及びスペクトル密度比の地震波到来方向によるばらつきは、地点に関わらず小さい。

3.6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討

- 敷地全体を南北に縦断するように地震計を配置
- 敷地地表5箇所

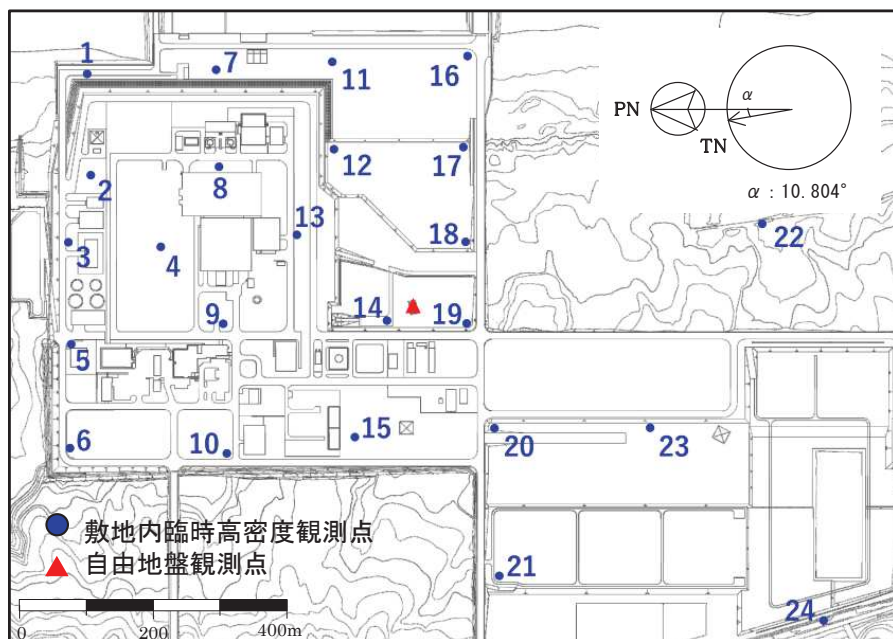
- ① 到来方向別 基準化スペクトル(各観測点/地表基準観測点)
- ② 到来方向別 スペクトル密度比(各観測点/地表基準観測点)

基準化スペクトル及びスペクトル密度比の地震波到来方向によるばらつきは、地点に関わらず小さい。

3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

(1) 検討概要②

- 2013年5月～2015年11月(一部は2014年9月まで)の期間, 敷地内地表24箇所に地震計を配置し, 高密度微小地震観測を行った。地震計は, 岩盤のせん断波速度及び検討対象とする周波数範囲(1～10Hz)を考慮し, 原子炉建屋等の重要施設の周辺では150m～200m程度に稠密に配置し, それ以外ではやや広めの間隔に配置した。
- この期間に得られた地震観測記録を用い, 基準化スペクトル及びスペクトル密度比[澤田ほか(2018)]により, 地震波到来方向の違いによる影響を確認する。基準点は, 自由地盤観測点に近く解放基盤表面相当(T.P.+2.0m)の応答に概ね近いと考えられるNo.14観測点(T.P.+10.0m)とした。
- 敷地地盤の振動特性に地下構造の不均質性の影響が小さい場合, 地震の到来方向の違いによらず各観測点の岩盤中の揺れの差異は小さくなり, 基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきも小さくなる。
- 各観測点の揺れは「観測点直下の岩盤中の揺れ」と「表層地盤の増幅特性」の影響を受けるが, 表層地盤は薄く当該表層地盤の不均質性の影響は小さいことから, 観測記録の基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきは岩盤中の揺れのばらつきに相当すると考えられる。



敷地内臨時高密度観測点

基準化スペクトル

$$S_{no} = \frac{S_n}{S_{14}}$$

S_{no} : No.n観測点の基準化スペクトル

S_n : No.n観測点のフーリエ振幅スペクトル

S_{14} : No.14観測点のフーリエ振幅スペクトル

なお, フーリエ振幅スペクトルはTransverse成分とRadial成分の平均とした。

スペクトル密度比

$$\text{スペクトル密度} = \frac{\text{各観測点・各地震の基準化スペクトルの面積}}{\text{各観測点の平均基準化スペクトルの面積}}$$

基準化スペクトルの面積の算定は1～10Hzとした。

(2) 表層が基準化スペクトルの形状に与える影響

- ばらつきの検討に先立ち、各観測点の基準化スペクトルの傾向の妥当性確認のため、地盤の増幅特性を表す微動H/Vスペクトルとの比較を行った。また、表層の厚さとの整合性についても検討した。
- 検討に当たっては、各観測点を整地の状態に応じて以下の通り区分した。

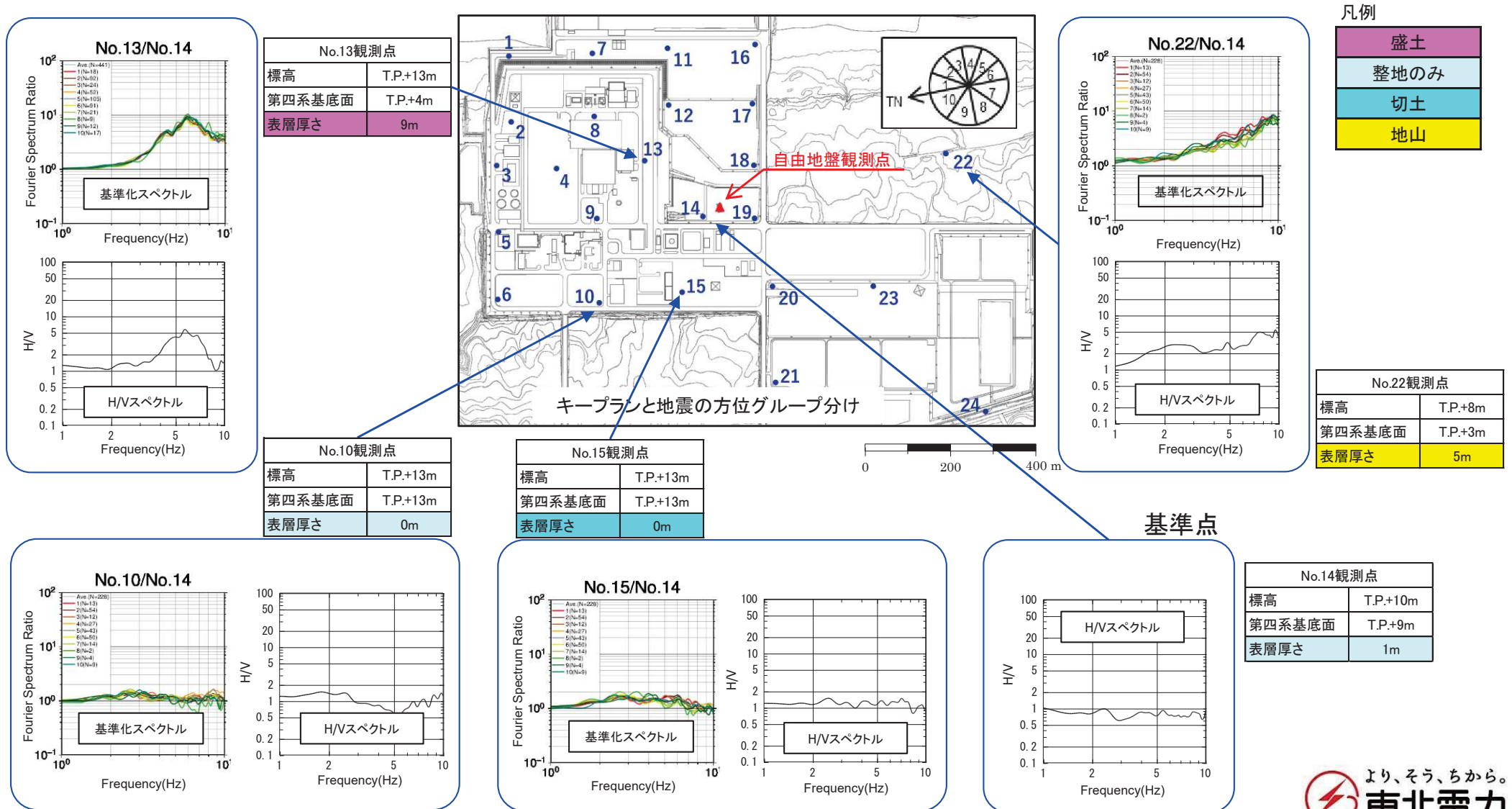
整地状態の区分

| 区分 | 区分の考え方 |
|------|---------------------------------------|
| 盛土 | 人工的に盛土を行っている観測点。他の区分に比べて地盤が軟らかいと判断した。 |
| 整地のみ | 鋤取り、敷き均し等のみの観測点。整地前後の標高差±1mを目安とした。 |
| 切土 | 人工的に切土を行っている観測点。 |
| 地山 | 伐採のみで整地を行っていない観測点。 |

3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討 (2) 表層が基準化スペクトルの形状に与える影響

➤ 微動H/Vスペクトルとの比較及び表層の厚さ等との整合性の検討について、以下に示す(この頁には代表的な観測点を示し、その他の観測点は補足説明資料3章に示す)。

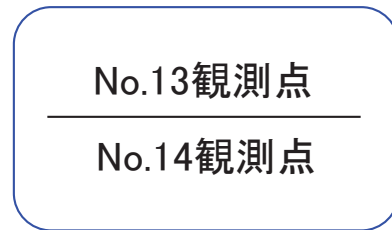
- ① 基準点である地表観測点であるNo.14の微動H/Vスペクトルは概ね平坦であり、表層の影響が少ない。
- ② 基準化スペクトルの形状は微動H/Vスペクトルと良い対応を示す。また、基準化スペクトルは、盛土では卓越振動数が現れやすく、表層が厚いほど低振動数となる等、整地の状況や表層の厚さと整合する傾向を示している。



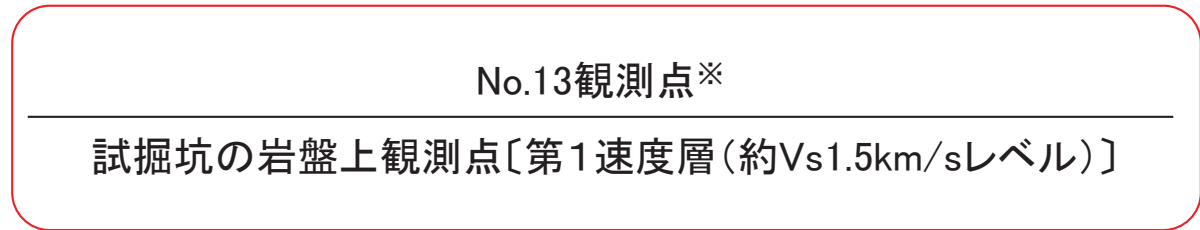
3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討 (2) 表層が基準化スペクトルの形状に与える影響

- 基準化スペクトル策定の基準点となるNo.14観測点 (T.P.+10.0m) の振動特性確認のために、別途実施している臨時地震観測記録との比較を行った。具体的には、No.14観測点及び試掘坑内観測点を基準として、それぞれの臨時観測期間で共通に観測を行っているNo.13観測点の基準化スペクトルを作成し比較した。

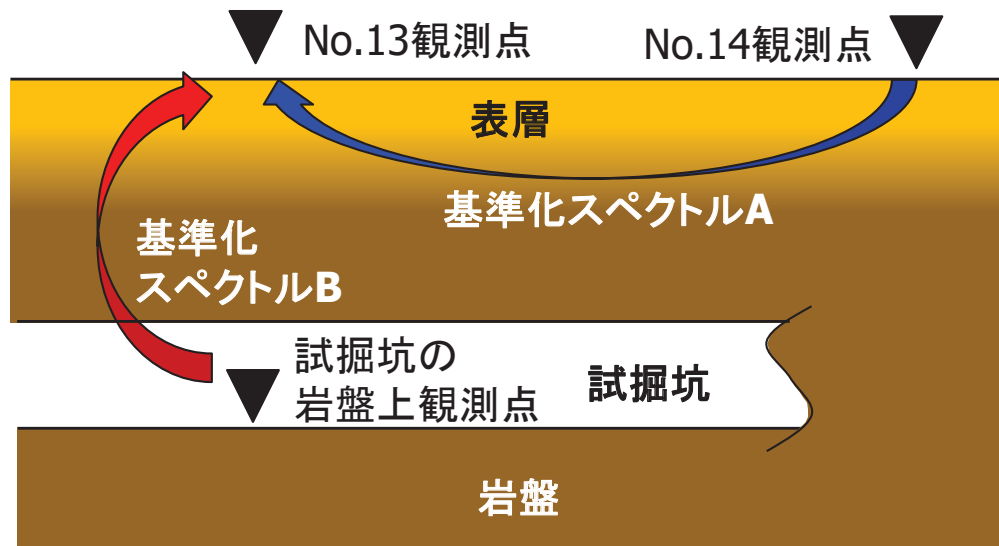
基準化スペクトルA



基準化スペクトルB

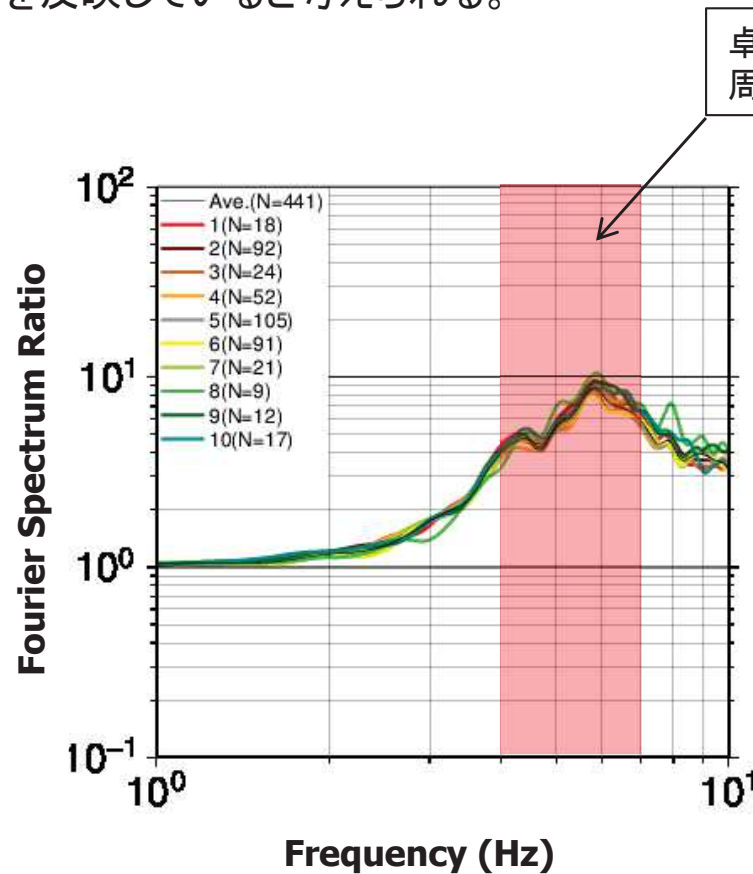


※ 基準化スペクトルAに用いた観測記録とは期間が異なる。

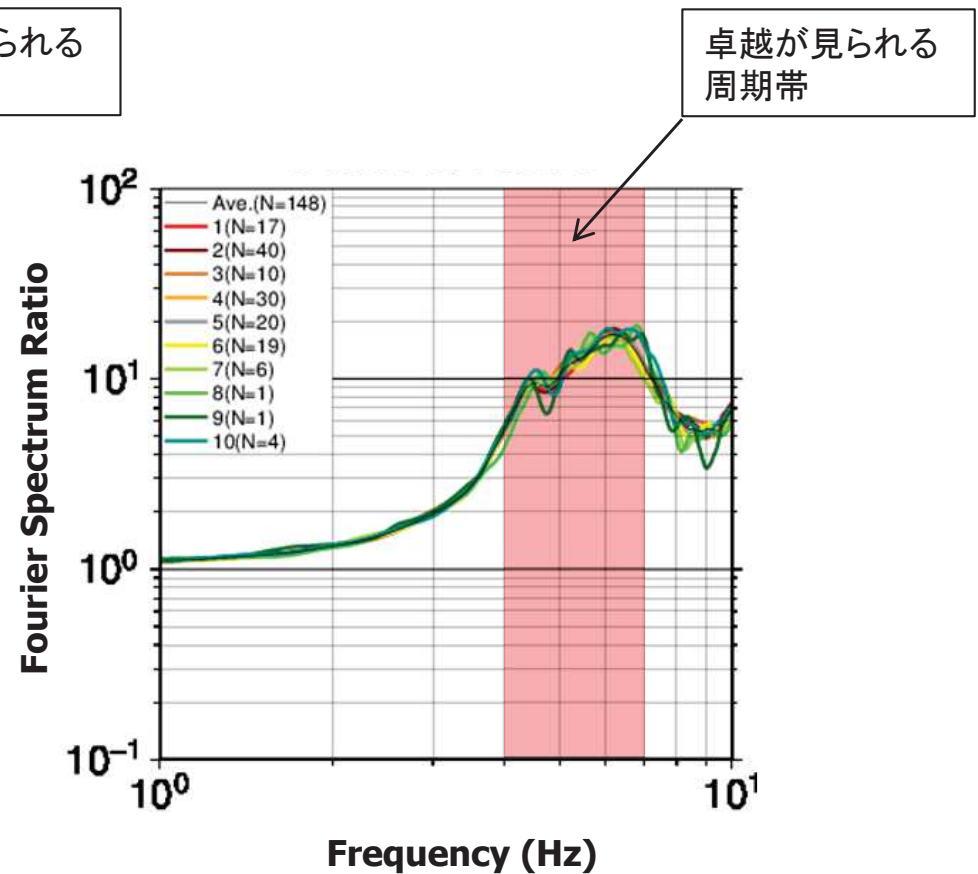


3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討 (2) 表層が基準化スペクトルの形状に与える影響

- 基準化スペクトルA (No.13観測点/No.14観測点)と基準化スペクトルB (No.13観測点/試掘坑内観測点)は、卓越周期がほぼ同じであることから、No.14は岩盤に近い振動性状を示すと考えられる。
- この点からも、敷地内臨時高密度観測の基準化スペクトルの形状は、各観測点の盛土等の違いや表層の厚さの違いを反映していると考えられる。



基準化スペクトルA
No.13観測点/No.14観測点

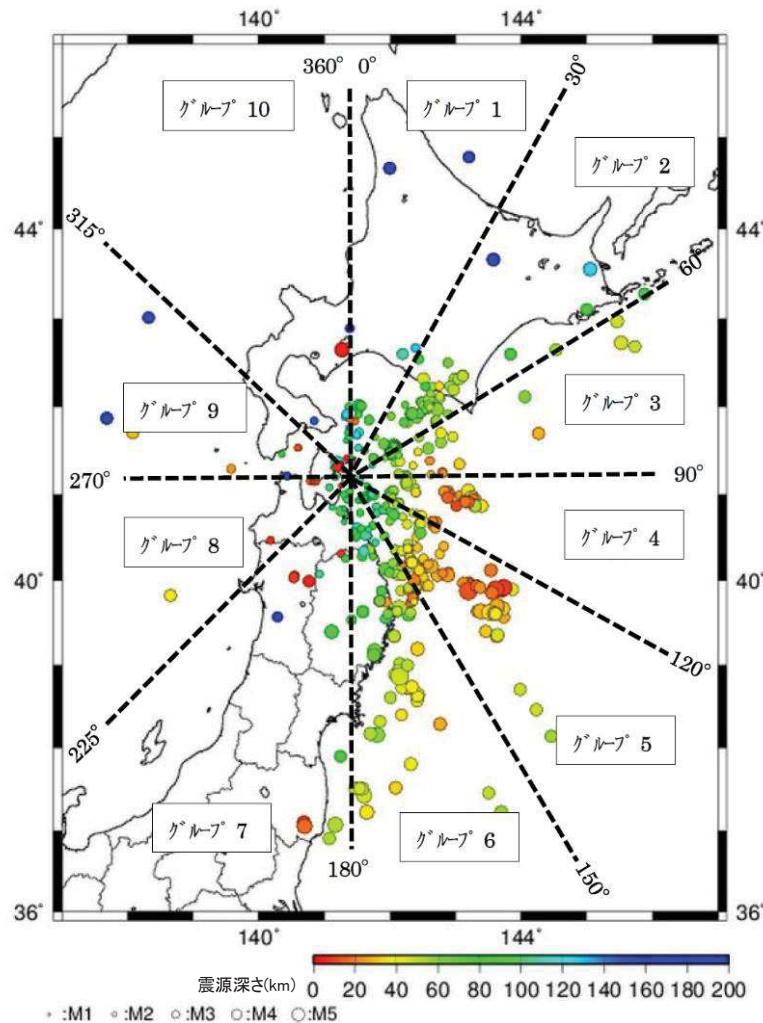


基準化スペクトルB
No.13観測点*/試掘坑の岩盤上観測点

※基準化スペクトルAと観測期間が異なる。

3. 5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討 (3) 検討対象地震

- ▶ 2013年5月から2015年11月まで観測した地震(441地震)を用いる。
- ▶ ただし、原子炉建屋から離れた観測点については、2014年9月に撤去するまでの228地震とした。



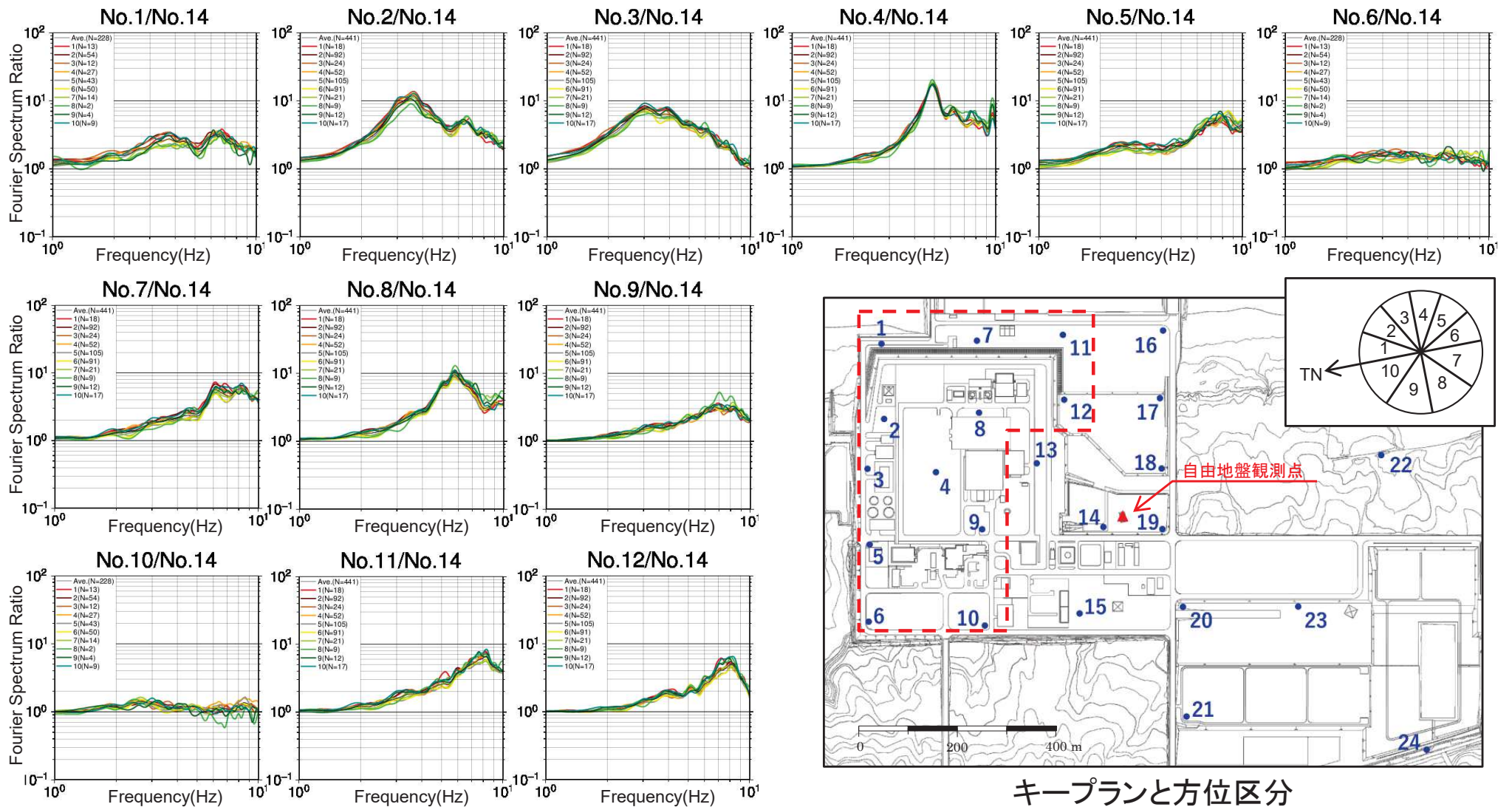
観測地震の震央分布と方位区分

方位区分と各観測点の地震数

| 方位Gr St.No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 合計 |
|----------------|-----|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| No.1 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.2 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.3 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.4 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.5 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.6 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.7 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.8 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.9 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.10 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.11 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.12 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.13 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.14 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.15 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.16 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.17 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.18 | 18 | 92 | 24 | 52 | 105 | 91 | 21 | 9 | 12 | 17 | 441 |
| No.19 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.20 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.21 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.22 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.23 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| No.24 | 13 | 54 | 12 | 27 | 43 | 50 | 14 | 2 | 4 | 9 | 228 |
| 合計 | 377 | 1790 | 444 | 973 | 1838 | 1733 | 427 | 139 | 200 | 320 | 8241 |

3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討 (4) 方位区分毎の基準化スペクトルの比較 (No.1~No.12)

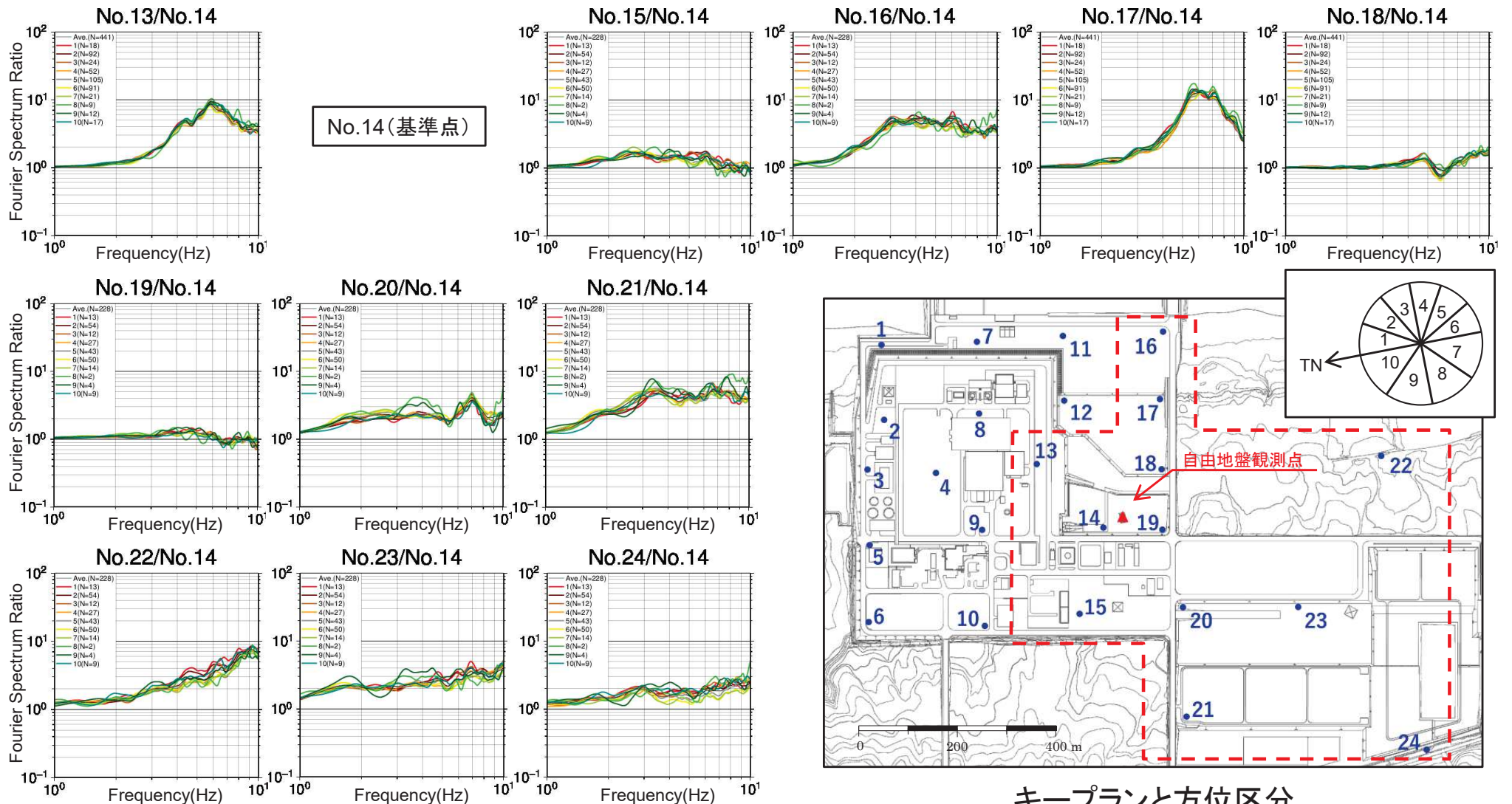
➤ 基準化スペクトルの地震波到来方向のばらつきは、地点に関わらず小さい。



3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

(4) 方位区分毎の基準化スペクトルの比較 (No.13~No.24)

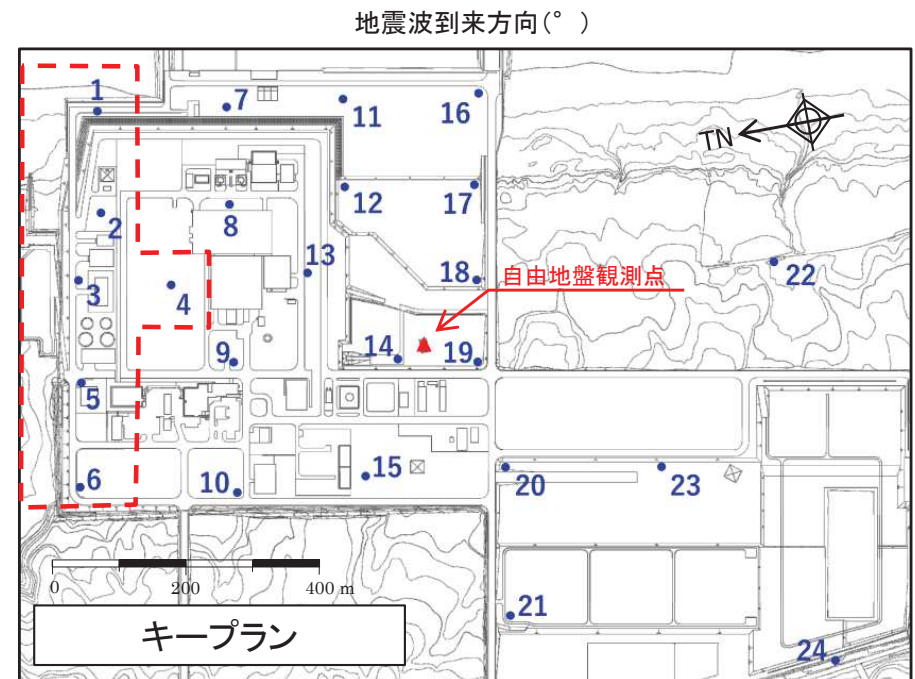
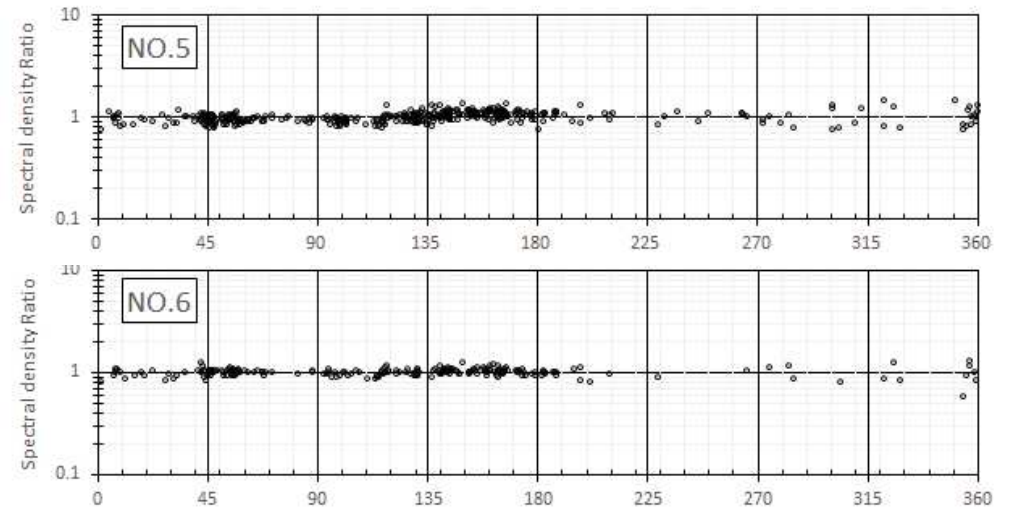
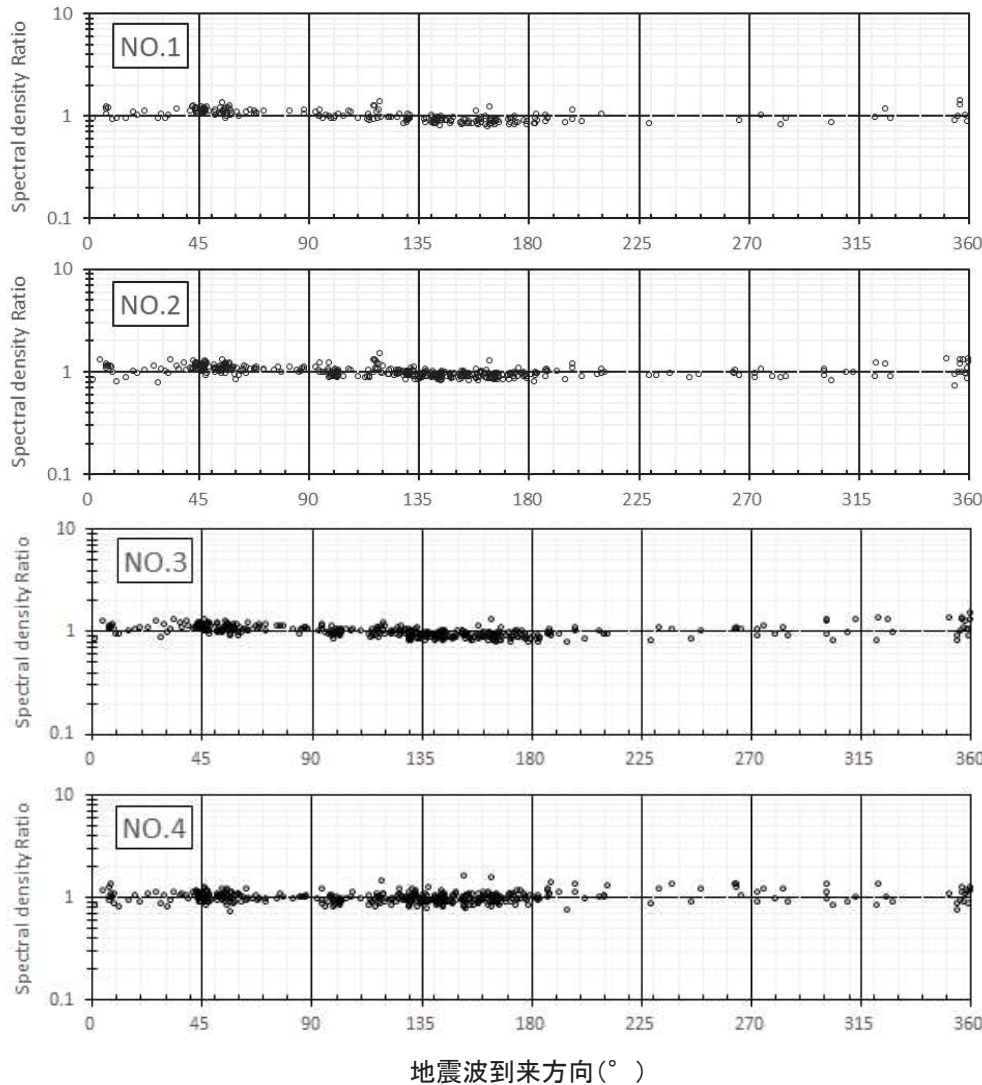
- 基準化スペクトルの地震波到来方向のばらつきは、地点に関わらず小さい。
- いずれの地点もばらつきは小さいものの、到来方向に着目すると、方位8, 9(西側)は平均に比べて比較的差がみられる振動数がある(例えば, No.20, 21, 23, 24)。これは、地震数が少ない影響と考えられる。



3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

(5) スペクトル密度比の地震波到来方向依存性 (No.1~No.6)

- 各観測点において、スペクトル密度比は概ね1であり、地震波到来方向の違いによるばらつきは小さい。
- また、上記傾向は各観測点で共通している。

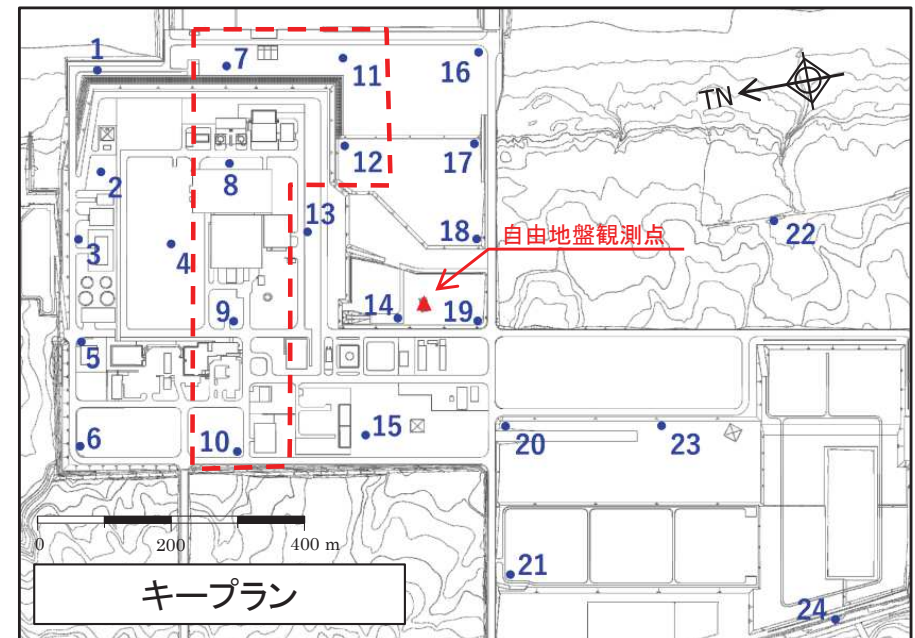
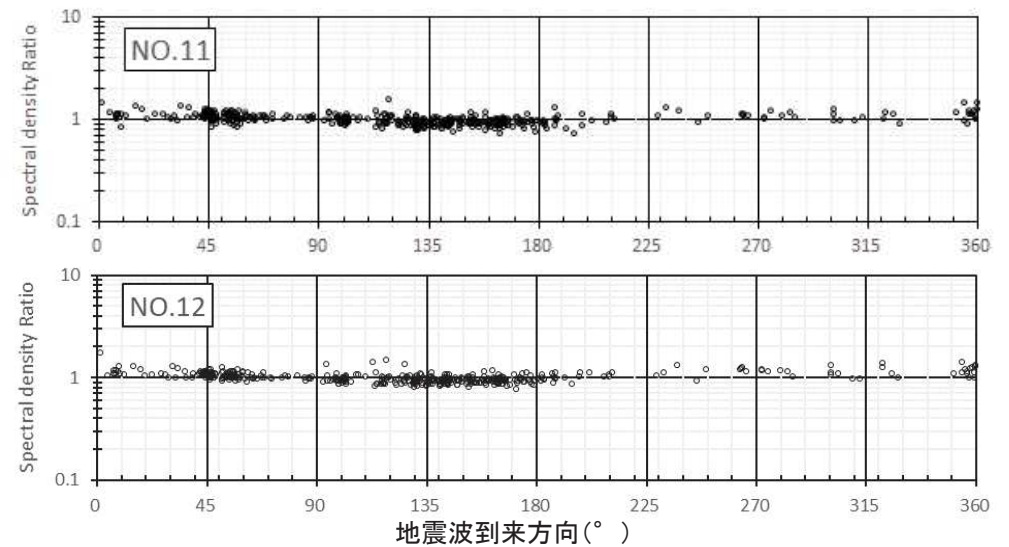
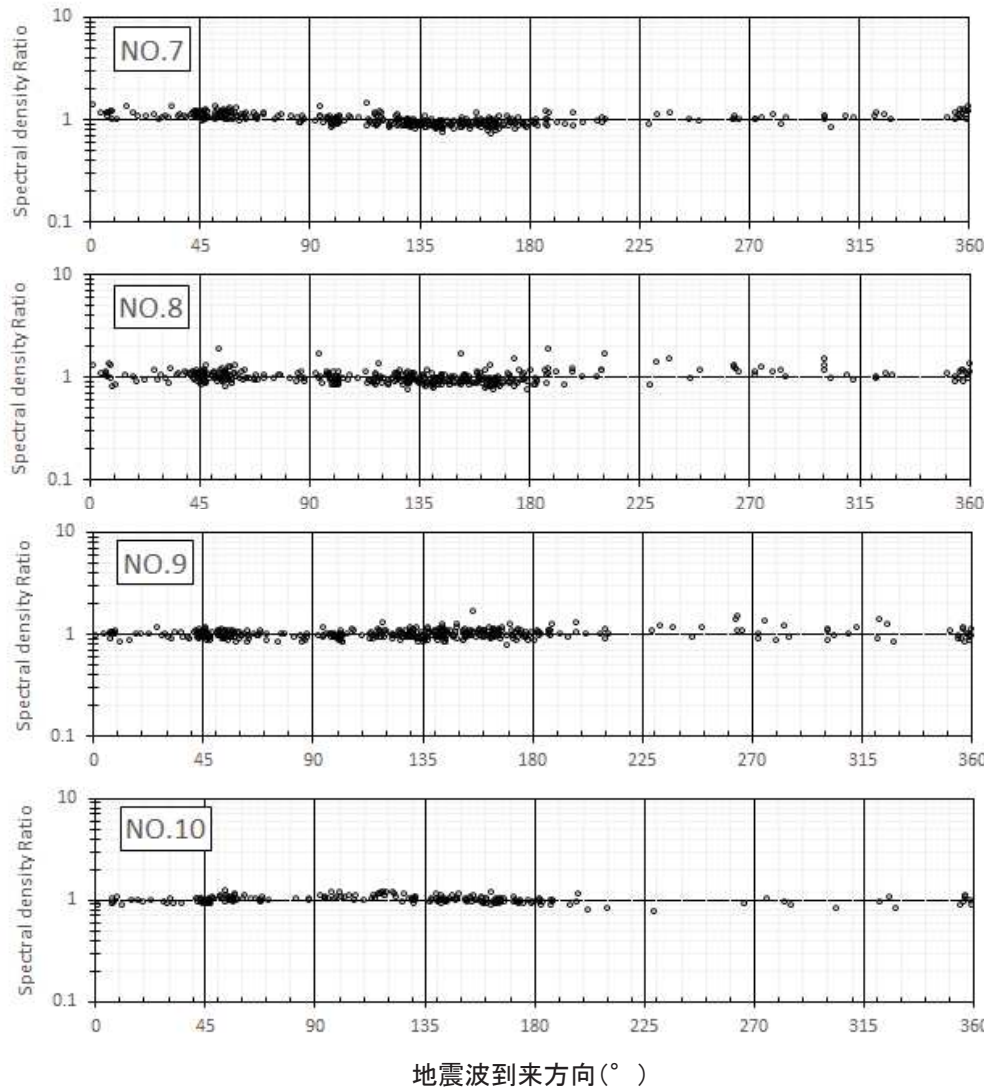


※地震波到来方向は真北(TN)を0°とし、時計回りとした。

3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

(5) スペクトル密度比の地震波到来方向依存性 (No.7~No.12)

- 各観測点において、スペクトル密度比は概ね1であり、地震波到来方向の違いによるばらつきは小さい。
- また、上記傾向は各観測点で共通している。

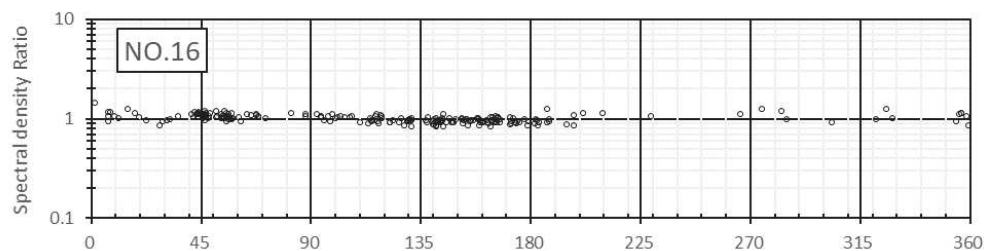
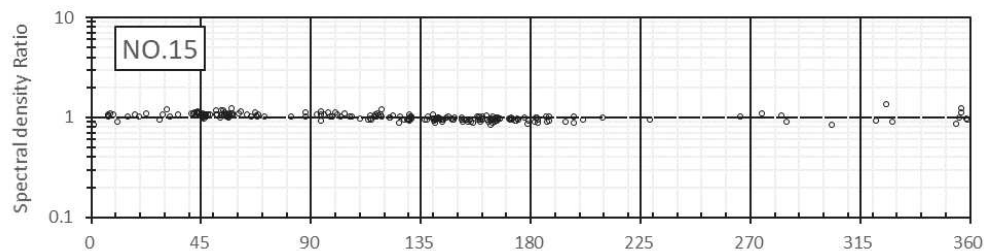
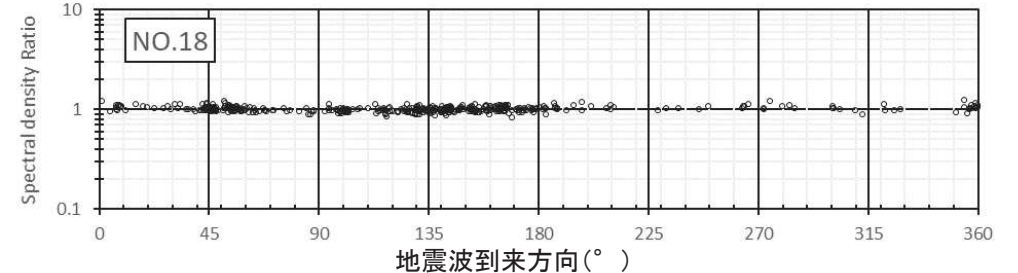
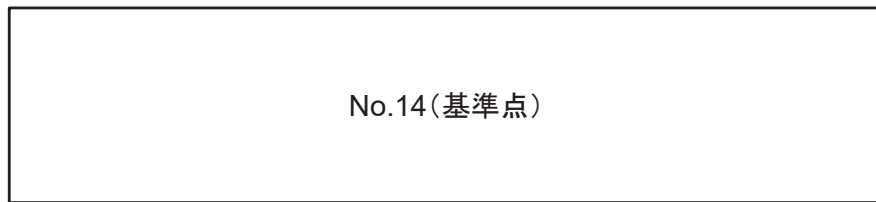
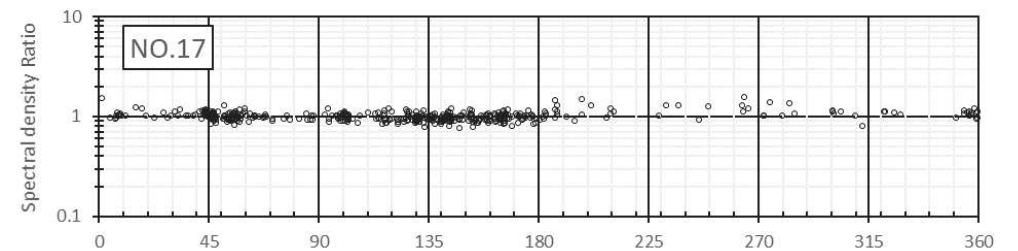
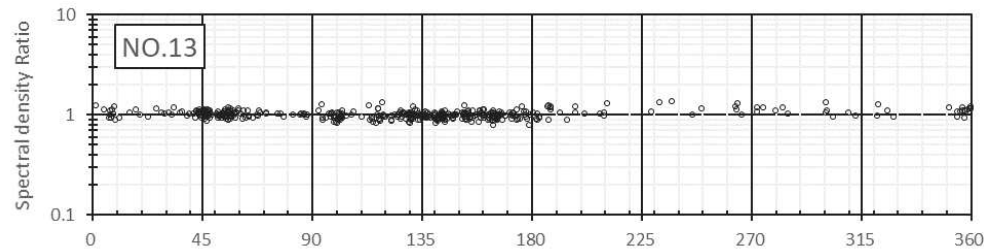


※地震波到来方向は真北(TN)を0°とし、時計回りとした。

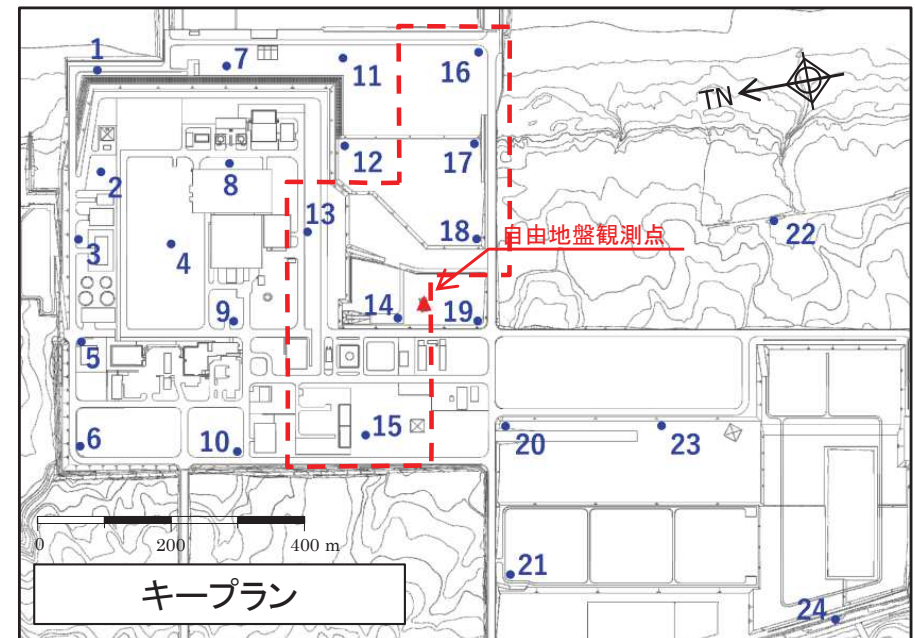
3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

(5) スペクトル密度比の地震波到来方向依存性 (No.13~No.18)

- 各観測点において、スペクトル密度比は概ね1であり、地震波到来方向の違いによるばらつきは小さい。
- また、上記傾向は各観測点で共通している。



地震波到来方向(°)

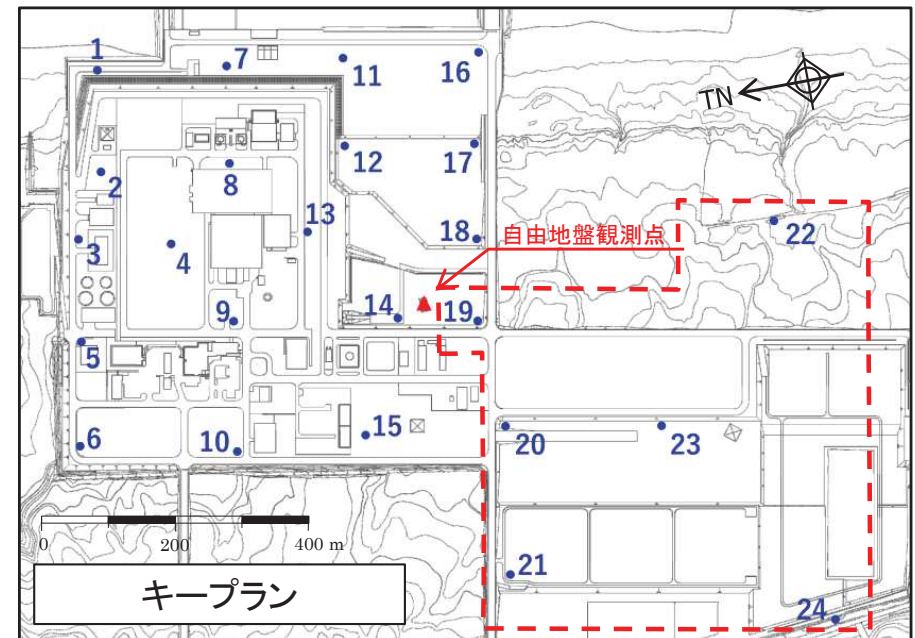
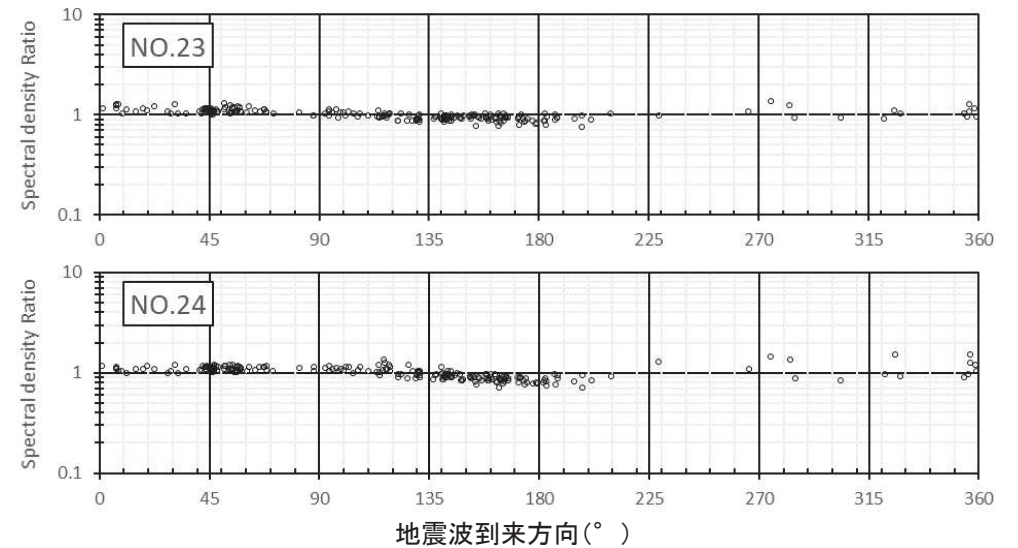
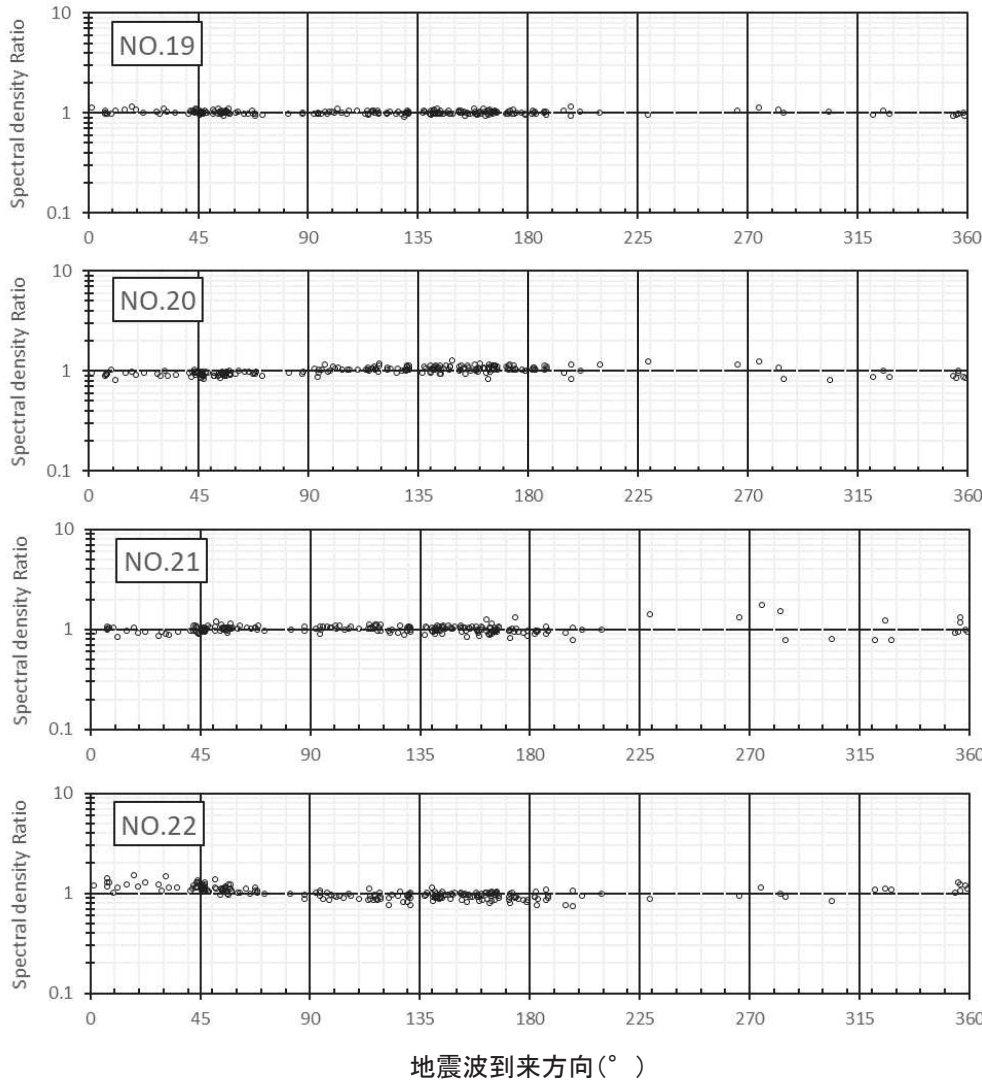


※地震波到来方向は真北(TN)を0°とし、時計回りとした。

3.5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

(5) スペクトル密度比の地震波到来方向依存性 (No.19~No.24)

- 各観測点において、スペクトル密度比は概ね1であり、地震波到来方向の違いによるばらつきは小さい。
- また、上記傾向は各観測点で共通している。なお、ばらつきは小さいものの、基準点からの距離に着目すると、遠い観測点(例えば No.24)は、比較的ばらつきが大きい傾向がある。



※地震波到来方向は真北(TN)を0°とし、時計回りとした。

(6)まとめ

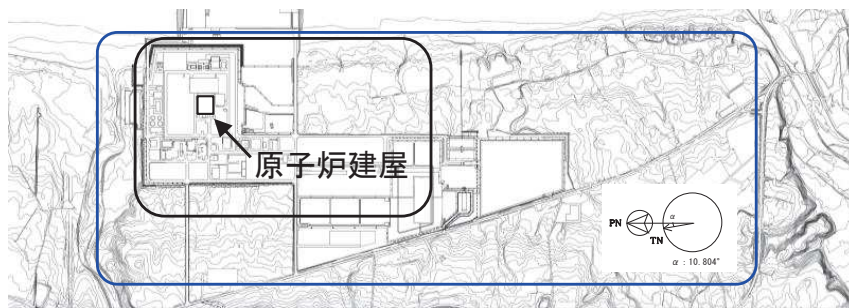
- 敷地内臨時高密度観測(敷地内地表24箇所)を実施し、各観測点の基準化スペクトルの形状の違いは盛土等の整地の状況や表層の厚さと整合していることを確認した上で、各観測点の地震波到来方向の違いによる基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきは、地点に関わらず小さいことを確認した。

以上の検討結果からも、地下構造には振動特性に影響を与えるような著しい不均質性はないと判断される。

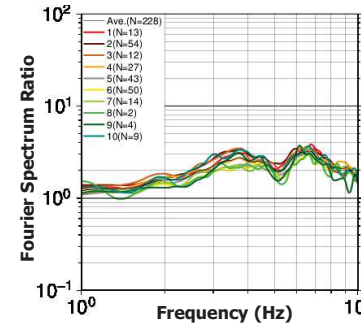
3. 6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討

(1) 検討概要①

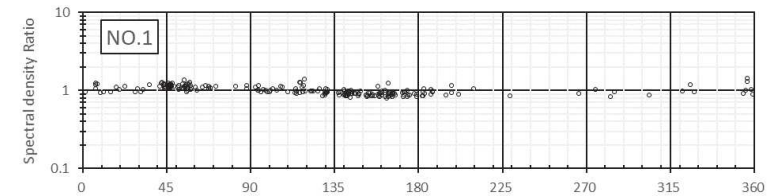
【目的】 敷地内広域の南北アレイ臨時観測を実施し、各観測点の地震波到来方向の違いによる基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきは小さいことを確認する。



検討範囲イメージ



基準化スペクトル(例)
(地震波到来方向の比較)



※地震波到来方向は真北(TN)を0°とし、時計回りとした。
スペクトル密度比(例)

3. 5 敷地内臨時高密度観測による地下構造の不均質性の検討

- 原子炉建屋等の重要施設の周辺で稠密に地震計を配置
- 敷地地表24箇所

記録の傾向確認(表層の影響等)

- ① 到来方向別 基準化スペクトル(各観測点/地表基準観測点)
- ② 到来方向別 スペクトル密度比(基準化スペクトル/平均基準化スペクトル)

基準化スペクトル及びスペクトル密度比の地震波到来方向によるばらつきは、地点に関わらず小さい。

3. 6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討

- 敷地全体を南北に縦断するように地震計を配置
- 敷地地表5箇所

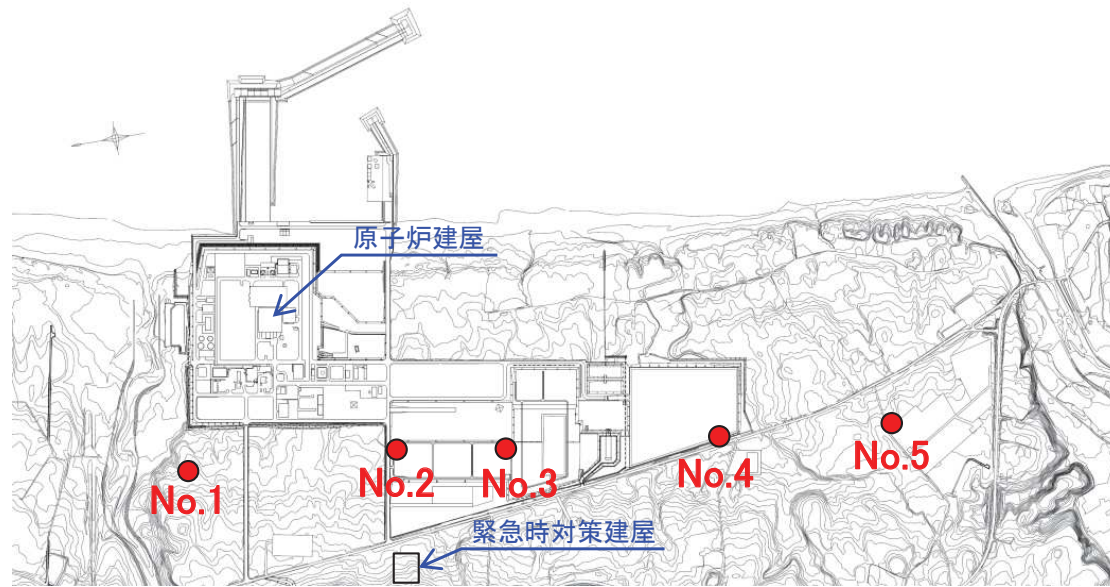
- ① 到来方向別 基準化スペクトル(各観測点/地表基準観測点)
- ② 到来方向別 スペクトル密度比(各観測点/地表基準観測点)

基準化スペクトル及びスペクトル密度比の地震波到来方向によるばらつきは、地点に関わらず小さい。

3. 6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討

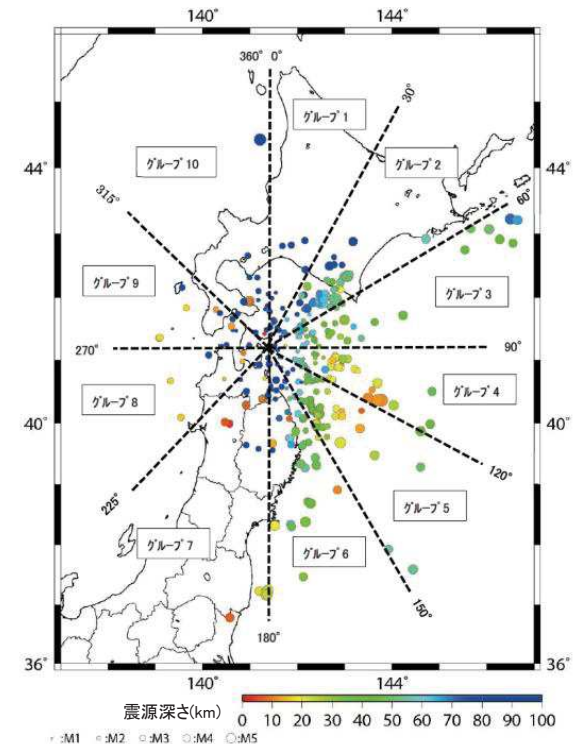
(1) 検討概要②

- 2015年11月～2016年12月の期間で、敷地全体で観測点を約500m間隔に配置した南北アレイ臨時観測を行った。
- この期間に得られた地震観測記録(438地震)を用い、基準化スペクトル及びスペクトル密度比〔澤田ほか(2018)〕により、地震波到来方向の違いによる影響について検討を行った。基準点は、比較的表層の薄いNo.1観測点とした。
- 敷地地盤の振動特性に地下構造の不均質性の影響が小さい場合、地震波到来方向の違いによらず各観測点の岩盤中の揺れの差異は小さくなり、基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきも小さくなる。
- 各観測点の揺れは「観測点直下の岩盤中の揺れ」と「表層地盤の増幅特性」の影響を受けるが、表層地盤は薄く当該表層地盤の不均質性の影響は小さいことから、観測記録の基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきは岩盤中の揺れのばらつきに相当すると考えられる。



● 地震計設置位置

南北アレイ臨時観測の位置

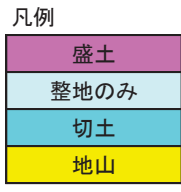
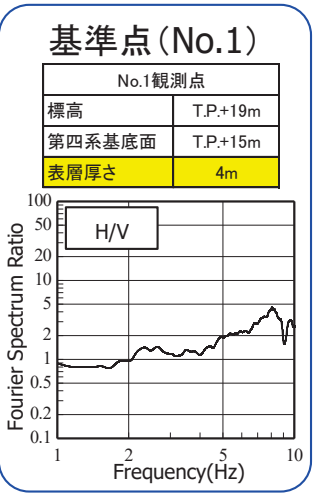
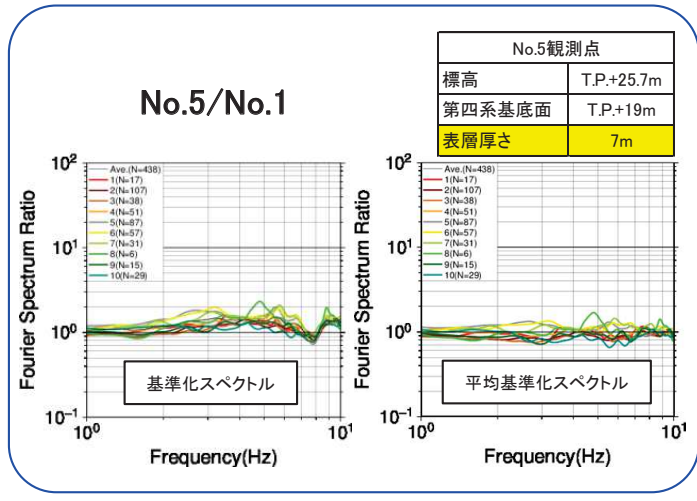
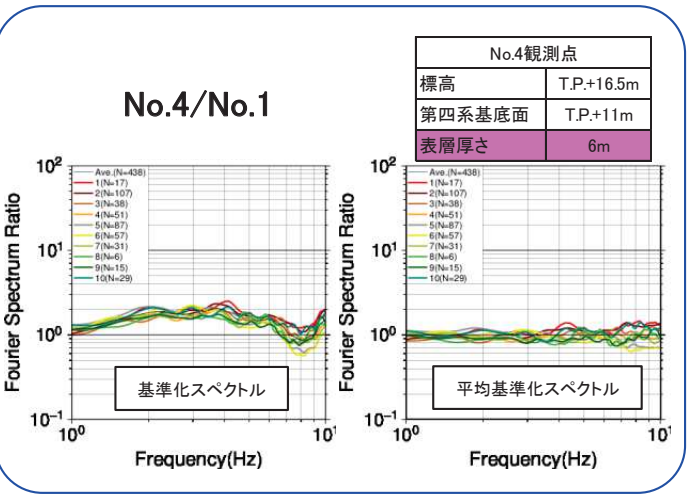
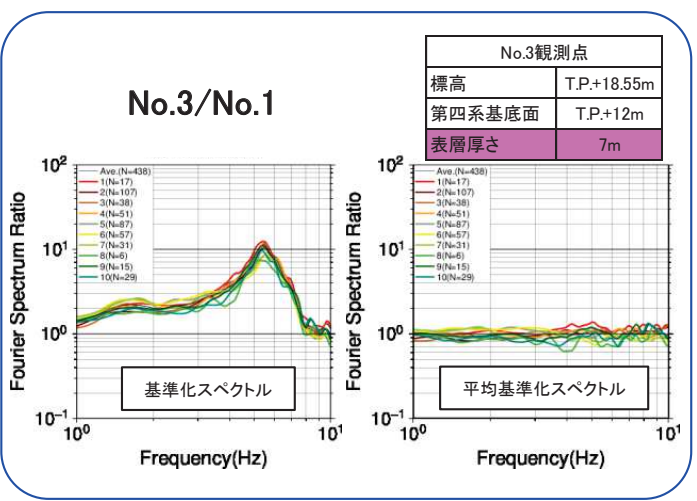
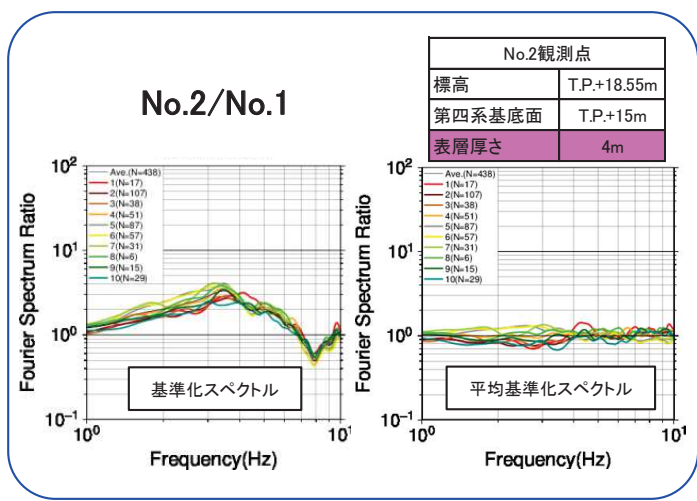


観測地震の震央分布と方位区分

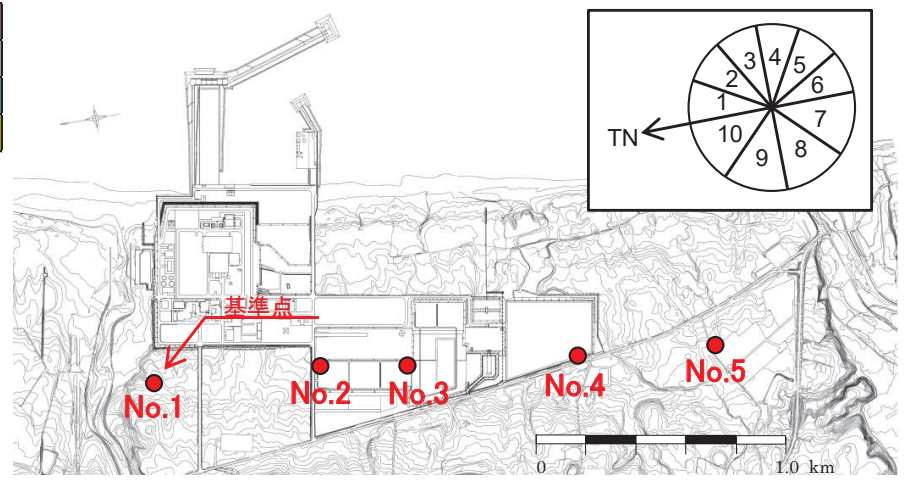
3. 6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討

(2) 方位区分毎の基準化スペクトルの比較

- 基準観測点は、表層が地山で厚さもこの中では薄いNo.1観測点とする。
- 各観測点の基準化スペクトルの形状と表層地盤の関係では、表層が同じ地山のNo.5観測点はピークの鈍い形状を示していること、表層が盛土のNo.2及びNo.3観測点では卓越部分が認められること、一方、同じ盛土のNo.4観測点は道路脇のためピークは鈍いことなど概ね表層地盤と整合した記録となっている。
- 「No.1を基準とした各地点の基準化スペクトル」及び「各地点の基準化スペクトルをその平均で除した平均基準化スペクトル」は、各観測点とも、ばらつきは比較的小さく、地震波到来方向による振動特性の違いも小さい。
- なお、ばらつきは小さいものの、到来方向に着目すると、地震数が少ない方向は、平均に比べて比較的差がみられる振動数がある。



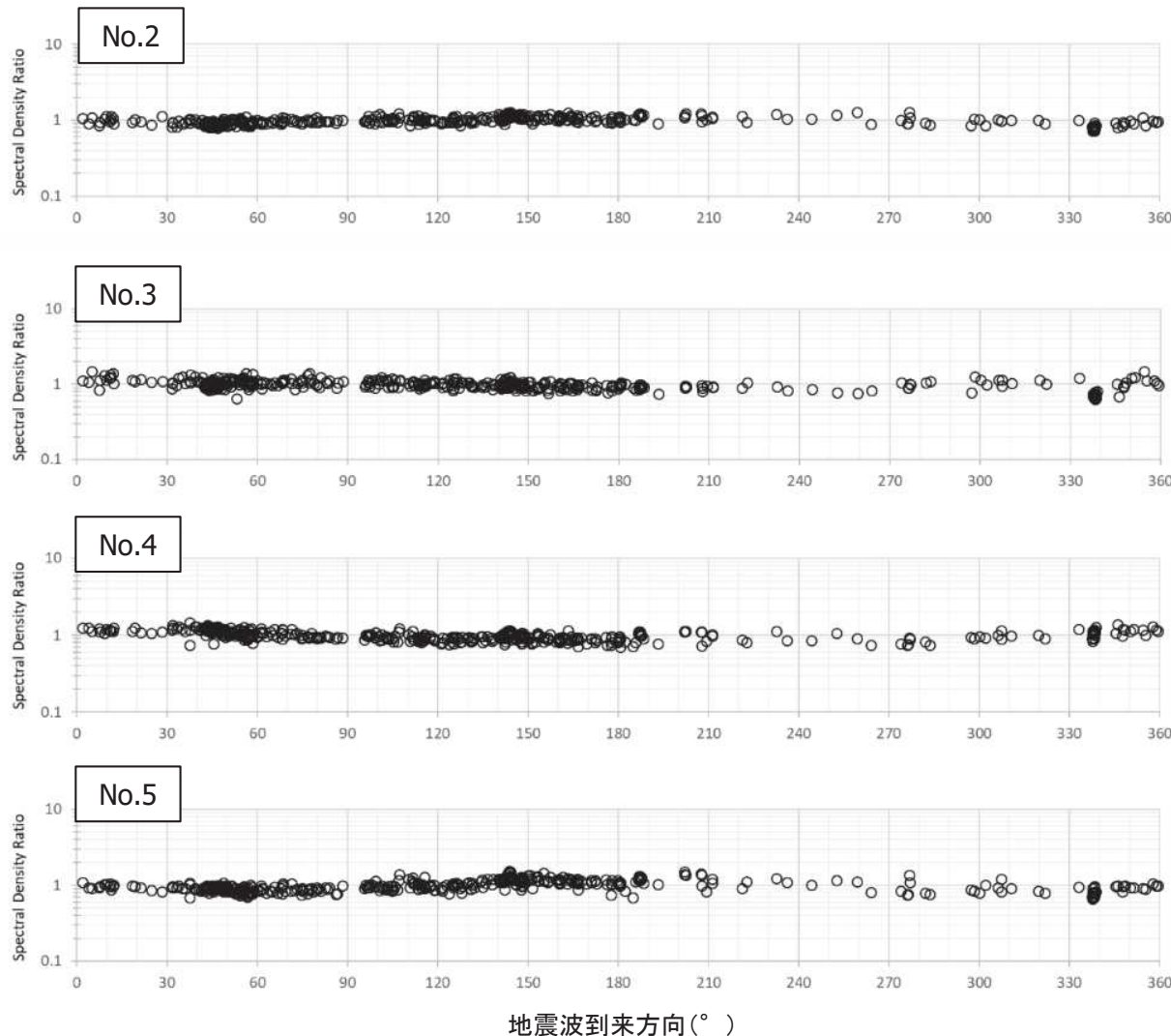
整地状態は、敷地内臨時高密度観測と同じ区分とした。



キープランと地震の方位区分

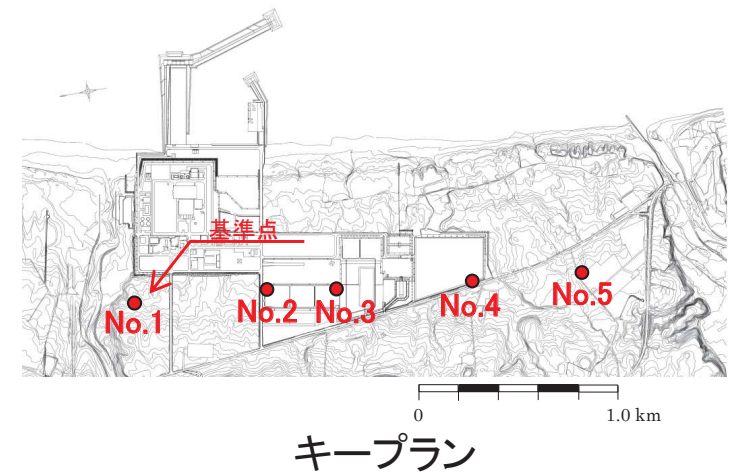
3. 6 敷地の広範囲を対象とした南北アレイ臨時観測による地下構造の不均質性の検討 (3) スペクトル密度比の地震波到来方向依存性

- No.1を基準とした各観測点のスペクトル密度比は概ね1であり、地震波到来方向の違いによるばらつきは小さい。
- また、上記傾向は各観測点で共通している。



地震波到来方向は真北(TN)を0°とし、時計回りとした。

※ばらつきは小さいものの、基準点からの距離に着目すると、最も遠いNo.5は、比較的ばらつきが大きい傾向がある。



(4) 南北アレイ臨時観測による検討 まとめ

- 敷地内広域の南北アレイ臨時観測を実施し、各観測点の基準化スペクトルの形状の違いは盛土等の整地の状況や表層の厚さと概ね整合していることを確認した上で、各観測点の地震波到来方向の違いによる基準化スペクトル及びスペクトル密度比のばらつきは、地点に関わらず小さいことを確認した。

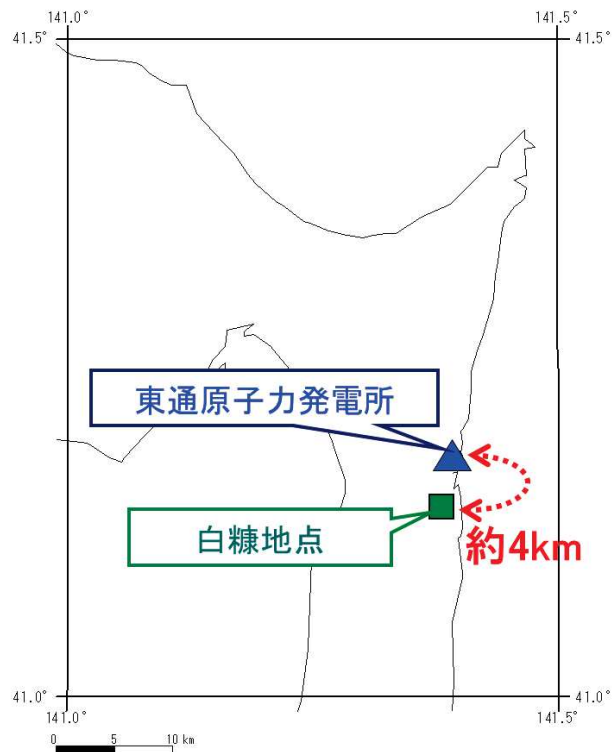
以上の検討結果からも、地下構造には振動特性に影響を与えるような著しい不均質性はないと判断される。

3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較

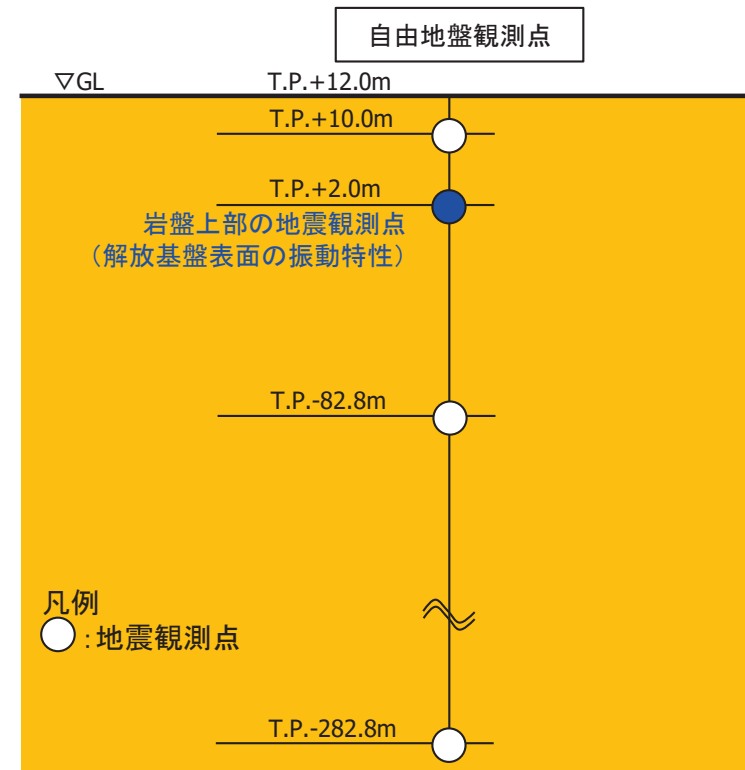
(1) 検討概要

【目的】 東通原子力発電所と、より硬質な岩盤の電力中央研究所露頭岩盤上強震観測網(RK-net)白糠地点の地震観測記録の比較を行い、両者の振動特性について検討を行う。

- 東通原子力発電所から南に約4kmの位置に電力中央研究所の強震観測網(RK-net)の白糠地点がある。RK-netの白糠地点では、岩盤が露頭している場所に地震計が設置されている。その地震計が設置されている地盤は硬質岩盤(安山岩質凝灰角礫岩)で、S波速度は1.98km/s、P波速度は3.65km/s(コア採取による室内試験の結果)である。[東ほか(2009)]
- 東通原子力発電所と白糠地点からの震源距離がほぼ同じ位置で発生した地震を対象に、地震観測記録を比較する。なお、自由地盤の記録はT.P.+2.0mの観測点を使用するが、当該観測点の土被り深さは10m程度と浅いため地中波を使用した。



東通原子力発電所とRK-netの白糠地点の位置



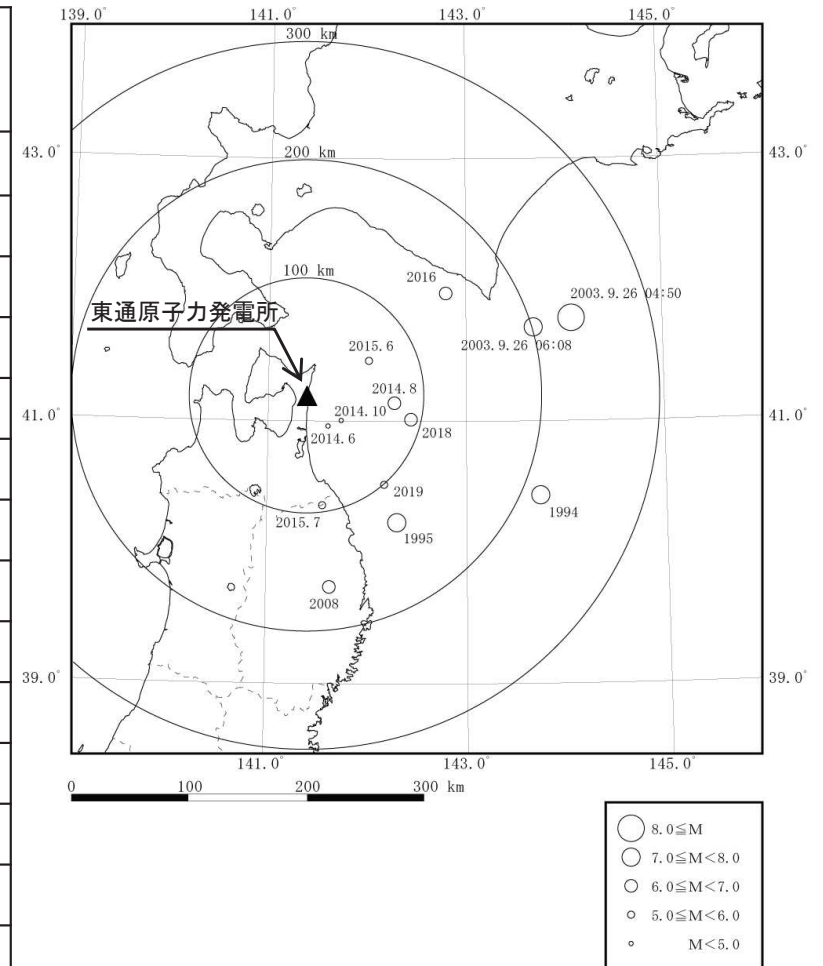
検討に用いた地震観測点
(東通原子力発電所自由地盤観測点)

3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較

(2) 検討対象地震

▶ 対象とする地震は、東通原子力発電所の自由地盤観測点と電力中央研究所の露頭岩盤上強震観測網RK-netの白糠地点の両地点で観測された地震のうち、比較的規模の大きい地震及び近年観測された13地震とした。

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 東経 | | 北緯 | | M | 震源深さ (km) | 東通原子力 発電所 震源距離 (km) | 白糠地点 震源距離 (km) |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|--------------|------------------------------|----------------------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | |
| 1994 | 12 | 28 | 21 | 19 | 143 | 44.7 | 40 | 25.8 | 7.6 | 0 | 216 | 215 |
| 1995 | 1 | 7 | 7 | 37 | 142 | 18.33 | 40 | 13.4 | 7.2 | 48 | 141 | 137 |
| 2003 | 9 | 26 | 4 | 50 | 144 | 4.71 | 41 | 46.71 | 8.0 | 45 | 238 | 240※ |
| 2003 | 9 | 26 | 6 | 8 | 143 | 41.49 | 41 | 42.59 | 7.1 | 21 | 202 | 204※ |
| 2008 | 7 | 24 | 0 | 26 | 141 | 38.12 | 39 | 43.92 | 6.8 | 108 | 196 | 192 |
| 2014 | 6 | 9 | 7 | 50 | 141 | 36.67 | 40 | 57.43 | 4.6 | 82 | 88 | 87 |
| 2014 | 8 | 10 | 12 | 43 | 142 | 16.74 | 41 | 8.04 | 6.1 | 51 | 90 | 91 |
| 2014 | 10 | 14 | 6 | 24 | 141 | 44.59 | 40 | 59.99 | 4.4 | 81 | 89 | 88 |
| 2015 | 6 | 8 | 15 | 1 | 142 | 1.19 | 41 | 27.35 | 5.6 | 66 | 90 | 92 |
| 2015 | 7 | 10 | 3 | 32 | 141 | 33.59 | 40 | 21.24 | 5.7 | 88 | 129 | 125 |
| 2016 | 1 | 14 | 12 | 25 | 142 | 48.07 | 41 | 58.21 | 6.7 | 52 | 155 | 158 |
| 2018 | 1 | 24 | 19 | 51 | 142 | 26.88 | 41 | 0.58 | 6.3 | 34 | 97 | 97 |
| 2019 | 12 | 19 | 15 | 21 | 142 | 10.7 | 40 | 30.7 | 5.5 | 50 | 112 | 109 |

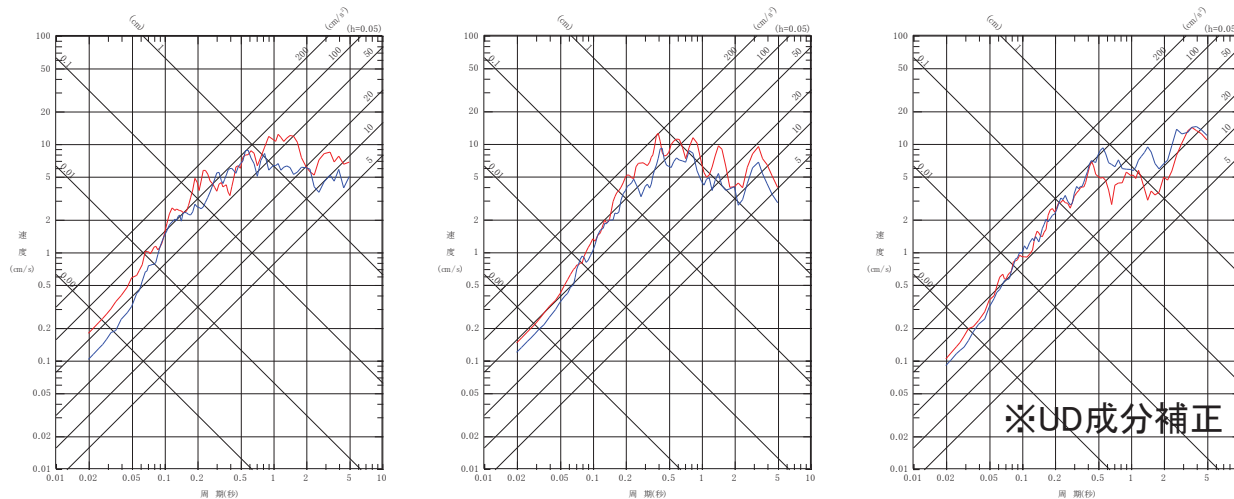


震央分布図

※白糠地点のEW成分が欠測。

3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較 (3) 応答スペクトルの比較

➤ 検討対象とした地震のうち、観測された最大加速度振幅が大きい2地震について、応答スペクトルの比較を示す。両者はほぼ同様のスペクトルとなっている。

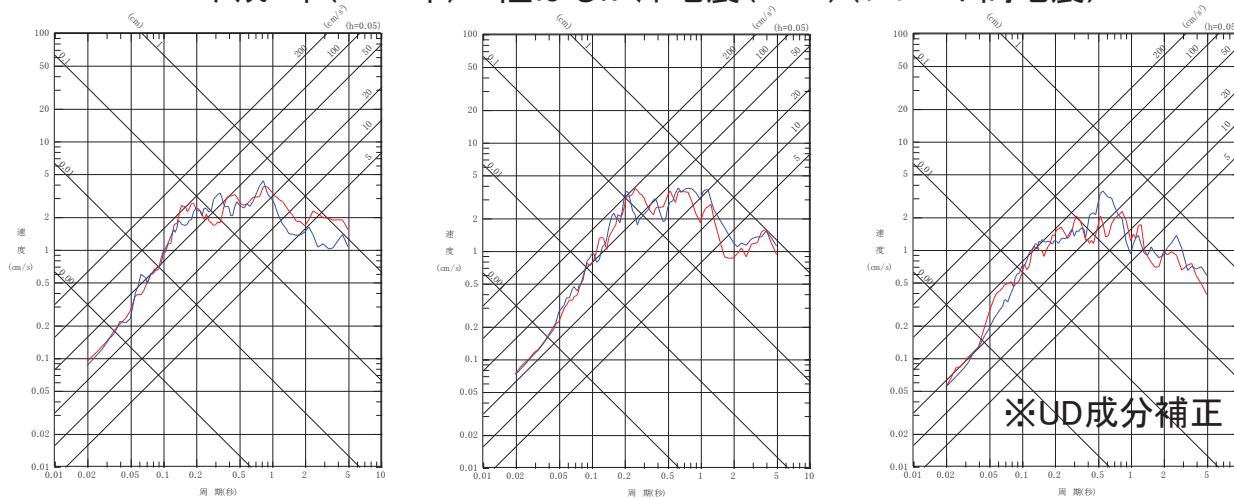


NS成分

EW成分

UD成分

平成6年(1994年)三陸はるか沖地震(M7.6)(プレート間地震)

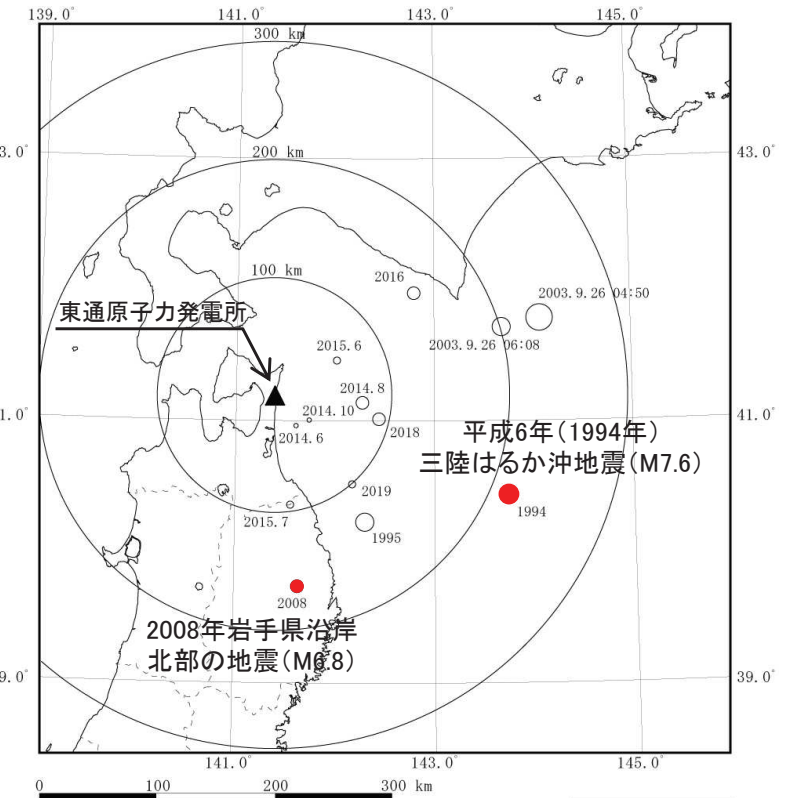


NS成分

EW成分

UD成分

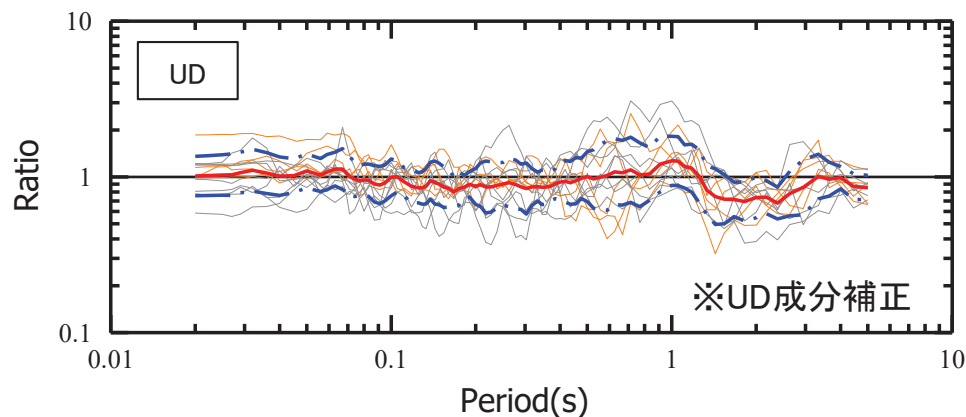
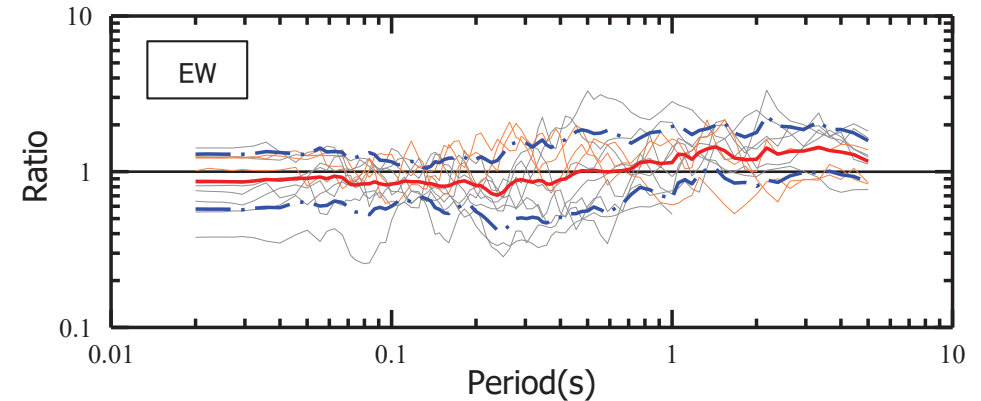
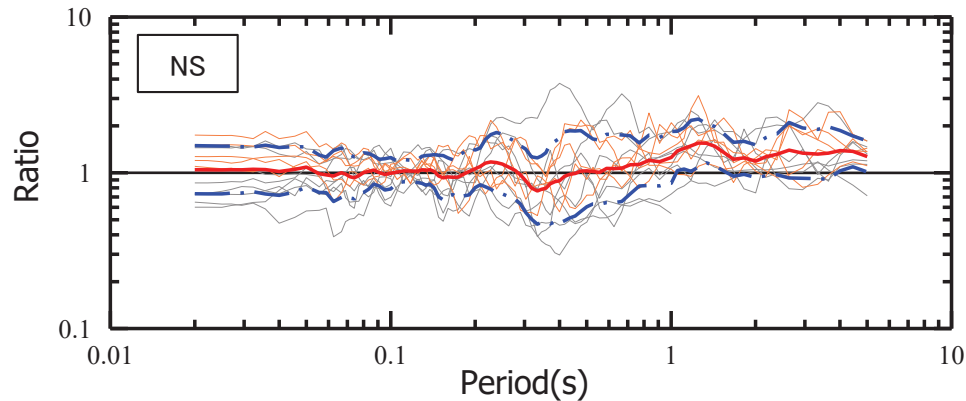
2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)(海洋プレート内地震)



— 東通原子力発電所
— 白糠地点

3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較 (4) 応答スペクトル比(東通地点/白糠地点)

- 東通原子力発電所及び白糠地点の検討対象とした全ての地震の観測記録の応答スペクトル比を示す。
- 応答スペクトル比の平均は成分によらず全周期帯域で約1倍であり、両者はほぼ同じ振動特性の傾向を示す。
- 地震規模が大きい地震(上位5地震)の応答スペクトル比に着目してみると、地震規模が小さい地震と比べてばらつきが小さい。
- 一方、一部周期帯で応答スペクトル比が大きい地震があることから詳細な確認を行う。

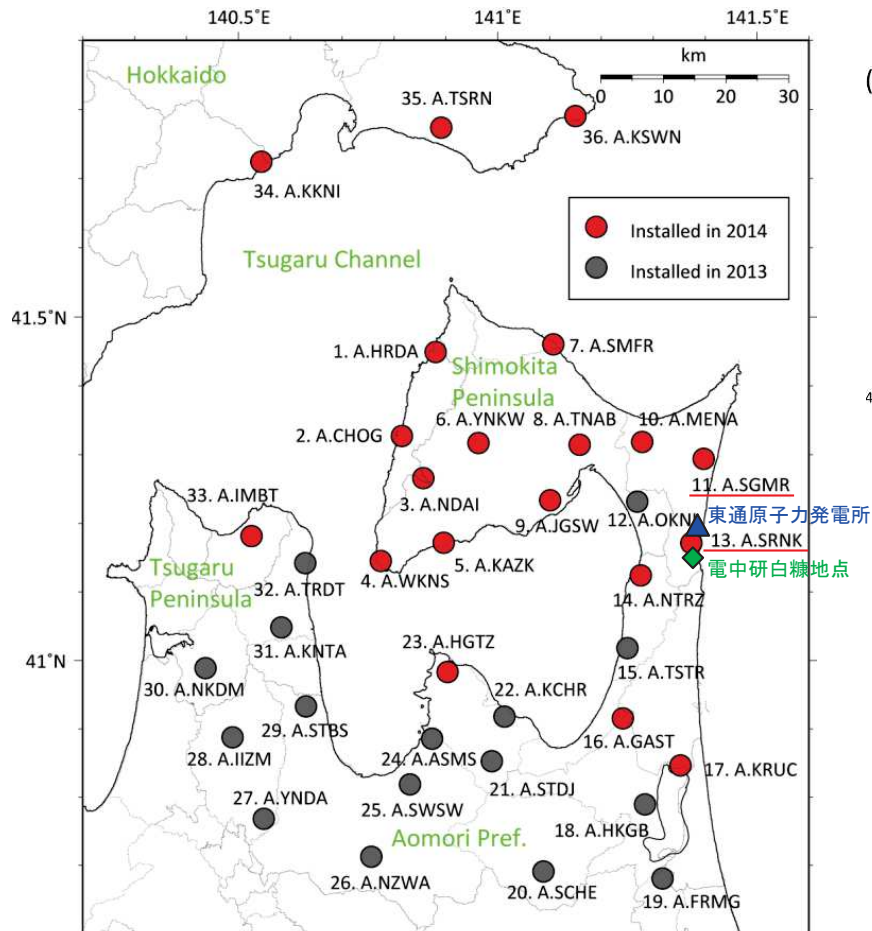


- 地震毎の応答スペクトル比の平均
- - - 地震毎の応答スペクトル比の平均±標準偏差
- 地震毎の応答スペクトル比(地震規模が大きい上位5地震)
- 地震毎の応答スペクトル比(その他8地震)

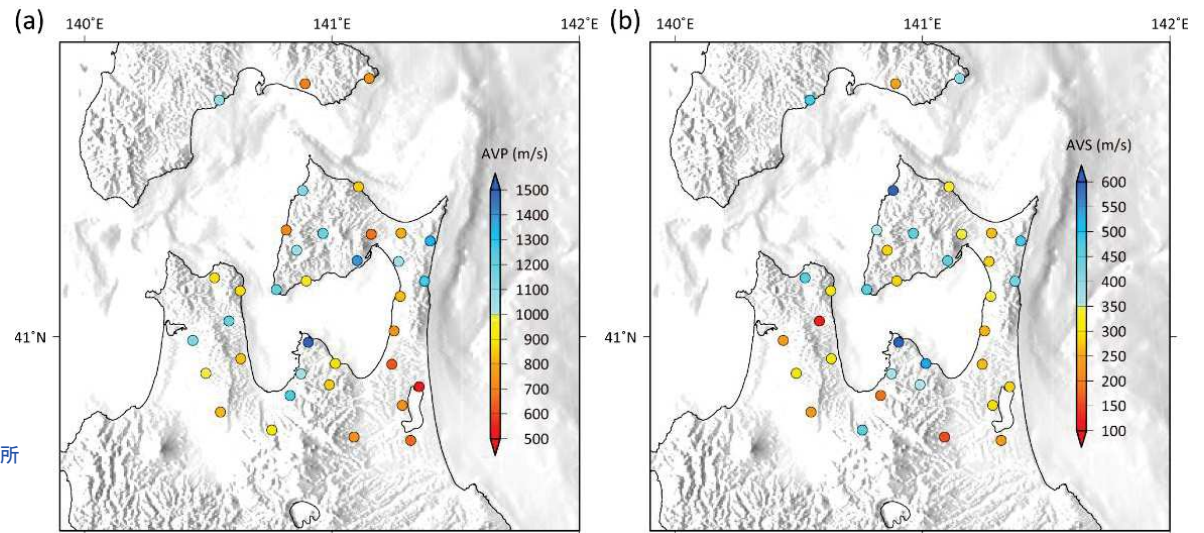
自由地盤観測点と電中研白糠との応答スペクトル比
自由地盤の岩盤上部地震観測点(T.P.+2.0m)/電中研白糠

3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較 (5) As-netの地震観測記録を用いた確認

- 応答スペクトル比(東通地点/白糠地点)の一部周期帯で比較的差が見られる地震について、敷地周辺で実施されている他の観測点の強震記録との比較を行う。
- 公益財団法人 地震予知総合研究振興会では、2013年から2014年にかけて、下北半島及び津軽半島周辺に高密度の高感度地震観測網(As-net)を順次設置している。このうち東通原子力発電所に比較的近いA.SGMR(敷地から北に約12km)及びA.SRNK(敷地から南に約2km)と比較する。なお、地震計の設置深さは約20mであり、深さ20mの平均S波速度は、A.SGMRは478m/s、A.SRNKは423m/sである[Noguchi et al.(2017)]。



As-netの配置 (Noguchi et al.(2017))に加筆



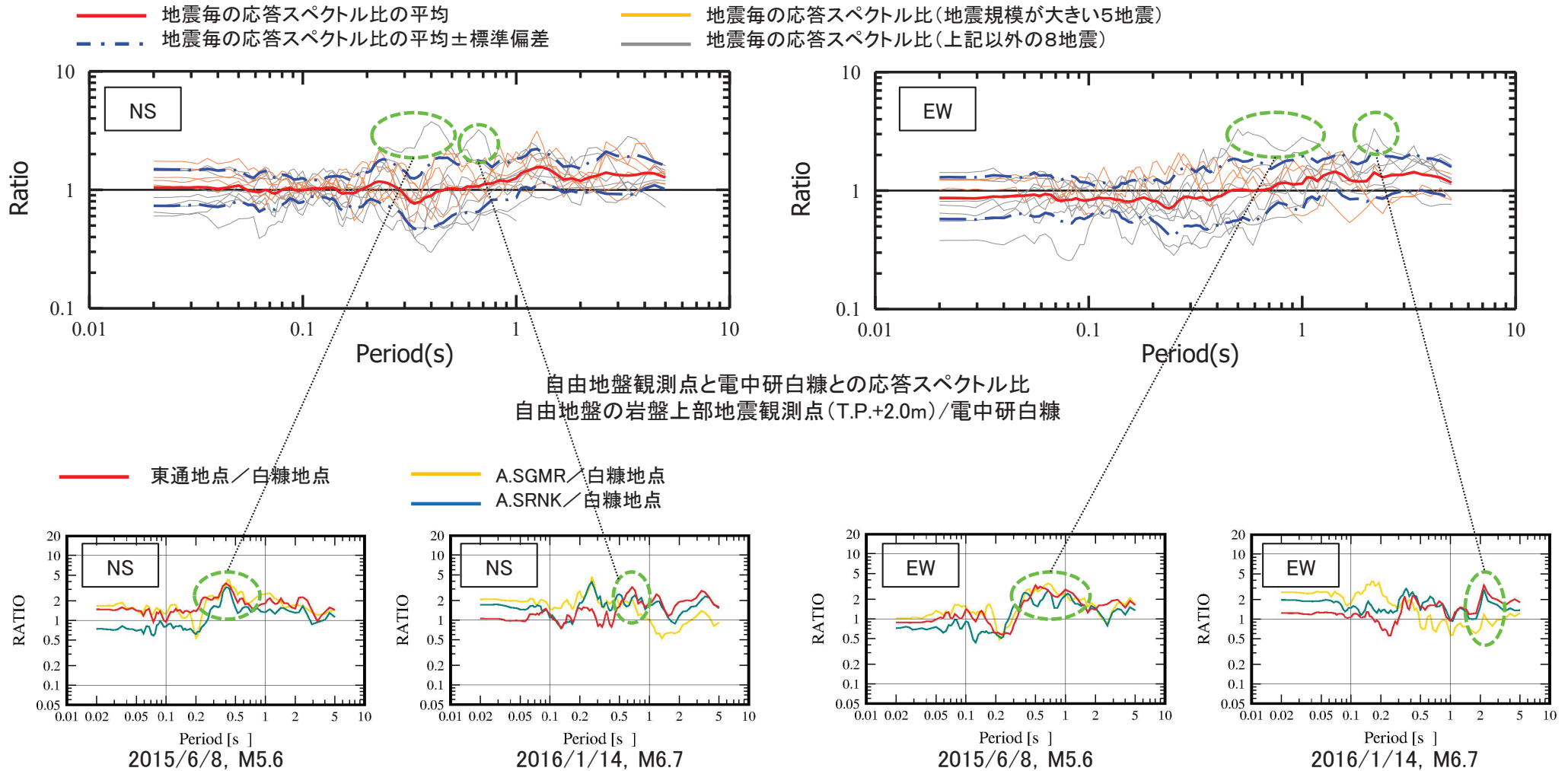
Noguchi et al.(2017)より抜粋

As-net観測点の平均Vp (a)及びVs (b)

3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較

(6) 応答スペクトル比(東通地点, As-net/白糠地点)

- 一部周期帯において応答スペクトル比が大きい地震(東通地点 > 白糠地点)のうち, As-net観測点(A.SGMR, A.SRNK)で観測されている地震について, 白糠地点に対する応答スペクトル比を示す。
- これらの地震の応答スペクトル比で比較的差が見られる周期帯は, As-net観測点においても同様に認められることから, 敷地の振動特性は周囲の観測点と著しく異なるものではないと考えられる。



3.7 露頭岩盤上強震観測点(電中研白糠)との比較

(7)まとめ

- 東通原子力発電所と、より硬質な岩盤の電力中央研究所露頭岩盤上強震観測網(RK-net)白糠地点の地震観測記録の比較を行い、両者の振動特性について検討を行った。
 - ① 敷地自由地盤と電力中央研究所露頭岩盤上強震観測網(RK-net)白糠地点の応答スペクトル比の平均は、成分によらず全周期帯域で約1倍であり、両者はほぼ同じ振動特性の傾向を示す。
 - ② さらに、地震規模が比較的大きな地震については、地震規模が小さな地震に比べてばらつきが小さい傾向がある。
- 敷地自由地盤と電中研白糠地点の比較で、一部周期帯において比較的差が見られる地震についても、敷地周辺のAs-net観測点で同様の傾向が見られ、敷地の振動特性は周囲と比べて著しく異なるものではないと考えられる。

以上の検討結果からも、当該自由地盤(T.P.+2.0m)の振動特性は一般的な岩盤における振動特性と同等であると判断される。

3.8 まとめ

- 敷地には、新第三系の岩盤が相当な広がりをも有して分布し、速度構造は概ね水平な成層構造で、著しい高低差は認められない。解放基盤表面は、著しい風化が認められず V_s が約0.7km/s以上の岩盤である原子炉建屋設置レベル(T.P.-16.3m, PS検層による V_s 約1.4km/s)に設定する。
- 原子炉建屋直下と自由地盤の水平アレイ観測から、自由地盤の岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の揺れは解放基盤表面と同等以上であり、解放基盤表面の振動特性は自由地盤の岩盤上部の地震観測点で代表する。
- 敷地で実施している地震観測や臨時地震観測、及び敷地周辺の地震観測の記録を用いた検討から、自由地盤の地震観測点(T.P.+2.0m)の振動特性は一般的な岩盤における振動特性と同等であり、また、地下構造には振動特性に影響を与えるような著しい不均質性はないと判断される。

以上の検討結果から、解放基盤表面の地震動評価に用いる地盤モデルについては一次元地盤モデルを適用する。

4. 地盤モデルの設定

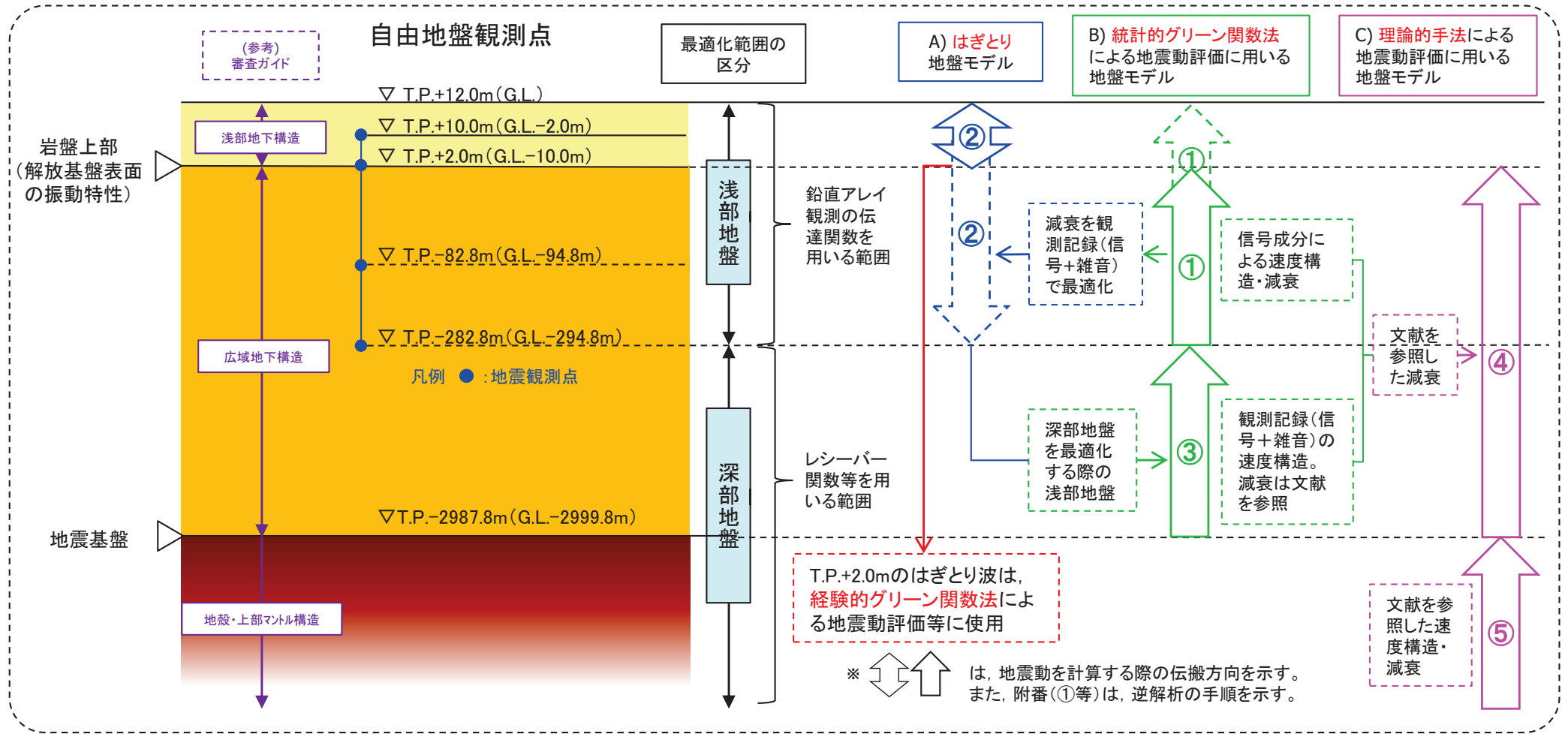
- 4. 1 設定概要
- 4. 2 浅部地盤モデルの作成
- 4. 3 深部地盤モデルの作成
- 4. 4 地震動評価用地盤モデルの設定

4.1 設定概要

(1) 地盤モデルの設定概要

S168

- 敷地地盤の地下構造は水平成層構造とみなして評価できることから、地震動評価にあたっては一次元地盤モデルを設定する。
- 地盤モデルの速度構造は、地震観測記録を用いた逆解析により決定する。逆解析は、鉛直アレイ観測の伝達関数を用いるT.P.-282.8m以浅の「**浅部地盤**」と、レーザー関数等を用いるT.P.-282.8m以深の「**深部地盤**」とに区分して行う。地盤減衰については、使用する地盤モデルの目的に応じ、地震観測記録を用いた逆解析結果もしくは文献に基づいた値を採用する。
- 地盤モデルの範囲は以下とする。
 - A) はぎとり地盤モデル 地表 ~ 最深部の地震観測点 (T.P.+12.0m~T.P.-282.8m)
 - B) 統計的グリーン関数法による地震動評価に用いる地盤モデル 自由地盤岩盤上部の地震観測点 ~ 地震基盤 (T.P.+2.0m~T.P.-2987.8m)
 - C) 理論的手法による地震動評価に用いる地盤モデル 解放基盤表面 ~ 地殻・上部マントル (T.P.+2.0m~T.P.-25000m以深)



4.1 設定概要

(2) 地盤モデルの最適化

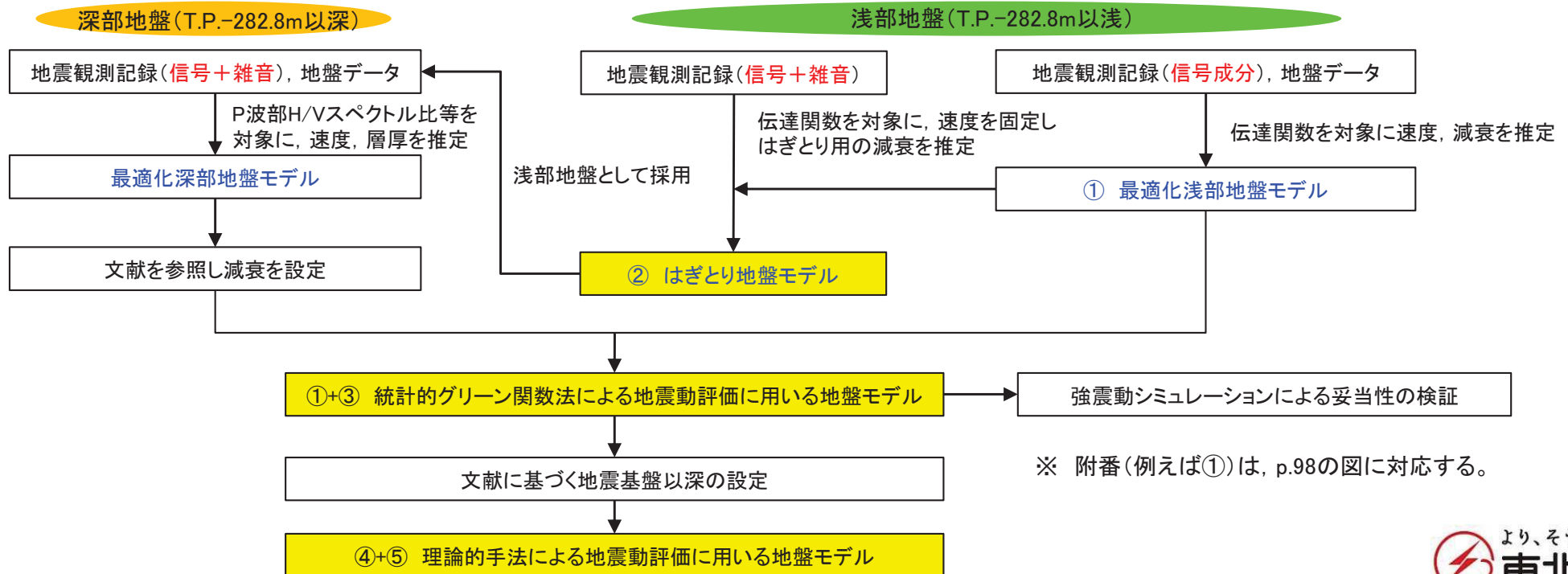
S168

【浅部地盤(T.P.-282.8m以浅)】

- ▶ 浅部地盤のパラメータ(速度構造, 地盤減衰)は, 自由地盤観測点の地震観測記録の伝達関数を対象とした逆解析により推定する。
- ▶ 地震観測記録には, 地震観測点間でコヒーレントな信号成分とインコヒーレントな雑音成分が含まれるため, 統計的グリーン関数法による地震動評価に用いる地盤モデルのうち地震計が設置されている浅部地盤の速度構造と地盤減衰については, 信号成分による伝達関数を対象とした逆解析により算定する(最適化浅部地盤モデル)。信号成分の算定方法は池浦(2009)による。
- ▶ 一方, はざとり波は, はざとる観測点より浅い部分の減衰を大きく評価した地盤モデルの方が算定結果は保守的となるため, はざとり用の地盤減衰はインコヒーレントな成分も含めた地震観測記録(信号成分+雑音成分)の伝達関数に対し逆解析を行った値を採用する(はざとり地盤モデル)。

【深部地盤(T.P.-282.8m以深)】

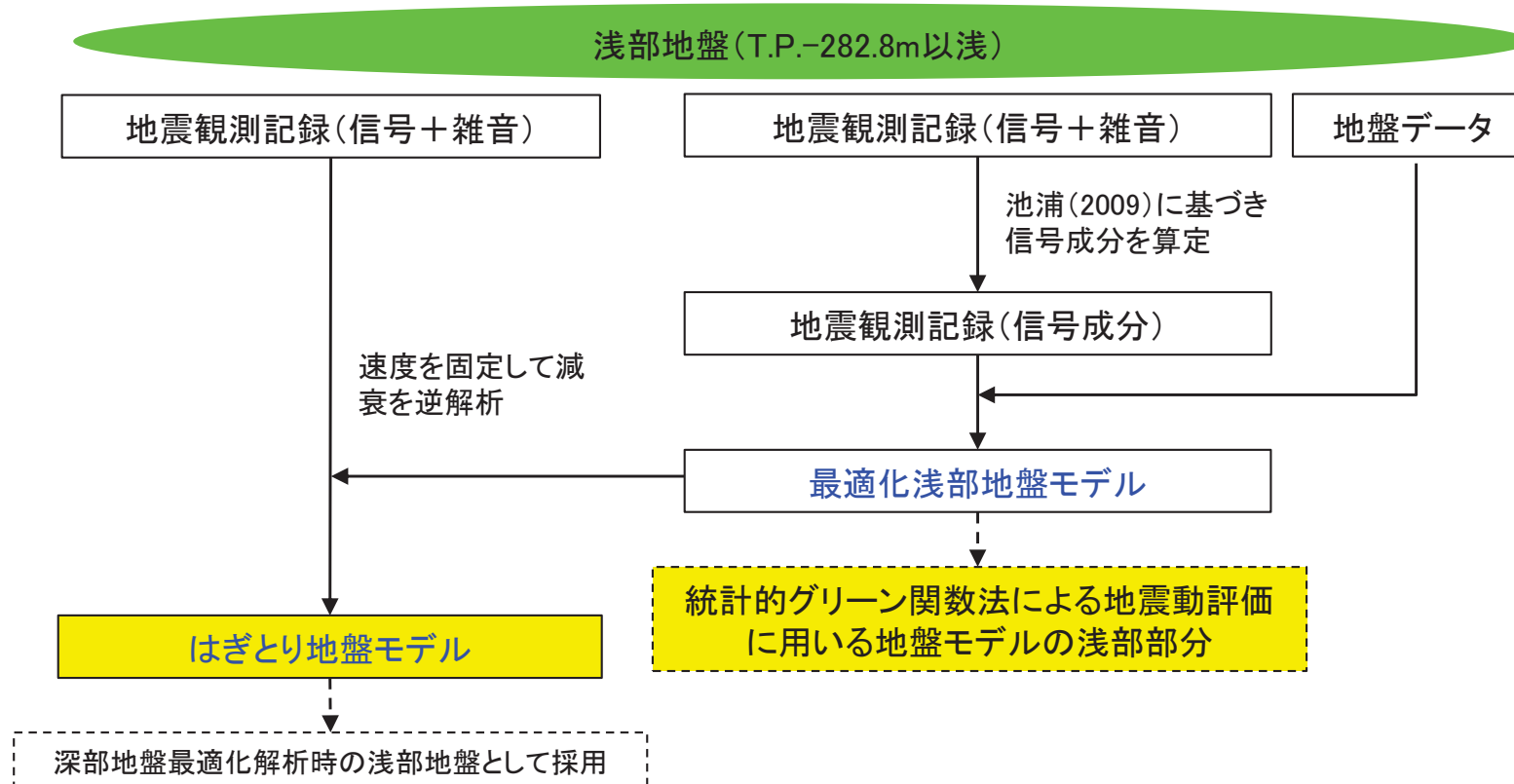
- ▶ 深部地盤のパラメータ(層厚, 速度構造)は, 自由地盤観測点の地震観測記録のP波部H/Vスペクトル比, レシーバー関数及びコーダ部H/Vスペクトル比を対象とした逆解析により推定する(最適化深部地盤モデル)。逆解析手法は梅田・小林(2010)による。
- ▶ P波部H/Vスペクトル比等には雑音成分が含まれているため, 浅部地盤には, はざとり地盤モデルを採用する。減衰については, これとは別に文献で示されている値を踏まえて決定する(統計的グリーン関数法による地震動評価に用いる地盤モデル)。



4.2 浅部地盤モデルの作成

(1) 浅部地盤モデルの最適化

- 自由地盤観測点の地震観測記録(S波部Transverse成分及びP波部UD成分)の伝達関数を対象とした逆解析により物性値を推定する。
- 統計的グリーン関数法による地震動評価に用いる地盤モデルについては、次元元とすることから、散乱等によるインコヒーレントな影響を避けるため、雑音成分を含まない信号成分の伝達関数を対象とした逆解析により推定した物性値を採用する(最適化浅部地盤モデル)。信号成分は池浦(2009)に基づき算定する。(参考1参照)
- はぎとり地盤モデルについては、地震観測記録自体に雑音成分が含まれていることから、最適化浅部地盤モデルの速度を固定し、地震観測記録(信号+雑音)の伝達関数を対象とした逆解析により算定した減衰を採用する(はぎとり地盤モデル)。
- 逆解析手法は、遺伝的アルゴリズムを採用。
- なお、はぎとり地盤モデルは、深部地盤の最適化に用いる浅部地盤として使用する。



4.2 浅部地盤モデルの作成

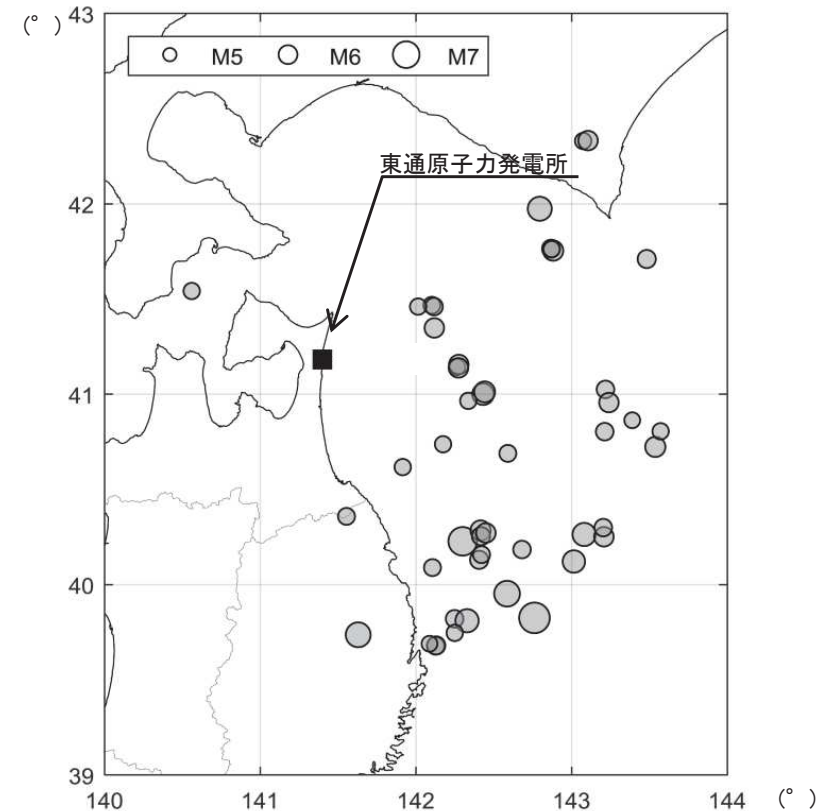
(2) 伝達関数の算定に用いた観測記録

➤ 信号のS/N比を十分に確保するために、M5以上の地震規模の大きい49地震を選定した。

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 東経 | | 北緯 | | M | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|--------------|--------------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | |
| 1994 | 12 | 29 | 5 | 52 | 143 | 1.2 | 40 | 7 | 6.5 | 0 | 182 |
| 1994 | 12 | 30 | 0 | 29 | 142 | 10.8 | 40 | 44 | 5.6 | 53 | 84 |
| 1994 | 12 | 31 | 22 | 50 | 142 | 41.2 | 40 | 10.8 | 5.8 | 24 | 157 |
| 1995 | 1 | 7 | 7 | 37 | 142 | 18.33 | 40 | 13.4 | 7.2 | 48 | 132 |
| 1995 | 1 | 7 | 11 | 36 | 142 | 25.28 | 40 | 16.81 | 6.2 | 38 | 133 |
| 1995 | 2 | 6 | 22 | 51 | 142 | 16.12 | 41 | 8.36 | 5.6 | 56 | 74 |
| 1995 | 9 | 26 | 16 | 14 | 143 | 29.27 | 41 | 42.38 | 5.9 | 38 | 185 |
| 1995 | 12 | 30 | 21 | 17 | 143 | 32.58 | 40 | 43.13 | 6.2 | 0 | 189 |
| 1995 | 12 | 31 | 5 | 45 | 143 | 34.59 | 40 | 48.05 | 5.6 | 3 | 189 |
| 1997 | 2 | 20 | 16 | 55 | 142 | 52.45 | 41 | 45.57 | 5.9 | 49 | 139 |
| 1999 | 3 | 19 | 2 | 55 | 143 | 13.39 | 41 | 1.25 | 5.8 | 29 | 155 |
| 2001 | 4 | 3 | 4 | 54 | 141 | 55.27 | 40 | 36.78 | 5.6 | 63 | 78 |
| 2001 | 8 | 14 | 5 | 11 | 142 | 26.19 | 40 | 59.73 | 6.4 | 38 | 90 |
| 2002 | 10 | 14 | 23 | 12 | 142 | 16.85 | 41 | 9.11 | 6.1 | 53 | 75 |
| 2003 | 4 | 17 | 2 | 59 | 142 | 20.51 | 40 | 57.64 | 5.6 | 40 | 84 |
| 2004 | 7 | 21 | 9 | 11 | 143 | 23.68 | 40 | 51.54 | 5.5 | 37 | 173 |
| 2004 | 8 | 10 | 15 | 13 | 142 | 7.93 | 39 | 40.44 | 5.8 | 48 | 180 |
| 2004 | 11 | 27 | 7 | 42 | 143 | 4.81 | 42 | 19.55 | 5.6 | 51 | 189 |
| 2005 | 2 | 26 | 21 | 37 | 142 | 35.77 | 40 | 41.12 | 5.7 | 45 | 116 |
| 2008 | 4 | 29 | 14 | 26 | 142 | 6.5 | 41 | 27.78 | 5.7 | 62 | 67 |
| 2008 | 7 | 24 | 0 | 26 | 141 | 38.12 | 39 | 43.92 | 6.8 | 108 | 163 |
| 2008 | 9 | 22 | 16 | 31 | 140 | 33.93 | 41 | 32.28 | 5.6 | 152 | 79 |
| 2009 | 2 | 15 | 18 | 24 | 142 | 25.41 | 40 | 15.01 | 5.9 | 36 | 136 |
| 2010 | 9 | 13 | 14 | 47 | 142 | 7.31 | 41 | 27.36 | 5.8 | 63 | 68 |
| 2010 | 12 | 6 | 16 | 30 | 143 | 13.1 | 40 | 47.95 | 5.8 | 7 | 160 |
| 2011 | 3 | 11 | 15 | 8 | 142 | 46.01 | 39 | 49.24 | 7.4 | 32 | 192 |
| 2011 | 3 | 17 | 13 | 13 | 142 | 24.69 | 40 | 7.58 | 5.9 | 31 | 146 |
| 2011 | 6 | 23 | 6 | 50 | 142 | 35.45 | 39 | 56.87 | 6.9 | 36 | 171 |
| 2011 | 8 | 1 | 22 | 44 | 142 | 15.21 | 39 | 48.96 | 5.8 | 43 | 169 |
| 2011 | 9 | 17 | 4 | 26 | 143 | 5.17 | 40 | 15.55 | 6.6 | 7 | 177 |
| 2011 | 9 | 17 | 6 | 8 | 143 | 12.77 | 40 | 14.84 | 6.1 | 4 | 186 |
| 2011 | 9 | 17 | 16 | 33 | 143 | 0.18 | 40 | 14.98 | 5.5 | 14 | 172 |
| 2011 | 11 | 24 | 19 | 25 | 142 | 53.24 | 41 | 45.02 | 6.2 | 43 | 140 |
| 2012 | 1 | 28 | 9 | 22 | 142 | 25.61 | 40 | 9.19 | 5.7 | 36 | 145 |
| 2012 | 3 | 27 | 20 | 0 | 142 | 20.03 | 39 | 48.38 | 6.6 | 21 | 173 |
| 2012 | 4 | 30 | 0 | 2 | 142 | 15.3 | 39 | 44.53 | 5.6 | 23 | 177 |
| 2012 | 5 | 24 | 0 | 2 | 142 | 7.42 | 41 | 20.62 | 6.1 | 60 | 64 |
| 2012 | 8 | 25 | 23 | 16 | 143 | 6.64 | 42 | 19.67 | 6.1 | 49 | 191 |
| 2014 | 7 | 5 | 7 | 42 | 142 | 8.16 | 39 | 40.55 | 5.9 | 49 | 179 |
| 2014 | 8 | 10 | 12 | 43 | 142 | 16.74 | 41 | 8.04 | 6.1 | 51 | 75 |
| 2014 | 10 | 11 | 11 | 35 | 143 | 14.68 | 40 | 57.13 | 6.1 | 36 | 158 |

つづく

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 東経 | | 北緯 | | M | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|--------------|--------------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | |
| 2015 | 2 | 17 | 13 | 46 | 142 | 6.72 | 40 | 5.12 | 5.7 | 50 | 137 |
| 2015 | 6 | 8 | 15 | 1 | 142 | 1.19 | 41 | 27.35 | 5.6 | 66 | 61 |
| 2015 | 7 | 10 | 3 | 32 | 141 | 33.59 | 40 | 21.24 | 5.7 | 88 | 94 |
| 2016 | 1 | 14 | 12 | 25 | 142 | 48.07 | 41 | 58.21 | 6.7 | 52 | 146 |
| 2017 | 9 | 10 | 17 | 44 | 142 | 52.67 | 41 | 45.55 | 5.6 | 43 | 139 |
| 2017 | 9 | 27 | 5 | 22 | 142 | 27.32 | 40 | 16 | 6.1 | 35 | 136 |
| 2017 | 12 | 16 | 2 | 58 | 142 | 5.69 | 39 | 41.17 | 5.5 | 52 | 177 |
| 2018 | 1 | 24 | 19 | 51 | 142 | 26.88 | 41 | 0.58 | 6.3 | 34 | 91 |

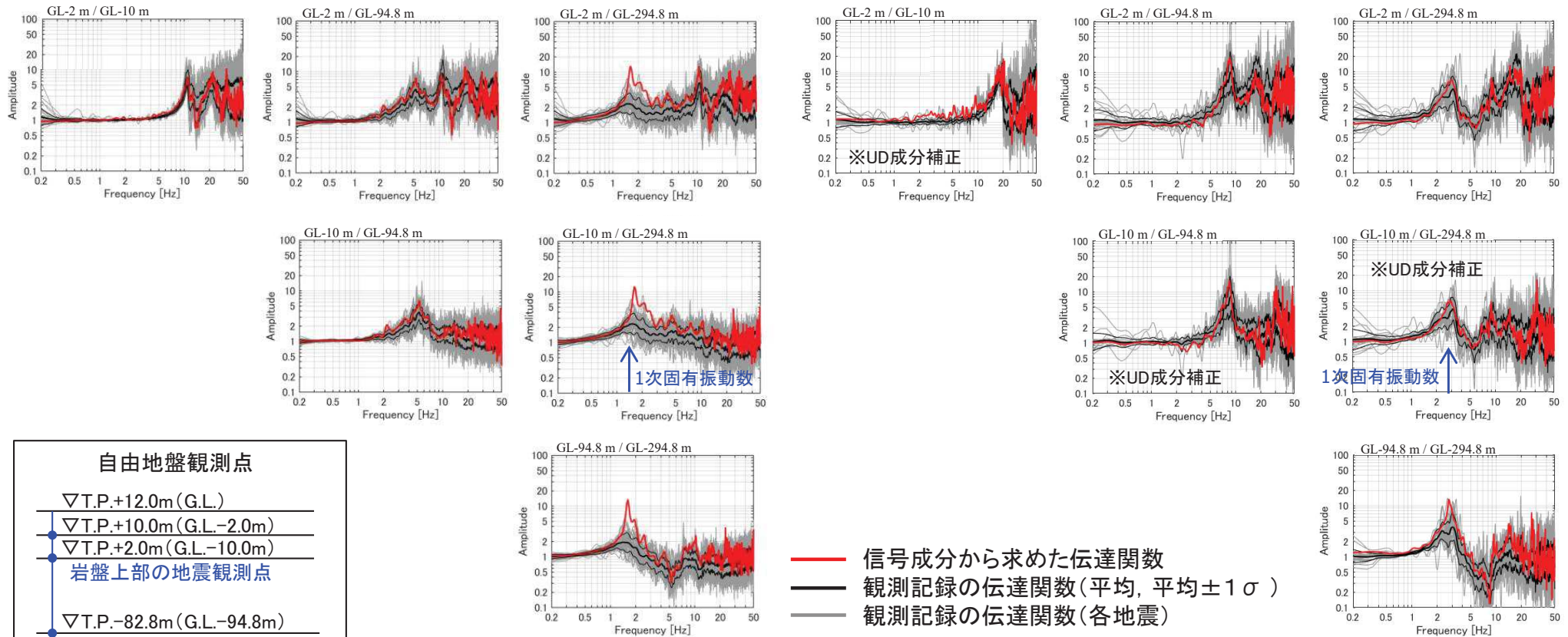


震央分布

4.2 浅部地盤モデルの作成

(3) 信号成分から求めた伝達関数と観測記録の伝達関数の比較

- 信号成分から求めた伝達関数は、相対的にインコヒーレントな成分が多い観測点間では、観測記録(信号+雑音)から求めた伝達関数に比べて固有振動数のピークが高くなるが、東通原子力発電所の場合、最深観測点(T.P.-282.8m)が入力となる伝達関数における1次固有振動数で特にその傾向が顕著で、観測記録(信号+雑音)の伝達関数の1σよりも大きいものとなっている。なお、インコヒーレンス成分としては散乱波の影響が考えられる。
- 最深部の地震観測点(T.P.-282.8m)と岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の地盤の1次固有振動数は、水平成分1.4Hz(周期0.7秒)、鉛直成分2.5Hz(周期0.4秒)付近である(対応する応答スペクトル比をp.52及びp.53に記載)。



4.2 浅部地盤モデルの作成

(4) 浅部地盤モデル推定における探索範囲

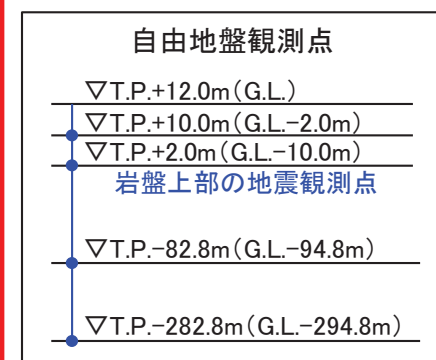
- 浅部地盤モデルでは、速度と減衰(Q値)を算定する。
- 層厚及び密度は、自由地盤観測点におけるPS検層結果及び地震計設置位置を踏まえ、固定値として設定。
- 速度の探索範囲は、自由地盤観測点におけるPS検層結果及び屈折波トモグラフィ解析によるP波速度分布に基づく炉心相当位置の速度(S波速度はポアソン比を用いてP波速度より算定。)を考慮して設定。

Q値モデル: $Q(f) = Q_0 f^n$

※PS検層結果及び屈折波トモグラフィ解析によるP波速度分布の詳細は、「補足説明資料4章」に示す。

| T.P. (m) | G.L. (m) | 層No. | 層厚 (m) | ρ (t/m ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Qs | | Qp | |
|-------------|-------------|------|-----------|-------------------------------|-------------|-------------|----------------|-------|----------------|-------|
| | | | | | | | Q ₀ | n | Q ₀ | n |
| 12 | 0 | 1 | 0.5 | 1.9 | 50~396 | 100~1248 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| 11.5 | -0.5 | 2 | 0.5 | 1.9 | 50~396 | 100~1248 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| 11 | -1 | 3 | 1 | 1.9 | 165~396 | 100~1248 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| 10 | -2 | 4 | 2 | 1.9 | | | | | | |
| 8 | -4 | 5 | 2 | 1.9 | 165~1793 | 520~3685 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| 6 | -6 | 6 | 3 | 1.9 | 165~1793 | 520~3685 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| 3 | -9 | 7 | 1 | 2.24 | 1298~1793 | 2248~3685 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| 2 | -10 | 8 | 9 | 2.24 | | | | | | |
| -7 | -19 | 9 | 55 | 2.24 | 1393~1877 | 2413~3685 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| -62 | -74 | 10 | 20.8 | 2.72 | 1645~2145 | 2849~4455 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| -82.8 | -94.8 | 11 | 23.2 | 2.72 | | | | | | |
| -106 | -118 | 12 | 60 | 2.3 | 1521~2080 | 2938~3641 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| -160 | -178 | 13 | 24 | 2.3 | 1206~2087 | 2322~3615 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| -190 | -202 | 14 | 62 | 2.3 | 1476~2106 | 2628~3648 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| -252 | -264 | 15 | 30.8 | 2.33 | 2090 | 3690 | 0.5~10 | 0.5~1 | 1~10 | 0.5~1 |
| -282.8 | -294.8 | 16 | ∞ | 2.33 | | | | | | |

▽岩盤上部の地震観測点
(解放基盤表面の振動特性)

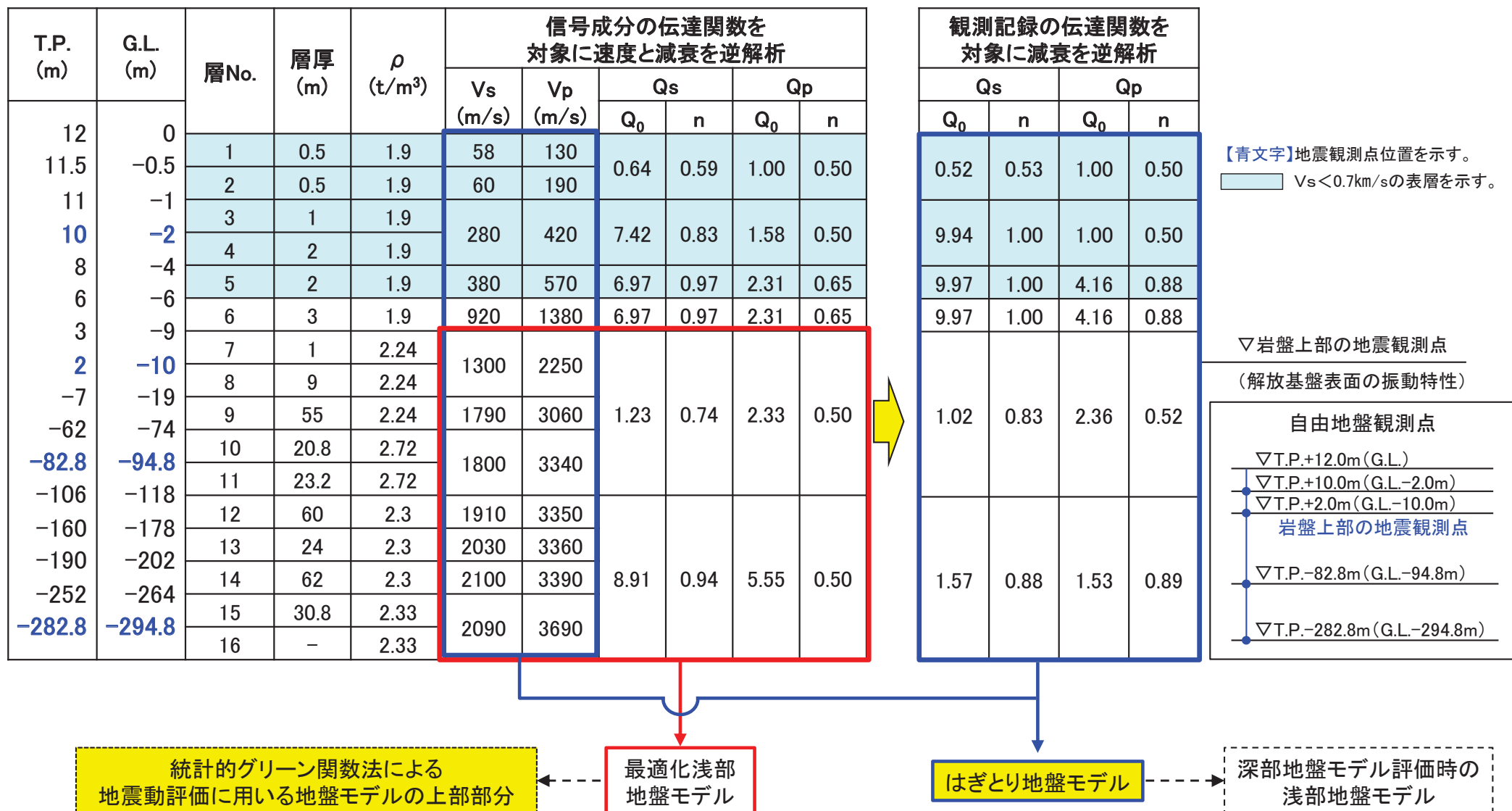


【青文字】:地震観測点位置を示す。 赤枠:探索範囲を示す。

4.2 浅部地盤モデルの作成

(5) 浅部地盤モデルの算定結果

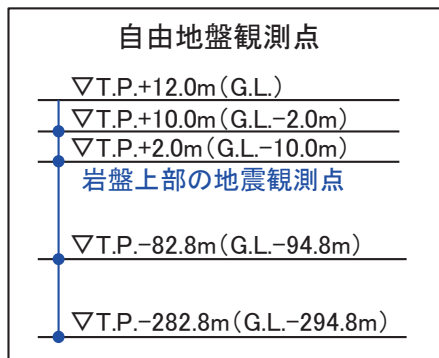
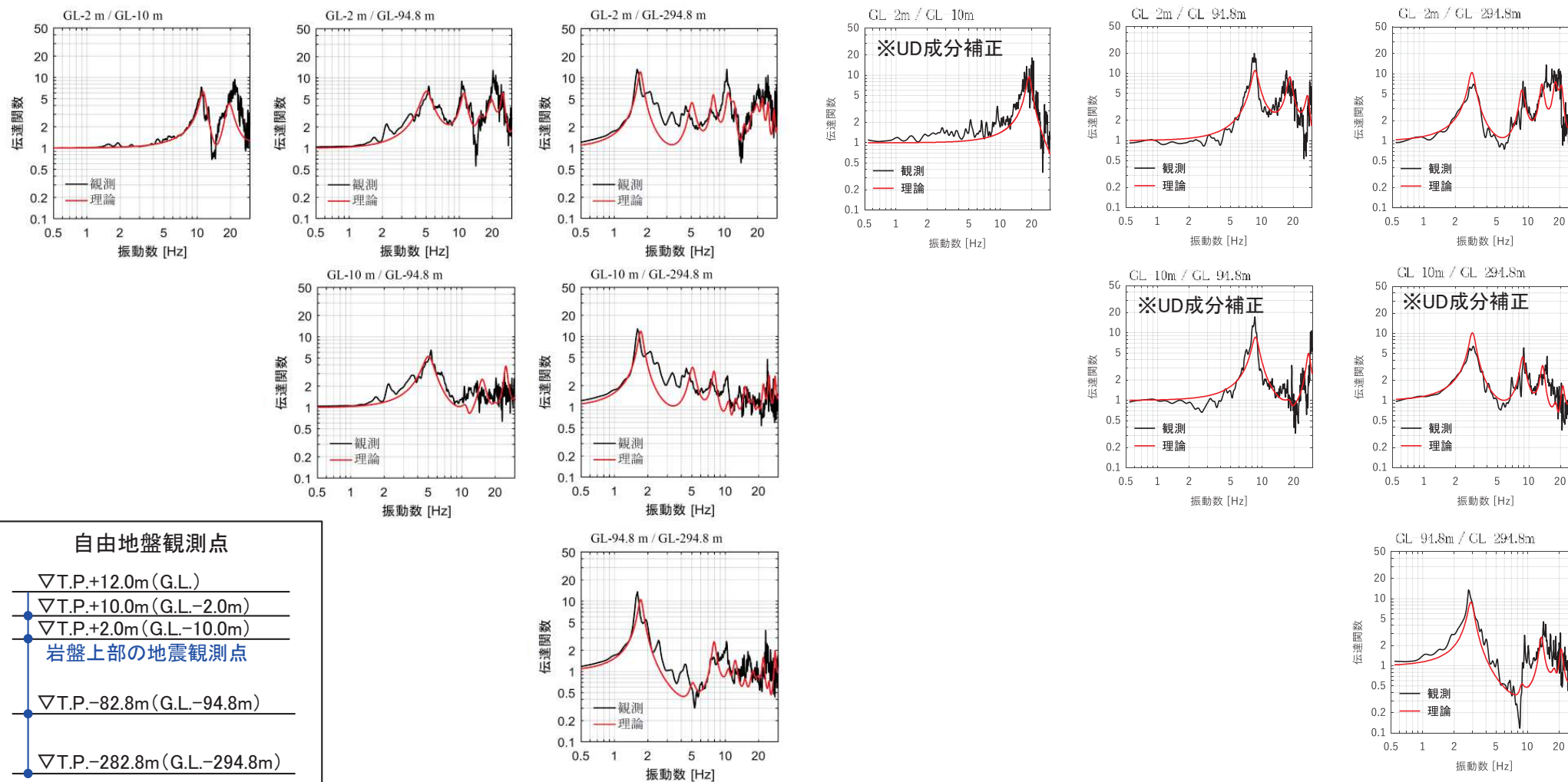
- 最適化浅部地盤モデルは、信号成分の伝達関数を対象とした逆解析により算定した物性値を採用する。
- はぎとり地盤モデルは、最適化浅部地盤モデルの速度を固定し、地震観測記録(信号+雑音)の伝達関数を対象とした逆解析により算定した減衰を採用する。



4.2 浅部地盤モデルの作成

(6) 信号成分から求めた伝達関数のフィッティング状況

➤ 最適化結果(理論値)は、信号成分から求めた伝達関数に対し、特に一次固有周期で良く再現できている。



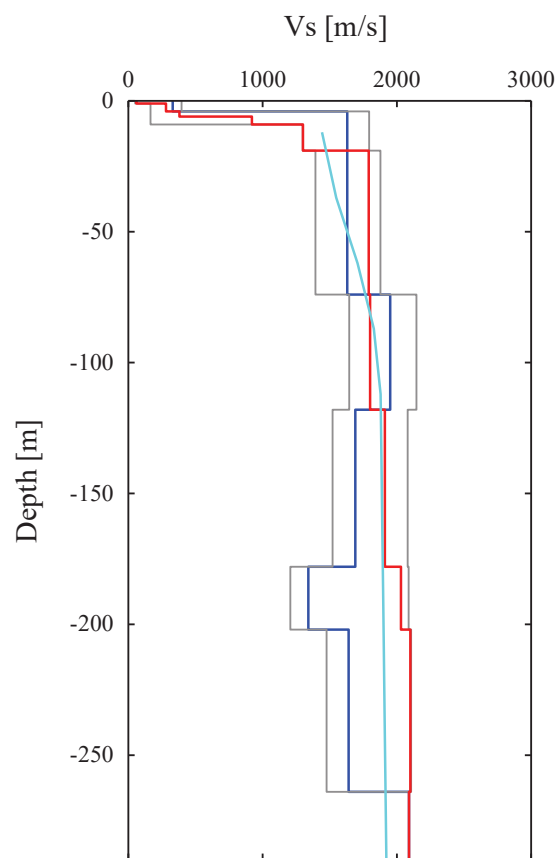
S波部Transverse成分

P波部UD成分

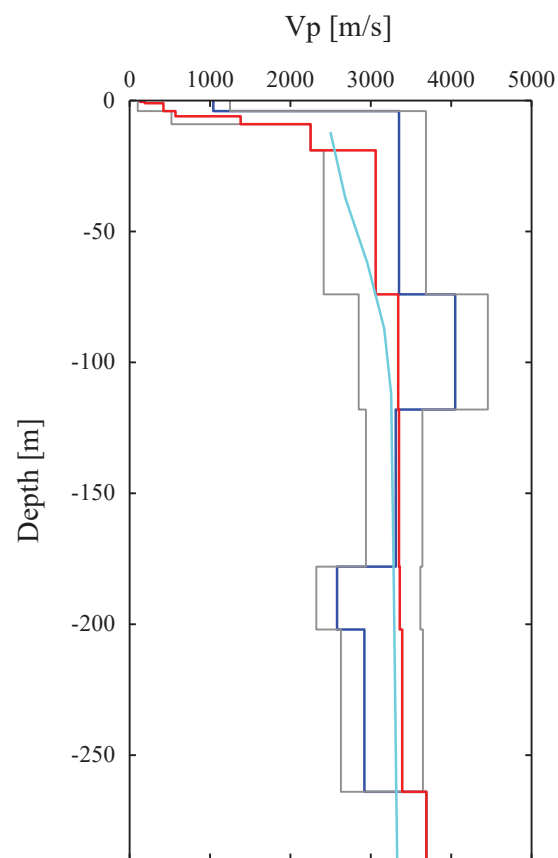
4.2 浅部地盤モデルの作成 (7) PS検層結果との比較

- 最適化した地盤モデルの速度構造は、自由地盤観測点におけるPS検層結果や屈折波トモグラフィ解析によるP波速度分布に基づく炉心相当位置の速度と概ね対応している。

- 最適化結果
- PS検層結果
- 屈折波トモグラフィ解析によるP波速度分布に基づく炉心相当位置の速度



《 推定された鉛直分布 Vs 》



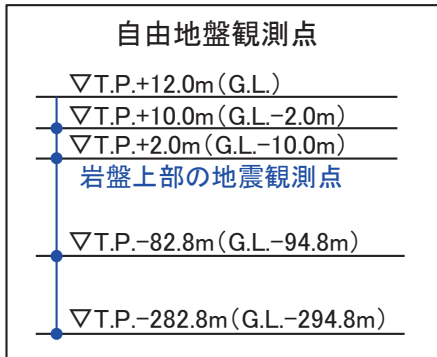
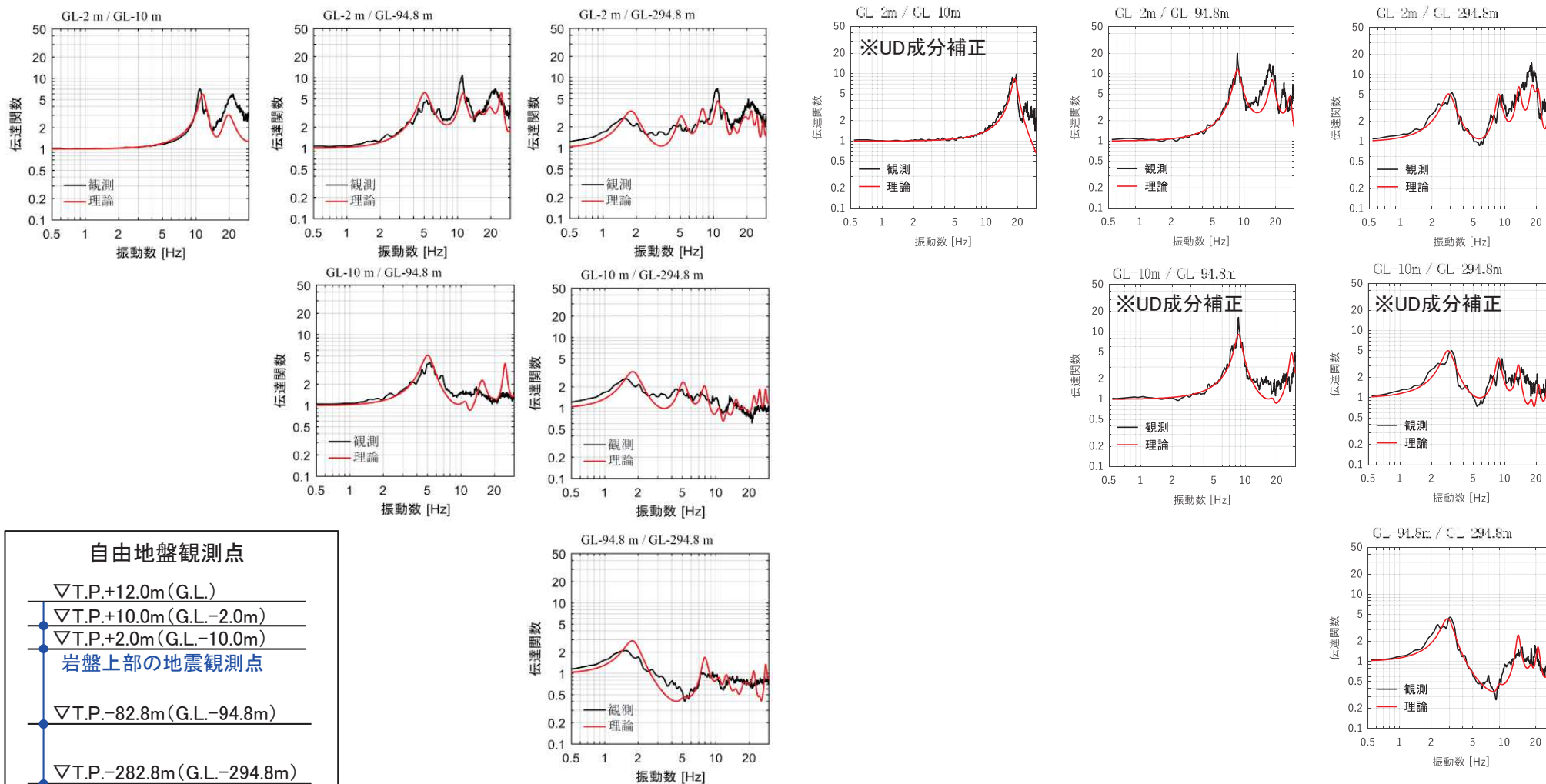
《 推定された鉛直分布 Vp 》

※参考として、探索範囲を灰色線で記載

4.2 浅部地盤モデルの作成

(8) 観測記録から求めた伝達関数のフィッティング状況

▶ 最適化結果(理論値)は、観測記録から求めた伝達関数に対し、特に一次固有周期で良く再現できている。



S波部Transverse成分

P波部UD成分

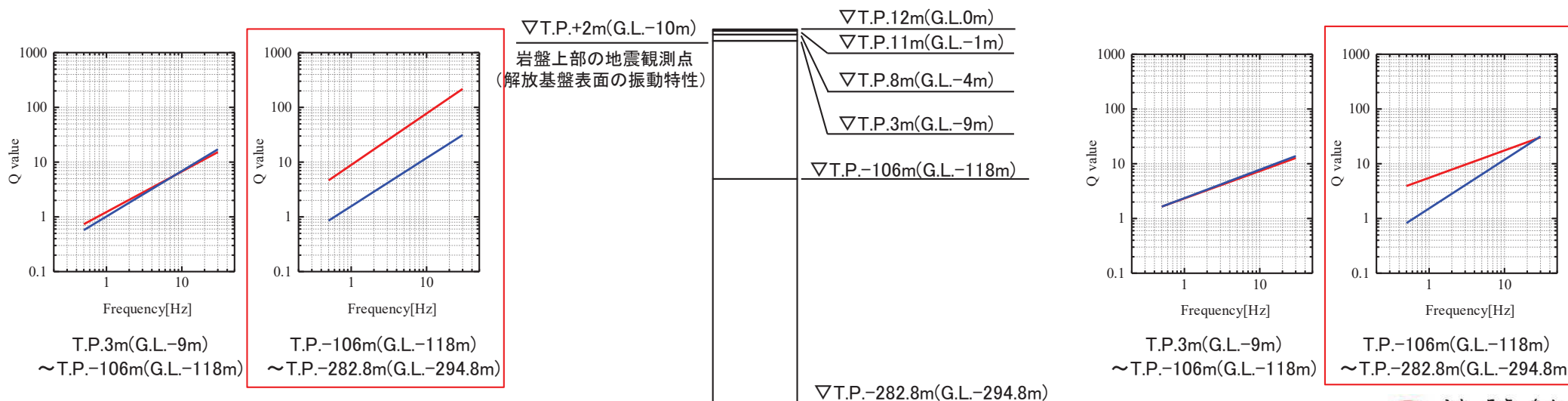
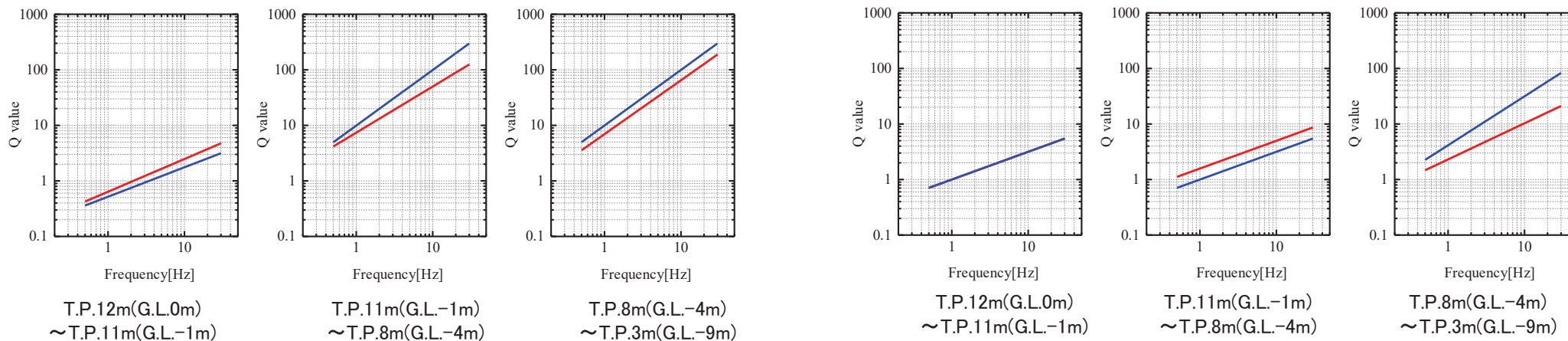
4.2 浅部地盤モデルの作成

(9) 推定された減衰(Q値)の比較

➤ T.P.-282.8m～T.P.-106.0mの水平動・鉛直動では観測点間距離が遠いためインコヒーレントな成分の影響が顕著になり、推定された減衰(Q値)も信号成分と観測記録(信号+雑音)では乖離しており、信号成分の Q_s 、 Q_p が大きい(減衰としては小さい)傾向にある。その他の観測点では、地震観測点間の距離も小さいため、ノイズの影響は小さく、Q値はほぼ同程度の値となっている。

— 最適化浅部地盤モデル(信号成分の伝達関数を対象とした逆解析により推定)

— はぎとり地盤モデル(信号成分の伝達関数を対象とした逆解析により推定した速度を固定し、観測記録の伝達関数を対象とした逆解析により減衰を推定)



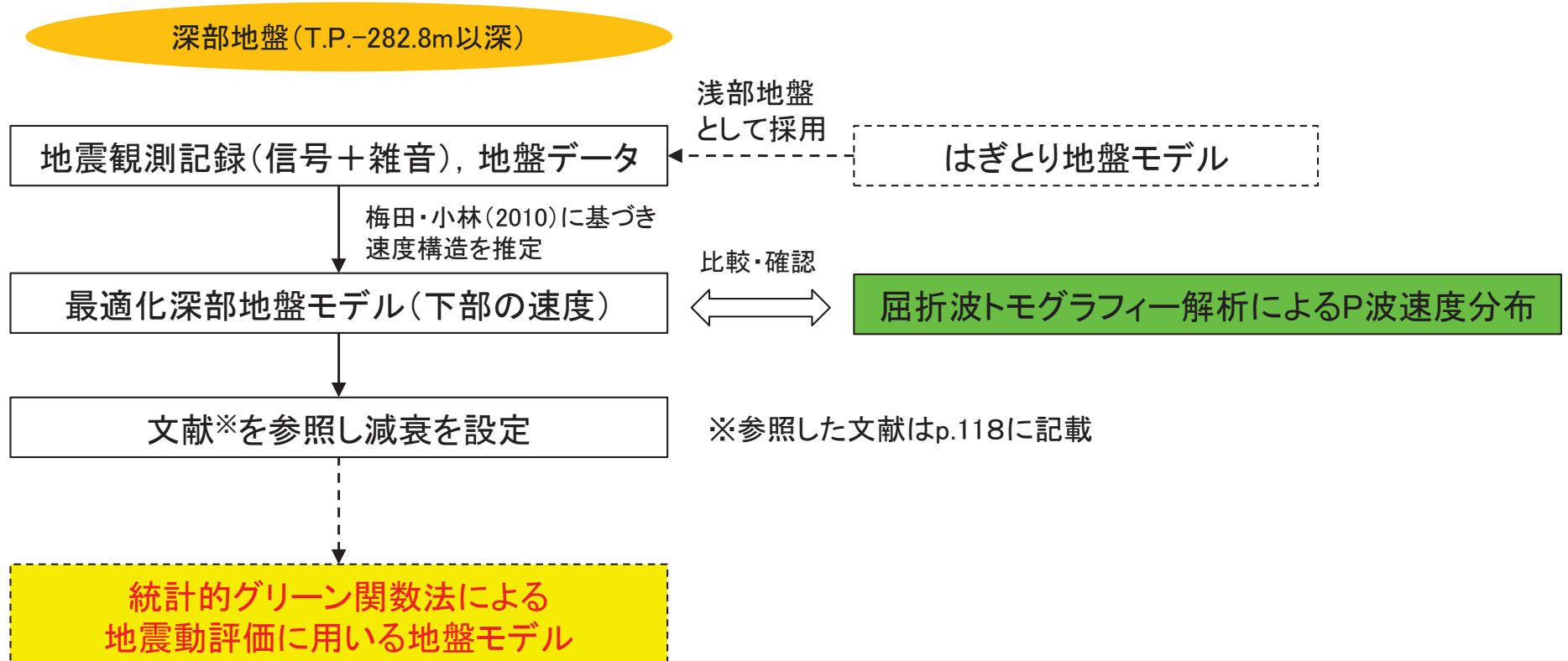
《推定された Q_s 》

《推定された Q_p 》

4.3 深部地盤モデルの作成

(1) 深部地盤モデルの評価フロー

- 梅田・小林(2010)に基づき、自由地盤観測点の地震観測記録のP波部H/Vスペクトル比、レシーバー関数及びコーダ部H/Vスペクトル比を対象とした逆解析により速度構造を算定する。また、得られた速度構造について、屈折波トモグラフィ解析によるP波速度分布に基づく炉心相当位置の速度との整合性を確認する。
- 逆解析手法は、遺伝的アルゴリズムを採用。
- P波部H/Vスペクトル比等には雑音成分が含まれているため、深部地盤の最適化に用いる浅部地盤は、はぎとり地盤モデルを採用する。
- 統計的グリーン関数法に用いる地盤モデルは、速度構造については最適化結果を採用する。一方、減衰(Q値)については文献を参照し設定する。



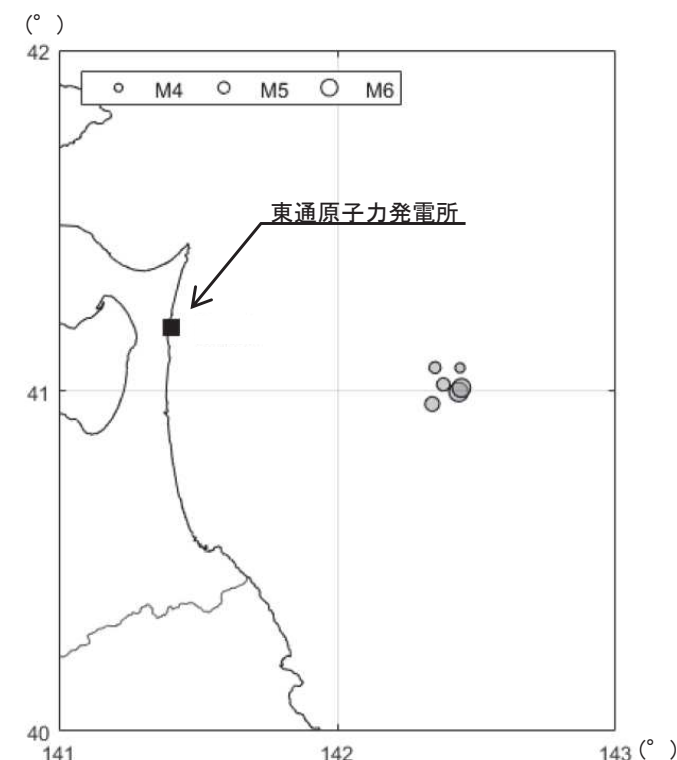
4.3 深部地盤モデルの作成

(2) P波部H/Vスペクトル比及びレシーバー関数の評価に用いた地震

- 入射角が同じ地震発生域の地震として6地震を選定。
- 解析区間は、P波初動到達1秒前から5秒間を基本として調整。
- P波部H/Vスペクトル比は、ラジアル成分と上下成分のフーリエスペクトルを0.2Hz幅のParzenウィンドウで平滑後に計算。
- レシーバー関数は、1～4Hzのバンドパスフィルタ処理後に計算。

地盤モデルの検討に用いた地震

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 東経 | | 北緯 | | M | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) | 見かけ入射角 (°) |
|------|---|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|--------------|--------------|---------------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | |
| 2001 | 8 | 14 | 5 | 11 | 142 | 26.19 | 40 | 59.73 | 6.4 | 38 | 90 | 67 |
| 2001 | 8 | 24 | 18 | 48 | 142 | 22.89 | 41 | 1.06 | 5.3 | 41 | 85 | 64 |
| 2003 | 1 | 6 | 13 | 42 | 142 | 21.13 | 41 | 4.05 | 5.0 | 45 | 82 | 61 |
| 2003 | 4 | 17 | 2 | 59 | 142 | 20.51 | 40 | 57.64 | 5.6 | 40 | 84 | 64 |
| 2017 | 1 | 22 | 3 | 11 | 142 | 26.5 | 41 | 4.0 | 4.5 | 37 | 89 | 67 |
| 2018 | 1 | 24 | 19 | 51 | 142 | 26.8 | 41 | 0.5 | 6.3 | 34 | 91 | 69 |



検討に用いた地震の震央分布

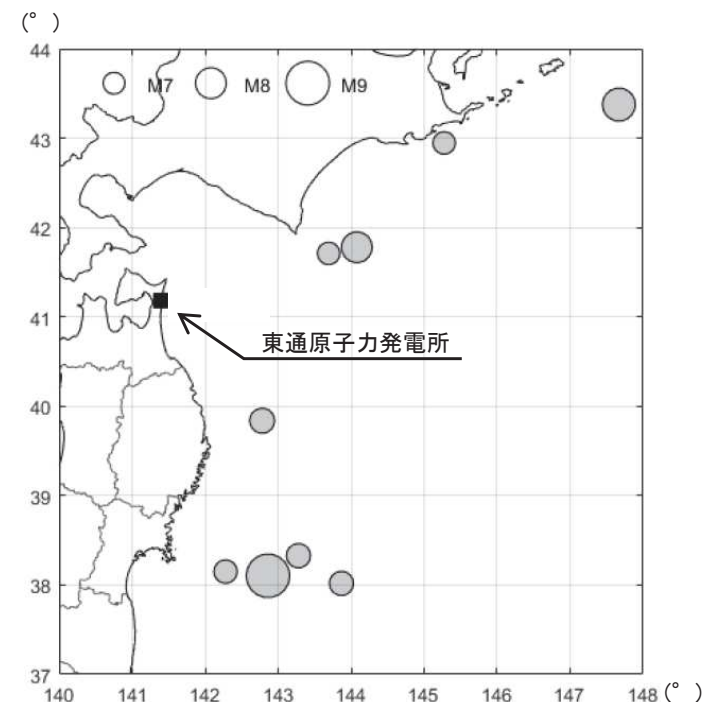
4.3 深部地盤モデルの作成

(3) コーダ部H/Vスペクトル比の評価に用いた地震

- コーダ部が卓越しやすい規模の大きな地震として、9地震を選定。
- 自由地盤のT.P.+10.0mの観測記録を用いて計算。
- 解析区間は、S波が収束したと考えられる時間帯60秒間を基本として調整。
- 水平2成分の二乗和平均平方根を分子とし、また、分子・分母それぞれを0.05Hz幅のParzenウィンドウで平滑後に計算。

地盤モデルの検討に用いた地震

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 東経 | | 北緯 | | M | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) | 見かけ入射角 (°) |
|------|----|----|----|----|-----|-------|-----|-------|-----|--------------|--------------|---------------|
| | | | | | (°) | (') | (°) | (') | | | | |
| 1994 | 10 | 4 | 22 | 22 | 147 | 40.4 | 43 | 22.5 | 8.2 | 28 | 573 | 87 |
| 2003 | 9 | 26 | 4 | 50 | 144 | 4.71 | 41 | 46.71 | 8.0 | 45 | 234 | 79 |
| 2003 | 9 | 26 | 6 | 8 | 143 | 41.49 | 41 | 42.59 | 7.1 | 21 | 201 | 84 |
| 2004 | 11 | 29 | 3 | 32 | 145 | 16.53 | 42 | 56.76 | 7.1 | 48 | 376 | 83 |
| 2005 | 8 | 16 | 11 | 46 | 142 | 16.67 | 38 | 8.97 | 7.2 | 42 | 346 | 83 |
| 2011 | 3 | 9 | 11 | 45 | 143 | 16.79 | 38 | 19.71 | 7.3 | 8 | 356 | 89 |
| 2011 | 3 | 11 | 14 | 46 | 142 | 51.66 | 38 | 6.21 | 9.0 | 24 | 365 | 86 |
| 2011 | 3 | 11 | 15 | 8 | 142 | 46.01 | 39 | 49.24 | 7.4 | 32 | 192 | 80 |
| 2012 | 12 | 7 | 17 | 18 | 143 | 52.02 | 38 | 1.19 | 7.3 | 49 | 411 | 83 |



検討に用いた地震の震央分布

4.3 深部地盤モデルの作成

(4) 深部地盤モデル推定における探索範囲

- 深部地盤モデルでは、層厚、速度、減衰(Q値)を算定する。なお、減衰(Q値)については観測記録(信号+雑音)に基づき算定された値であることを踏まえ、参考扱いとした。
- P波速度の探索範囲は、屈折波トモグラフィ解析による原子炉建屋位置のP波速度分布を考慮して設定。S波速度の探索範囲は、P波速度の分布を考慮して設定。
- 各層の密度に関しては、Kobayashi et al.(2000)に基づきS波速度から換算する。

| T.P. (m) | G.L. (m) | 層No. | 層厚 (m) | ρ (t/m ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) |
|-------------|-------------|------|-----------|-------------------------------|-------------|-------------|
| 12 | 0 | 1 | 0.5 | 1.9 | 58 | 130 |
| 11.5 | -0.5 | 2 | 0.5 | 1.9 | 60 | 190 |
| 11 | -1 | 3 | 1 | 1.9 | 280 | 420 |
| 10 | -2 | 4 | 2 | 1.9 | | |
| 8 | -4 | 5 | 2 | 1.9 | 380 | 570 |
| 6 | -6 | 6 | 3 | 1.9 | 920 | 1380 |
| 3 | -9 | 7 | 1 | 2.24 | 1300 | 2250 |
| 2 | -10 | 8 | 9 | 2.24 | | |
| -7 | -19 | 9 | 55 | 2.24 | 1790 | 3060 |
| -62 | -74 | 10 | 20.8 | 2.72 | 1800 | 3340 |
| -82.8 | -94.8 | 11 | 23.2 | 2.72 | | |
| -106 | -118 | 12 | 60 | 2.3 | 1910 | 3350 |
| -160 | -178 | 13 | 24 | 2.3 | 2030 | 3360 |
| -190 | -202 | 14 | 62 | 2.3 | 2100 | 3390 |
| -252 | -264 | 15 | 30.8 | 2.33 | 2090 | 3690 |
| -282.8 | -294.8 | 16 | 221~321 | Vsに連動 | 2340~2540 | 3000~4500 |
| | | 17 | 881~981 | | 2350~2550 | 3000~4500 |
| | | 18 | 873~973 | | 2390~2590 | 3000~4500 |
| | | 19 | 530~630 | | 2680~2880 | 3500~5000 |
| | | 20 | - | | 3260~3400 | 5000~5800 |

【青文字】:地震観測点位置を示す。

□ :Vs<0.7km/sの表層を示す。

赤枠:探索範囲を示す。

▽岩盤上部の地震観測点
(解放基盤表面の振動特性)

4.3 深部地盤モデルの作成

(5) 深部地盤モデルの算定結果

➤ 算定された層厚と速度構造を地震動評価に用いる深部地盤モデルに採用する。

| T.P. (m) | G.L. (m) | 層No. | 層厚 | ρ | Vs | Vp |
|-------------|-------------|------|------|---------------------|-------|-------|
| | | | (m) | (t/m ³) | (m/s) | (m/s) |
| 12 | 0 | | | | | |
| 11.5 | -0.5 | 1 | 0.5 | 1.9 | 58 | 130 |
| 11 | -1 | 2 | 0.5 | 1.9 | 60 | 180 |
| 10 | -2 | 3 | 1 | 1.9 | 280 | 480 |
| 8 | -4 | 4 | 2 | 1.9 | | |
| 6 | -6 | 5 | 2 | 1.9 | 380 | 810 |
| 3 | -9 | 6 | 3 | 1.9 | 920 | 1710 |
| 2 | -10 | 7 | 1 | 2.24 | 1300 | 2250 |
| -7 | -19 | 8 | 9 | 2.24 | | |
| -62 | -74 | 9 | 55 | 2.24 | 1790 | 3020 |
| -82.8 | -94.8 | 10 | 20.8 | 2.72 | 1800 | 3200 |
| -106 | -118 | 11 | 23.2 | 2.72 | | |
| -160 | -178 | 12 | 60 | 2.3 | 1910 | 3500 |
| -190 | -202 | 13 | 24 | 2.3 | 2030 | 3540 |
| -252 | -264 | 14 | 62 | 2.3 | 2100 | 3600 |
| -282.8 | -294.8 | 15 | 30.8 | 2.33 | 2090 | 3690 |
| -574.8 | -586.8 | 16 | 292 | 2.44 | 2390 | 3690 |
| -1495.8 | -1507.8 | 17 | 921 | 2.45 | 2460 | 3750 |
| -2441.8 | -2453.8 | 18 | 946 | 2.48 | 2590 | 3960 |
| -2987.8 | -2999.8 | 19 | 546 | 2.50 | 2680 | 4160 |
| | | 20 | - | 2.63 | 3340 | 5800 |

最深部の地震計深さ(T.P.-282.8m)以深の層境界深さは、地震計設置深さから1mの精度で設定した。

【青文字】地震観測点位置を示す。

■ Vs<0.7km/sの表層を示す。

▽岩盤上部の地震観測点

(解放基盤表面の振動特性)

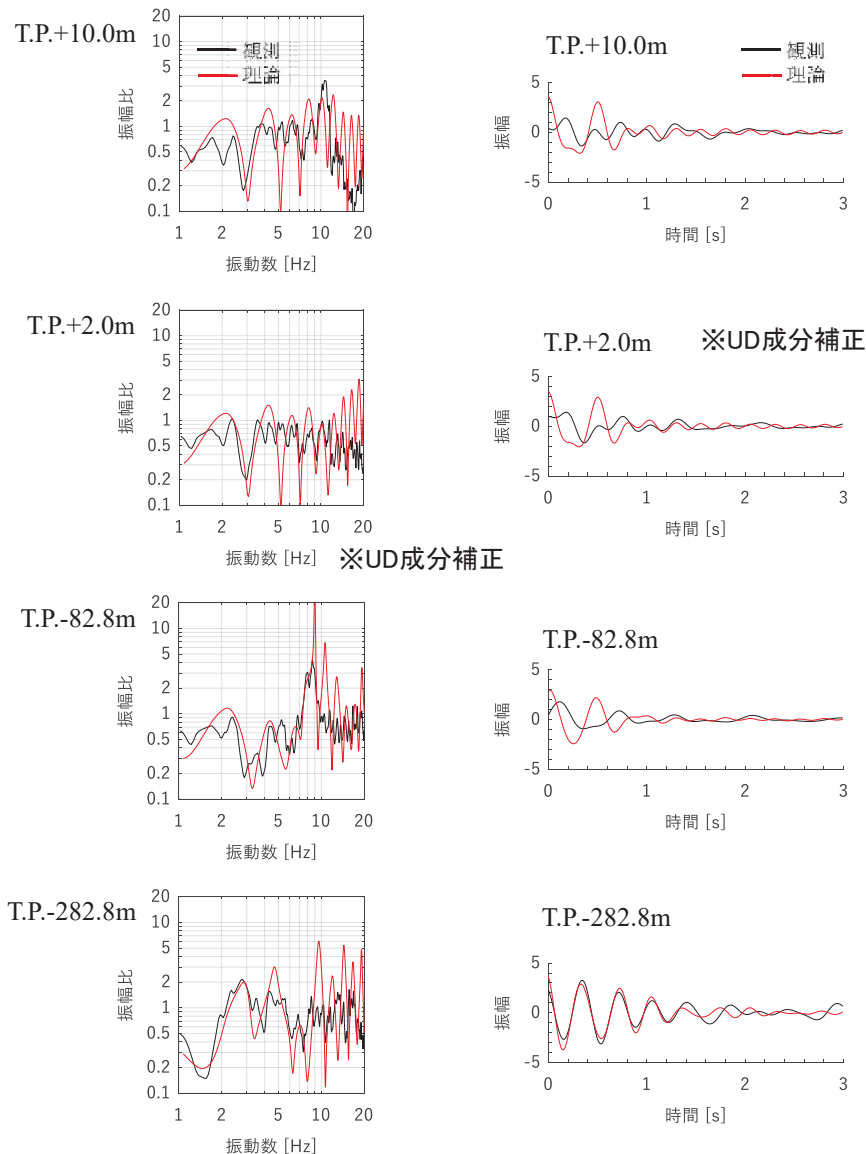
最適化深部地盤モデル

文献※を参照し減衰を設定

※参照した文献は
p.116に記載

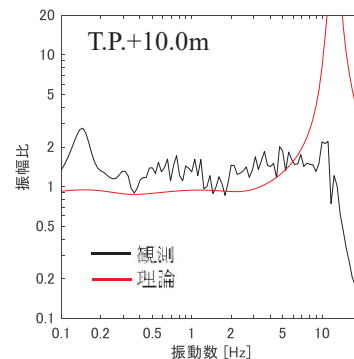
統計的グリーン関数法による
地震動評価に用いる地盤モデル

4.3 深部地盤モデルの作成 (6) フィッティング状況

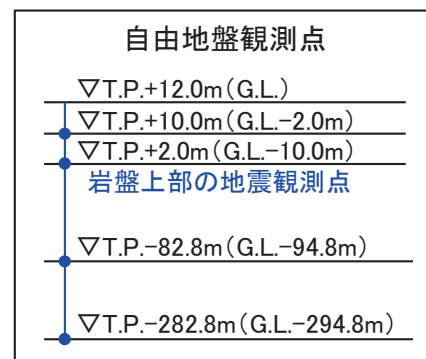


P波部H/V比及びレシーバー関数のフィッティング状況

- P波部H/Vスペクトル及びレシーバー関数では、理論値は観測値を概ね再現している。特に、深部地盤の影響を最も受けるT.P.-282.8m観測点のレシーバー関数は位相、振幅とも適合性が良好である。
- コーダ部H/Vスペクトルでは、地盤が比較的硬質なことから、低い振動数に顕著な卓越は見られない。理論値は観測値における低振動数のスペクトル形状を概ね再現している。



コーダ部H/V比のフィッティング状況

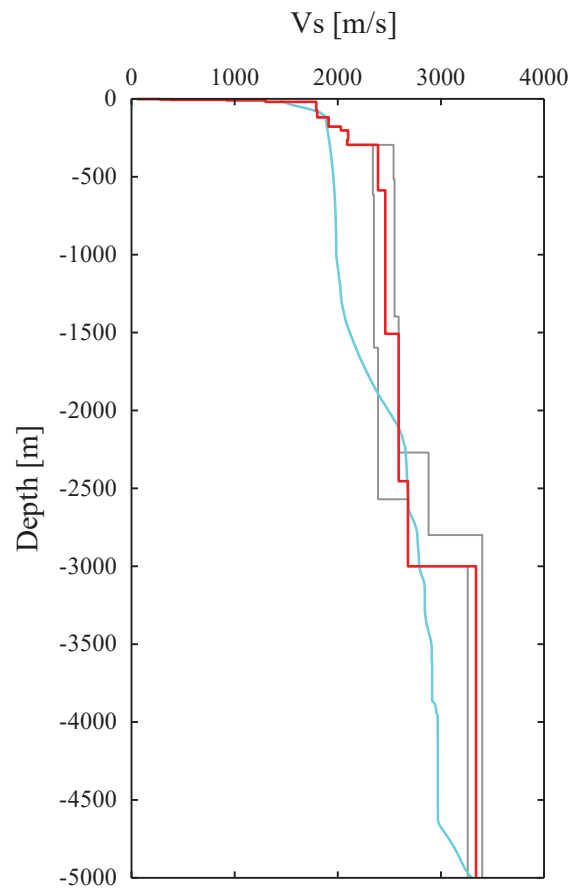


4.3 深部地盤モデルの作成

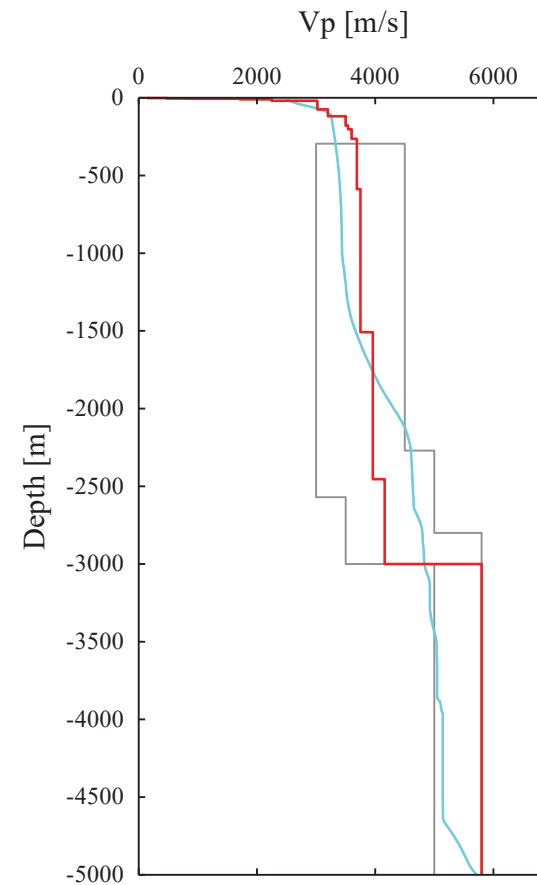
(7) 算定された地盤モデルの鉛直分布

- 算定された地盤モデルの速度構造と屈折波トモグラフィー解析によるP波速度分布に基づく炉心相当位置の速度を比較すると、概ね整合した結果となっている。

— 最適化結果
— 屈折波トモグラフィー解析によるP波速度分布に基づく炉心相当位置の速度



推定された鉛直分布 Vs



推定された鉛直分布 Vp

※参考として、探索範囲を灰色線で記載

4.4 地震動評価用地盤モデルの設定

(1) はぎとり地盤モデル

- 各観測点におけるはぎとり波算定に用いる地盤モデルのせん断波速度等は、地震観測記録(信号成分)の伝達関数を対象とした逆解析により設定。Q値(減衰)は、地震観測記録(信号成分+雑音)の伝達関数を対象とした逆解析により設定。
- 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Vs=1300m/s。

| 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} |
| -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。

■ Vs<0.7km/sの表層を示す。

▽岩盤上部の地震観測点

(解放基盤表面の振動特性)

4.4 地震動評価用地盤モデルの設定

(2) 統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル

- 地震観測点以浅のせん断波速度やQ値(減衰)等は, 地震観測記録(信号成分)の伝達関数を対象とした逆解析により設定。
- 地震観測点以深のせん断波速度等は, 観測記録のH/Vスペクトル振幅比の逆解析結果に基づき設定。Q値(減衰)については文献を参照しQ=100に設定(次頁参照)。

| 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 |
| | 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) |
| -7.0 | 55.0 | 2.24 | 1790 | 3060 | 1.23f ^{0.74} | 2.33f ^{0.50} | |
| -62.0 | 20.8 | 2.72 | 1800 | 3340 | 1.23f ^{0.74} | 2.33f ^{0.50} | |
| -82.8 | 23.2 | 2.72 | 1800 | 3340 | 1.23f ^{0.74} | 2.33f ^{0.50} | |
| -106.0 | 60.0 | 2.30 | 1910 | 3350 | 8.91f ^{0.94} | 5.55f ^{0.50} | |
| -166.0 | 24.0 | 2.30 | 2030 | 3360 | 8.91f ^{0.94} | 5.55f ^{0.50} | |
| -190.0 | 62.0 | 2.30 | 2100 | 3390 | 8.91f ^{0.94} | 5.55f ^{0.50} | |
| -252.0 | 30.8 | 2.33 | 2090 | 3690 | 8.91f ^{0.94} | 5.55f ^{0.50} | |
| -282.8 | 292.0 | 2.44 | 2390 | 3690 | 100 | 100 | |
| -574.8 | 921.0 | 2.45 | 2460 | 3750 | 100 | 100 | |
| -1495.8 | 946.0 | 2.48 | 2590 | 3960 | 100 | 100 | |
| -2441.8 | 546.0 | 2.50 | 2680 | 4160 | 100 | 100 | |
| -2987.8 | ∞ | 2.63 | 3340 | 5800 | 150 | 150 | ▽地震基盤 |

【青文字】地震観測点位置を示す。

4.4 地震動評価用地盤モデルの設定

(3) 統計的グリーン関数法に用いる地盤モデルの深部地盤のQ値について

- Abercrombie(1997) は、岩盤のボアホールで観測されたMicroearthquakeから評価された Q_s 値は深さ0—2900mで $\sim 21 \pm 7$ であること、これはカリフォルニアにおける過去の評価(下表)と整合しており岩種に左右されないこと、減衰の90%は深さ3km以内で生じていること、地震波から評価されるQ値は岩石試験から得られたQ値に比べ小さいこと等から、地震波の減衰には岩盤の不均質による散乱が影響していると指摘している。
- 東通では、アレイ観測点による信号成分と観測記録の検討から、インコヒーレントな散乱の影響が確認されている。従ってカリフォルニアの評価結果を踏まえるとQ値としてはこれらを上回る $Q=50$ を採用することが考えられるが、保守性を持たせ $Q=100$ を採用する。

Microearthquake等から求めた岩盤表面近くのQ値 (Abercrombie (1997) より作成)

| 場所 | 深さ (m) | Q_p | Q_s | 岩種 | 文献 |
|-------------------|----------|-------|-------|------------|----------------------------|
| Oroville | 0—475 | — | 9 | オフィオライト | Malin et al. (1988) |
| | 375—475 | — | 11 | | |
| Anza | 0—150 | 6.5 | 9 | 花崗岩 | Aster and Shearer (1991) |
| | 150—300 | 27 | 26 | | |
| Garner valley | 0—220 | — | 12 | 花崗岩 他 | Archuleta et al. (1992) |
| Parkfield | 0—200 | 6—11 | 8—19 | 第三紀の岩 | Blakeslee and Malin (1991) |
| | 0—300 | — | 10 | | Jongmans and Malin (1995) |
| | 0—1000 | — | 37 | | |
| Los Angeles basin | 0—420 | 45 | — | 更新世及び鮮新世の岩 | Hauksson et al. (1987) |
| | 420—1500 | 43 | 25 | | |

4.4 地震動評価用地盤モデルの設定

(4) 理論的手法に用いる地盤モデル

- 地震基盤(深さ3km)以浅の層厚, 密度, V_s 及び V_p は, 統計的グリーン関数法による地震動評価で用いる地盤モデルを用いた。
- Q値及び地震基盤以深は地震調査研究推進本部(2004)及び永井ほか(2001)を参考に設定。

| T.P. (m) | 層厚 (m) | 密度 (t/m^3) | V_s (m/s) | V_p (m/s) | Q |
|-------------|-----------|-------------------|----------------|----------------|-----|
| +2.0 | — | — | — | — | — |
| -7.0 | 9.0 | 2.24 | 1300 | 2250 | 100 |
| -62.0 | 55.0 | 2.24 | 1790 | 3060 | 100 |
| -82.8 | 20.8 | 2.72 | 1800 | 3340 | 100 |
| -106.0 | 23.2 | 2.72 | 1800 | 3340 | 100 |
| -166.0 | 60.0 | 2.30 | 1910 | 3350 | 100 |
| -190.0 | 24.0 | 2.30 | 2030 | 3360 | 100 |
| -252.0 | 62.0 | 2.30 | 2100 | 3390 | 100 |
| -282.8 | 30.8 | 2.33 | 2090 | 3690 | 100 |
| -574.8 | 292.0 | 2.44 | 2390 | 3690 | 100 |
| -1495.8 | 921.0 | 2.45 | 2460 | 3750 | 100 |
| -2441.8 | 946.0 | 2.48 | 2590 | 3960 | 150 |
| -2987.8 | 546.0 | 2.50 | 2680 | 4160 | 150 |
| -3000.0 | 12.2 | 2.63 | 3340 | 5800 | 150 |
| -15000.0 | 12000.0 | 2.69 | 3580 | 6180 | 300 |
| -25000.0 | 10000.0 | 2.80 | 3700 | 6400 | 300 |
| -25000.0 | ∞ | 3.20 | 4100 | 7100 | 500 |

▽岩盤上部の地震観測点
(解放基盤表面の振動特性)

▽地震基盤

【青文字】地震観測点位置を示す。

4. 4 地震動評価用地盤モデルの設定

(5) 理論的手法に用いる地盤モデル(参考とした文献)

- 理論的手法に用いる深部の構造及び減衰は、敷地周辺で発生した地震の知見等を用いる。
- 地震基盤から上部地殻の V_s , V_p 及び密度 ρ は、内陸地殻内地震の震源パラメータとの関係性を踏まえ、地震調査研究推進本部(2004)に基づき層厚の重みづけ平均により算定した。
- 減衰及び下部地殻の構造は、1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較検討において用いられた永井ほか(2001)の値を採用した。

Table 1. Underground structures.

| (b) For near-field analysis | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|-------------------------------|-------|-------|-----------------|--|
| V_p km/s | V_s km/s | ρ 10^3kg/m^3 | Q_p | Q_s | Thickness km | |
| 2.0 | 1.20 | 2.10 | 200 | 100 | 1 | |
| 5.0 | 2.90 | 2.40 | 300 | 150 | 2 | |
| 5.9 | 3.40 | 2.70 | 600 | 300 | 9 | |
| 6.4 | 3.7 | 2.80 | 600 | 300 | 13 | |
| 7.1 | 4.1 | 3.20 | 1000 | 500 | ∞ | |

「近地波形のグリーン関数の計算には、Table1(b)に示す水平多層の速度構造を使用した。これは藤江(1999)による沈み込むプレートと陸側のプレートの構造を平均化したものである。」

永井ほか(2001)より抜粋・一部加筆

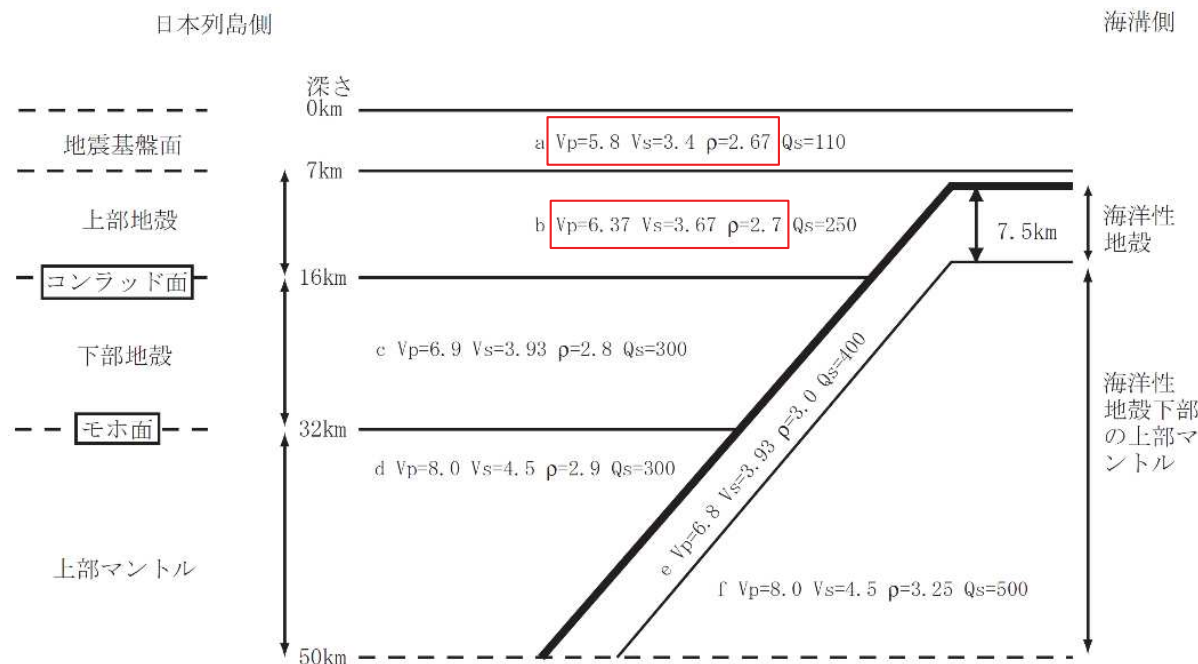


図9 プレートに直交する断面の地下構造

(断面を横から見たところ。P波速度 V_p とS波速度 V_s の単位はkm/s、密度 ρ の単位は g/cm^3)

「三浦・他(2001)による宮城県沖～東北日本の速度構造断面等を参照して、三次元の速度構造モデルの設定を行った(図9参照)。」

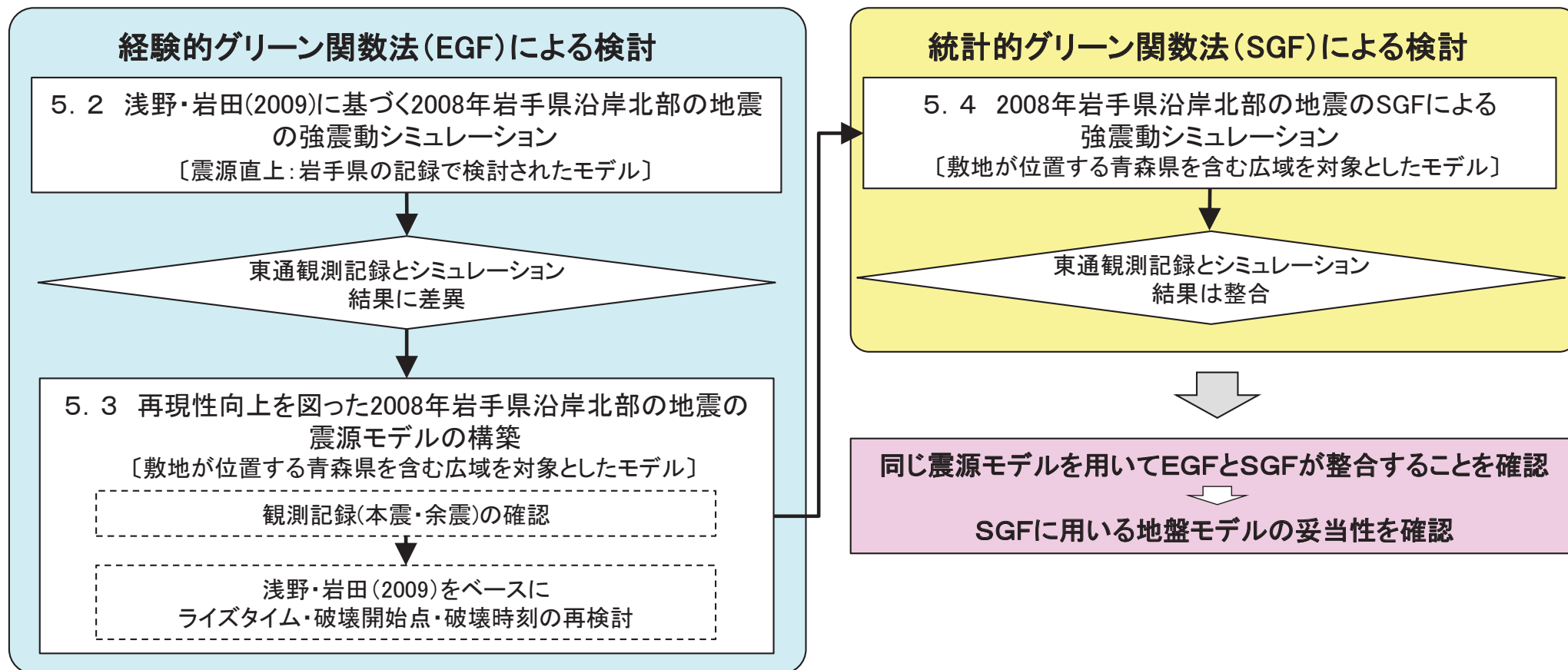
地震調査研究推進本部(2004)より抜粋・一部加筆

5. 地盤モデルの妥当性の検証

- 5. 1 検討の概要
- 5. 2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション
- 5. 3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築
- 5. 4 2008年岩手県沿岸北部の地震のSGFによる強震動シミュレーション

5.1 検討の概要

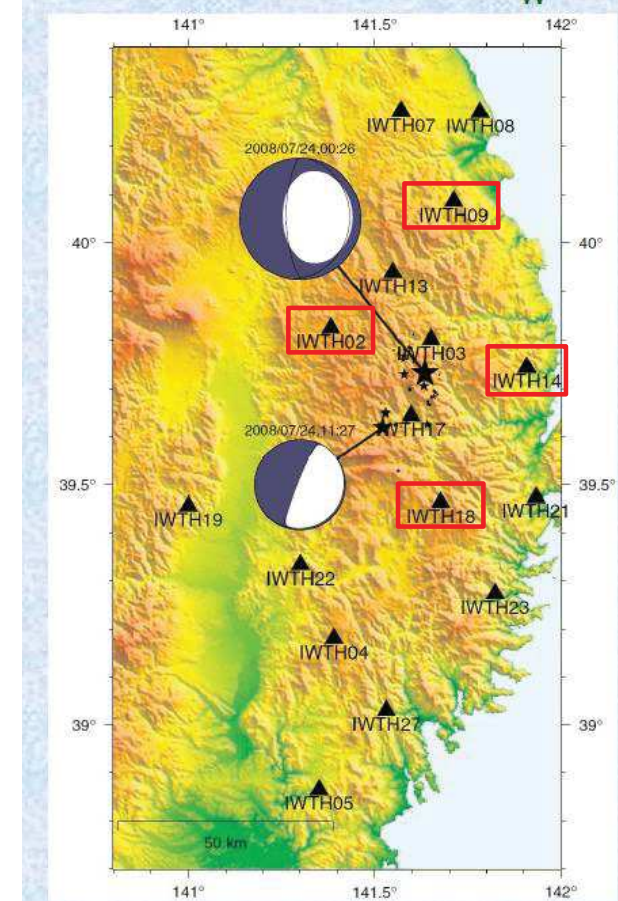
- 敷地で過去に観測された地震のうち、震源断層モデルの設定が行われている地震として、2008年岩手県沿岸北部の地震が挙げられる〔浅野・岩田(2009)〕。
- この地震の敷地自由地盤岩盤上部の観測記録の最大加速度値は約 30cm/s^2 であり、これまで敷地で観測された地震のうちでは大きな地震動であることから、地盤モデルの妥当性の検証を目的として、統計的グリーン関数法(SGF)によるシミュレーション解析を実施した。
- シミュレーション解析を行うにあたり、浅野・岩田(2009)は、岩手県内の観測記録を基に震源モデルを策定していることから、東通原子力発電所との位置関係(震央距離 $\Delta=163\text{km}$)を踏まえ、経験的グリーン関数法(EGF)による解析を行い、青森県を含む広域を対象とした震源モデルの再構築を図った。



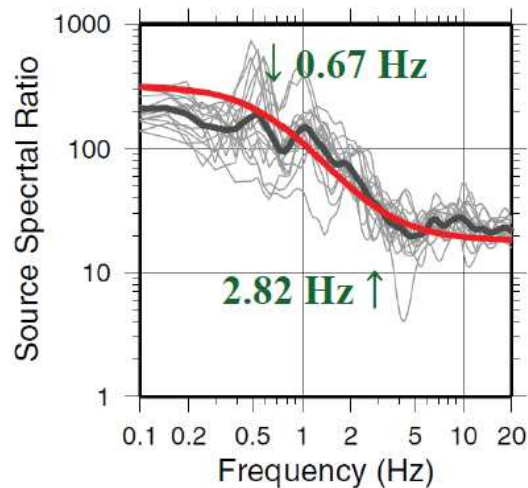
5. 2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション (1) 浅野・岩田(2009)の概要 震源モデル

- 波形合成のためのパラメータCとNをSource Spectral Ratio Fitting法(三宅・他,1999)によって本震と余震のコーナー周波数を推定。KiK-netの地中観測17点を使用。
- Suzuki et al.(2009)の震源インバージョンで用いた断層面形状に基づき検討。
- 強震動生成域の面積, ライズタイム, 強震動生成域内の破壊開始点, 破壊伝播速度, 2番目の強震動生成域の位置及び破壊時刻をグリッドサーチにより推定。
- KiK-net地中観測4点の水平2成分をターゲット(解析周波数0.2~10Hz)。
- モデルの評価は, 三宅・他(1999)に従い, 変位波形と加速度エンベロープの残差の和が最小となるモデルを最適とした。

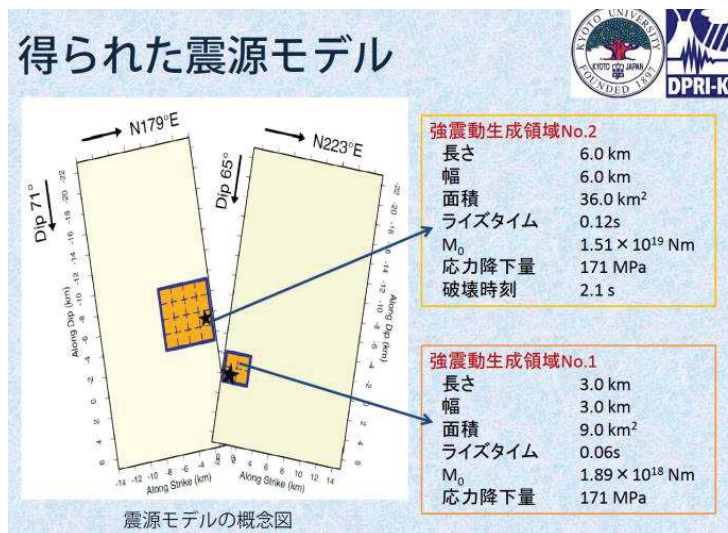
本震：08/7/24 00:26 M_w 6.8
余震：08/7/24 11:27 M_w 5.1



| 諸元(気象庁) | 地震の発生日時 | 震央地名 | 緯度 | 経度 | 深さ | M_j | 最大震度 |
|----------|------------------|---------|------------|-------------|-------|-------|------|
| 余震(要素地震) | 2008/07/24 11:27 | 岩手県沿岸北部 | 39° 37.2'N | 141° 31.3'E | 112km | 4.8 | 3 |
| 本震 | 2008/07/24 00:26 | 岩手県沿岸北部 | 39° 43.9'N | 141° 38.1'E | 108km | 6.8 | 6弱 |



本震と余震のスペクトル比



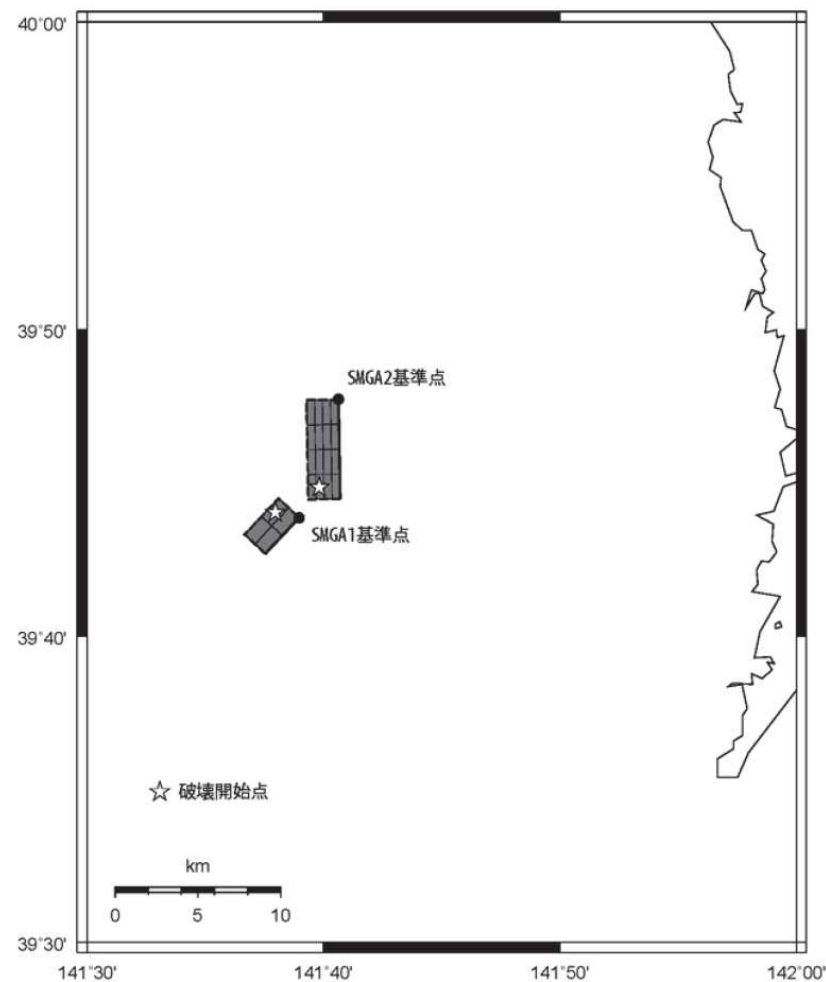
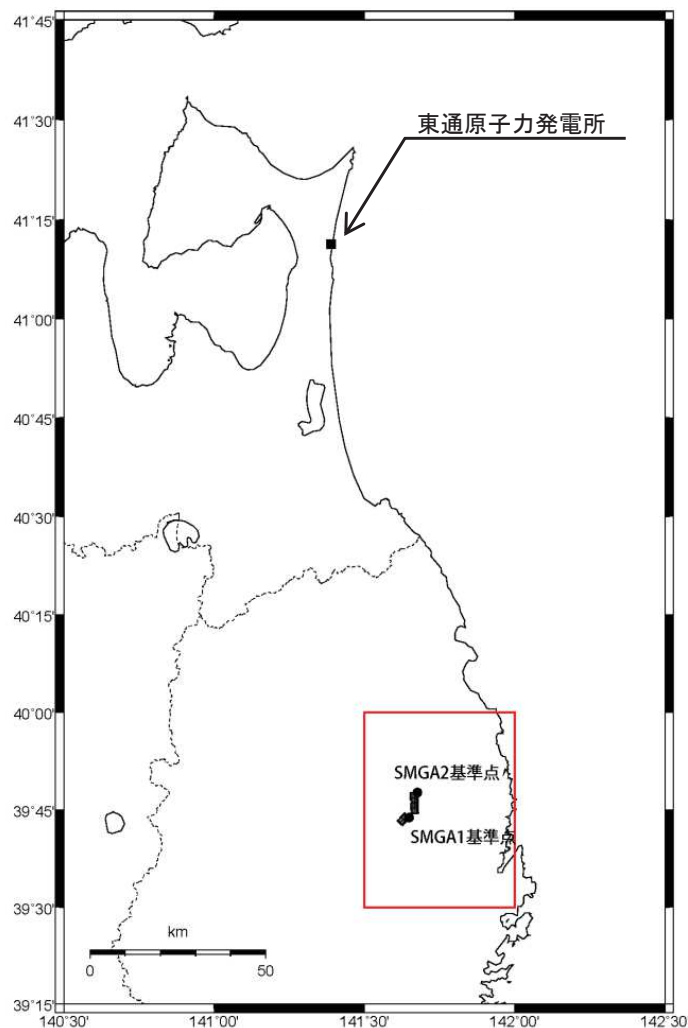
震源モデル

本震・余震の震央位置と観測点

□ : ターゲットとした観測点

5. 2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション (1)浅野・岩田(2009)の概要 震源モデル

➤ 震源断層モデル図(全体図)を示す。



赤枠の拡大図

2008年岩手県沿岸北部の地震のEGFに用いる震源断層モデル

5. 2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション (1)浅野・岩田(2009)の概要 震源モデル

➤ 断層パラメータを示す。

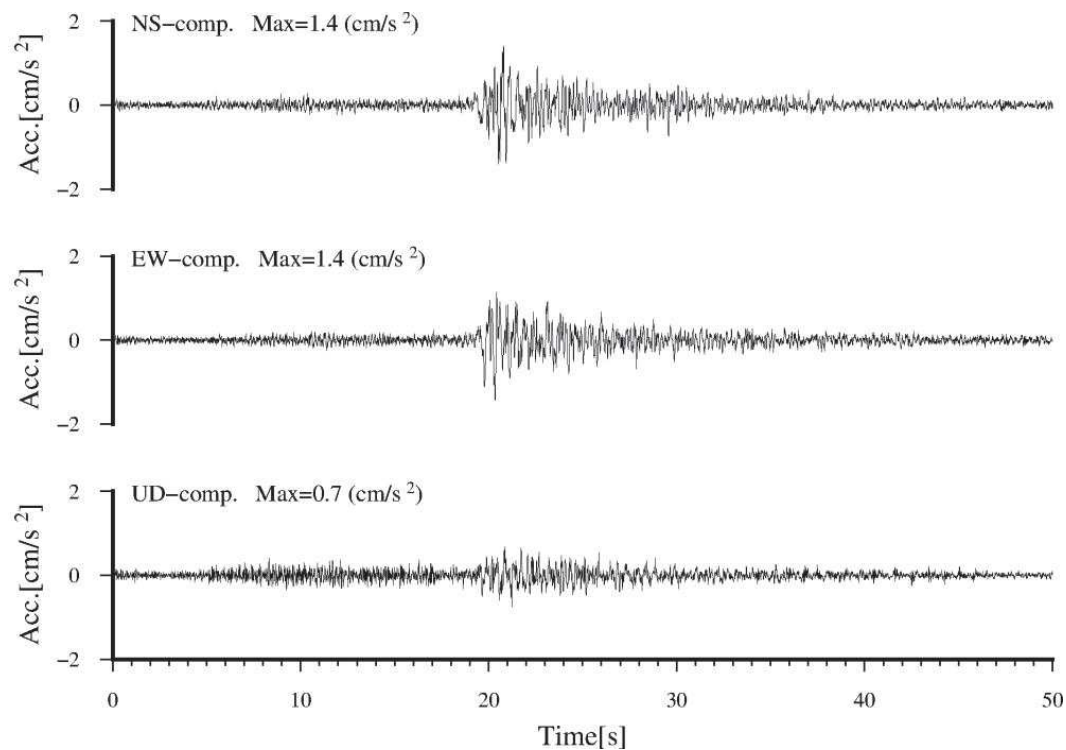
| 断層パラメータ | 記号 | SMGA1 | SMGA2 | 設定方法 |
|--------------|----------------|---|---|---|
| 断層位置 | - | N39.7311° , E141.6494° | N39.7954° , E141.6772° | 浅野・岩田(2009) |
| 走向 | θ | 223° | 179° | 浅野・岩田(2009) |
| 傾斜角 | δ | 65° | 71° | 浅野・岩田(2009) |
| 断層長さ | L | 3.0 km | 6.0 km | 浅野・岩田(2009) |
| 断層幅 | W | 3.0 km | 6.0 km | 浅野・岩田(2009) |
| 断層面積 | S | 9.0 km ² | 36.0 km ² | 浅野・岩田(2009) |
| 断層上端深さ | - | 106.0 km | 99.3 km | 浅野・岩田(2009) |
| 破壊開始点 | - | 前頁参照 | 前項参照 | 浅野・岩田(2009) |
| 破壊伝播形式 | - | 同心円状 | 同心円状 | 設定 |
| 地震モーメント | M ₀ | 1.89 × 10 ¹⁸ Nm | 1.51 × 10 ¹⁹ Nm | 浅野・岩田(2009) |
| モーメントマグニチュード | M _w | 6.1 | 6.7 | M _w =(logM ₀ -9.1)/1.5 |
| 気象庁マグニチュード | M _J | 6.8 | | 気象庁 |
| 剛性率 | μ | 8.06 × 10 ¹⁰ N/m ² | 8.06 × 10 ¹⁰ N/m ² | $\mu = \rho \beta^2$ |
| 密度 | ρ | 3.5 g/cm ³ | 3.5 g/cm ³ | Ludwig et al.(1970) |
| S波速度 | β | 4.8 km/s | 4.8 km/s | 浅野・岩田(2009) |
| 平均すべり量 | D | 2.60 m | 5.20 m | D=M ₀ /(μS) |
| 応力降下量 | $\Delta\sigma$ | 170.6 MPa | 170.6 MPa | 浅野・岩田(2009) |
| ライズタイム | tr | 0.06 s | 0.12 s | 浅野・岩田(2009) |
| 破壊時刻 | - | 0.0 s | 2.1 s | 浅野・岩田(2009) |
| 破壊伝播速度 | V _r | 3.65 km/s | 3.65 km/s | 浅野・岩田(2009) |
| 短周期レベル | A | 8.36 × 10 ¹⁹ Nm/s ² | 1.67 × 10 ²⁰ Nm/s ² | A=4 π (S/ π) ^{0.5} $\Delta\sigma \beta^2$ |

5.2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション (2) 経験的グリーン関数法に用いる要素地震

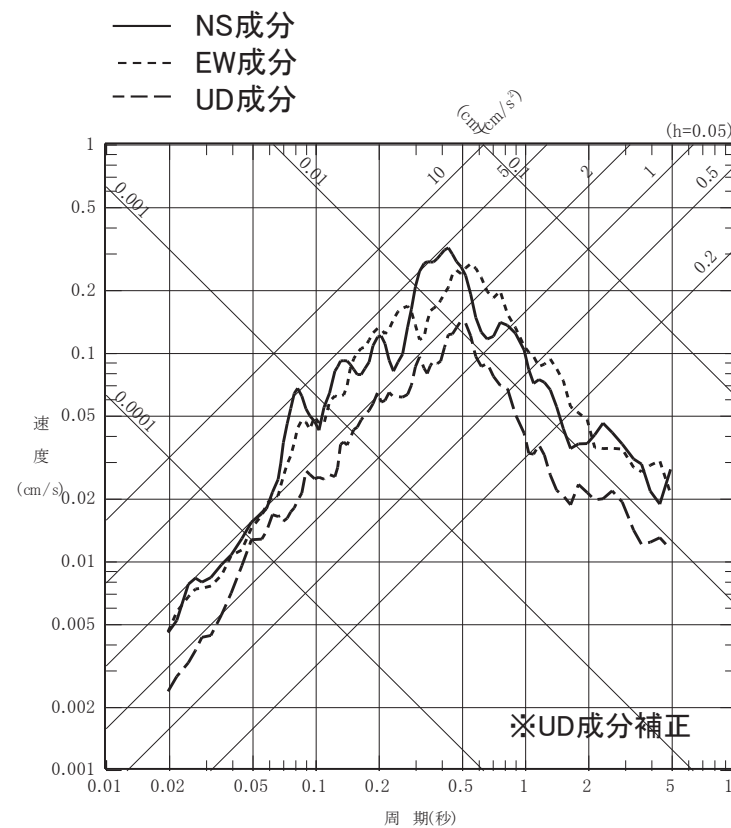
➤ 要素地震の諸元, 時刻歴波形, 応答スペクトルを示す。

要素地震の諸元〔浅野・岩田(2009)〕

| 年月日 | 時刻 | 震央位置 | Mw | 震源深さ | M ₀ | 応力降下量 |
|-----------|-------|-------------|-----|----------|-----------------------------|---------|
| 2008/7/24 | 11:27 | 141.5218° E | 5.1 | 111.91km | 5.37 × 10 ¹⁶ N・m | 38.8MPa |
| | | 39.6200° N | | | | |



加速度波形

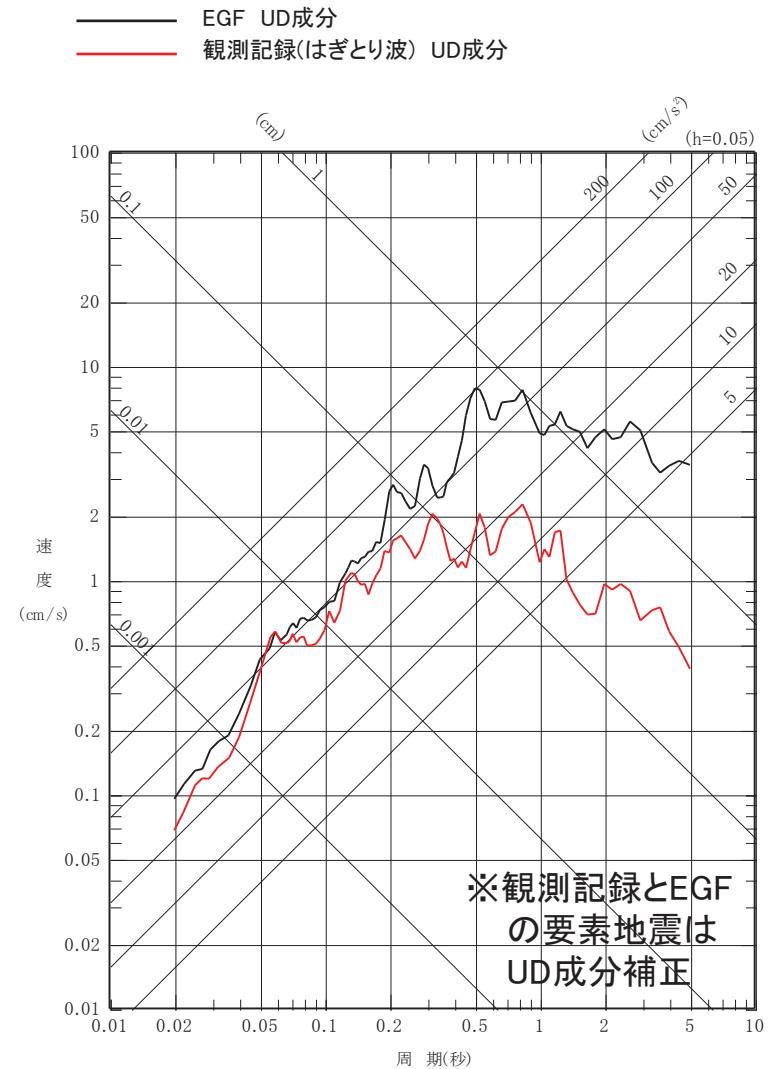
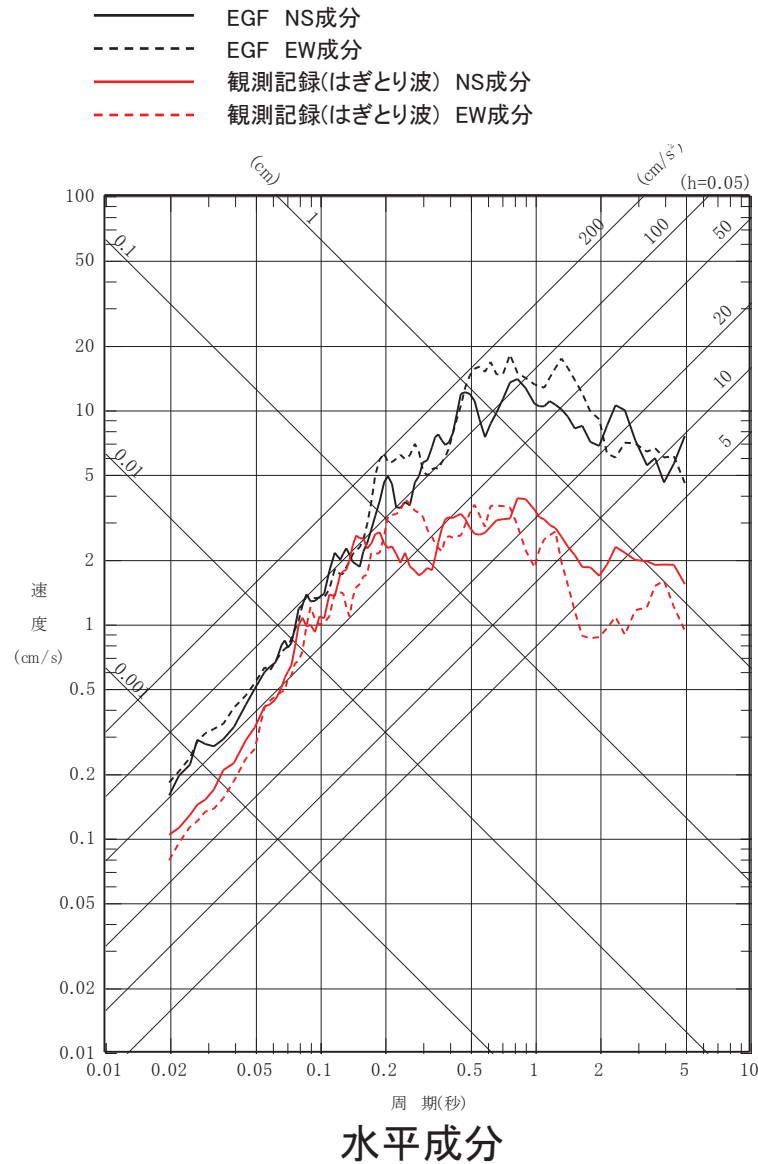


応答スペクトル

要素地震 (東通原子力発電所 自由地盤 T.P.+2.0m はぎとり波)

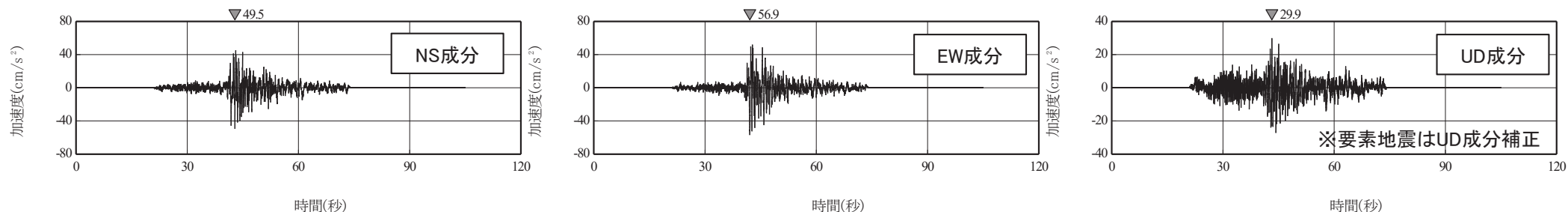
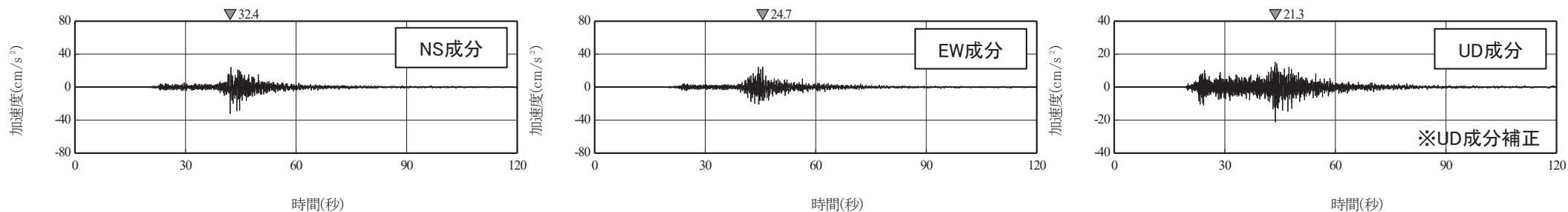
5. 2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション (3) 経験的グリーン関数法による敷地のシミュレーション結果

- EGFの解析結果と本震の観測記録〔自由地盤岩盤上部の観測点 (T.P.+2.0m)のはぎとり波〕の応答スペクトルの比較を示す。
- EGFの結果は観測記録より特に長周期側で大きい結果となった。



5. 2 浅野・岩田(2009)に基づく2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動シミュレーション (3) 経験的グリーン関数法による敷地のシミュレーション結果

- EGFの結果と東通原子力発電所の観測記録〔自由地盤岩盤上部の観測点(T.P.+2.0m)のはぎとり波〕の加速度波形の比較を示す。
- 最大加速度値はEGFが多少大きい結果となった。



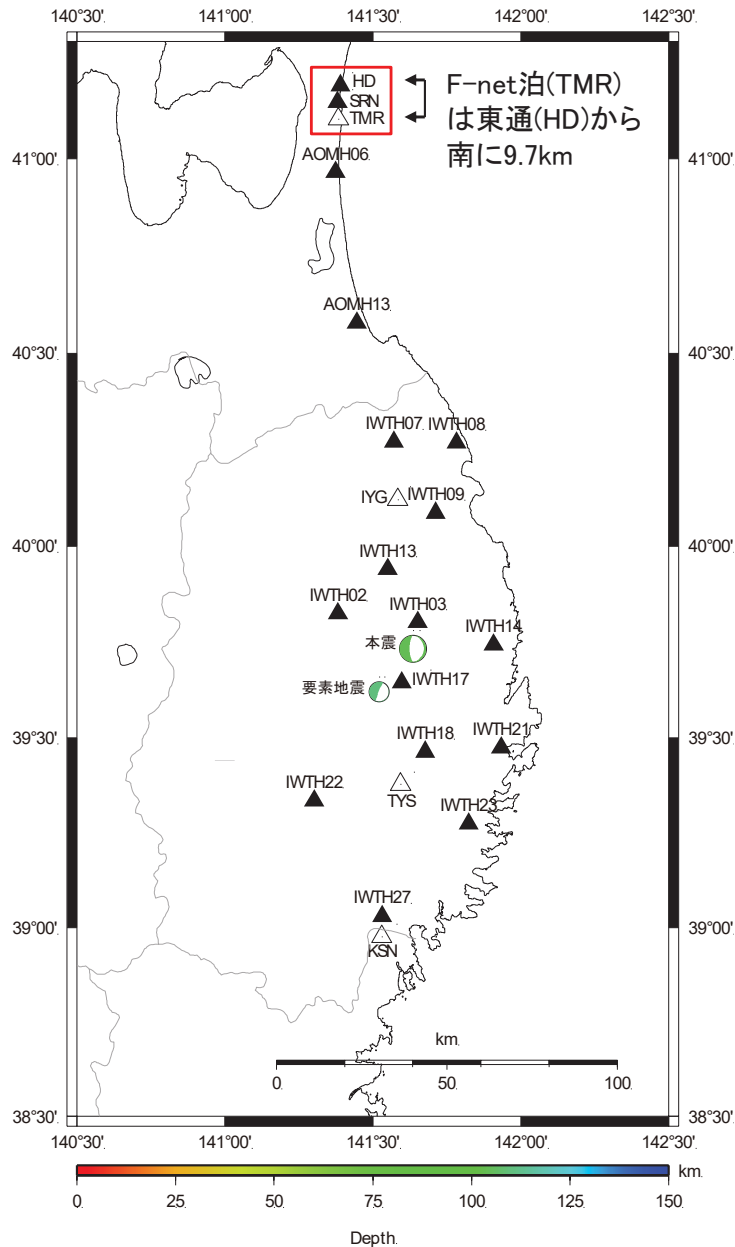
5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築

(1) シミュレーションの再現性向上の検討概要

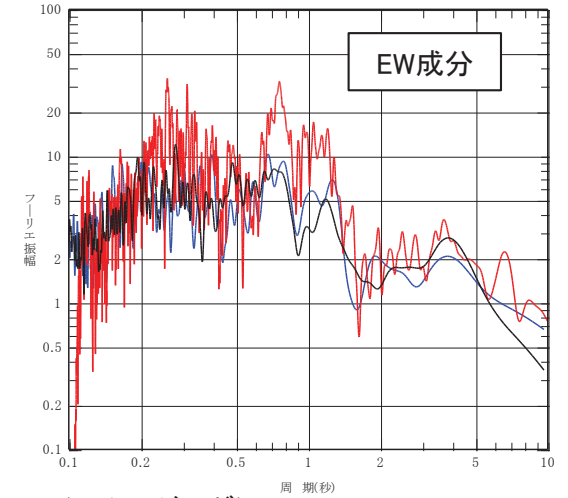
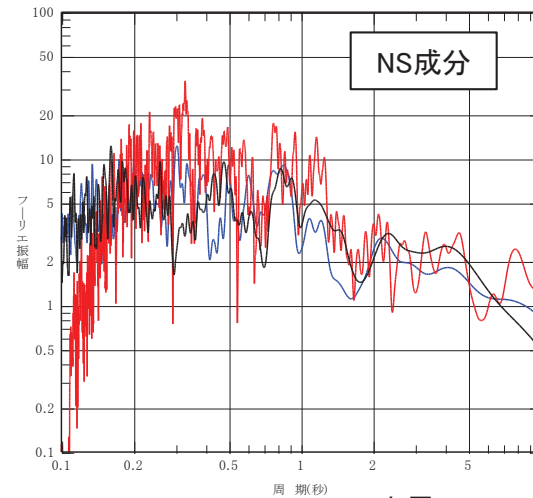
- 浅野・岩田(2009)に基づき、経験的グリーン関数法(EGF)によるシミュレーション解析を行ったところ、東通原子力発電所では、観測記録よりシミュレーション結果が大きい傾向がみられた。
- 浅野・岩田(2009)では、2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの推定において、岩手県内のKiK-net観測点を用いており、特に破壊開始点やライズタイムといったパラメータは、震源直上の4観測点のみから決定されている。
- 震源との位置関係が限定された観測点のみで震源モデルを推定すると、決定された震源パラメータに本震時の指向性効果が含まれてしまう可能性がある。
- そこで、より広域で観測記録を再現可能な震源モデルの推定を目的に、青森県の観測点も加えて浅野・岩田(2009)の震源パラメータの再検討を実施した。
- なお、震源モデルのパラメータ検討に際し、最初に観測記録の品質確認を行った。
 - (1) 観測記録(本震・余震)の確認 …… 信頼周期, フーリエスペクトル比等
 - (2) 震源パラメータの検討 …… ライズタイム, 破壊開始点, 破壊時刻

5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (2) 観測記録の信頼周期の確認

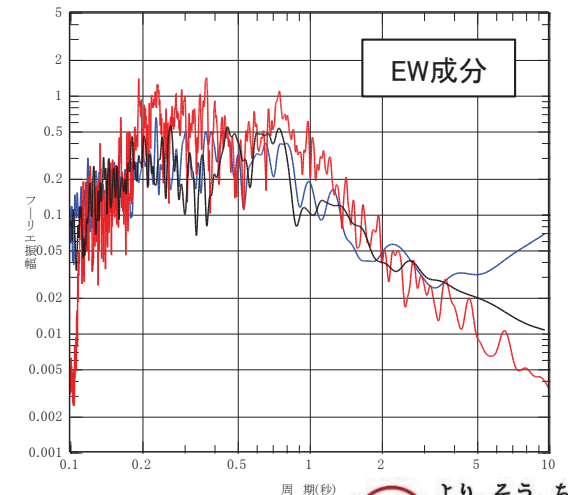
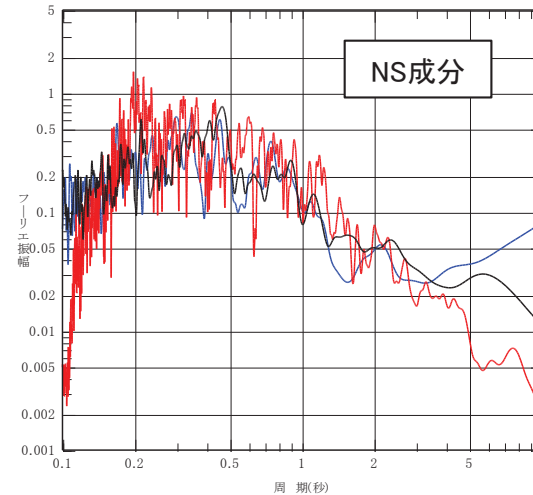
- 東通原子力発電所(HD), 電力中央研究所強震観測網(RK-net)の白糠地点(SRN), F-net泊(TMR)のフーリエスペクトルの比較を行った。
- 余震(要素地震)は, 周期3秒程度までノイズの問題はないと考えられる。



△: F-net観測点
□: 検討対象とした観測点



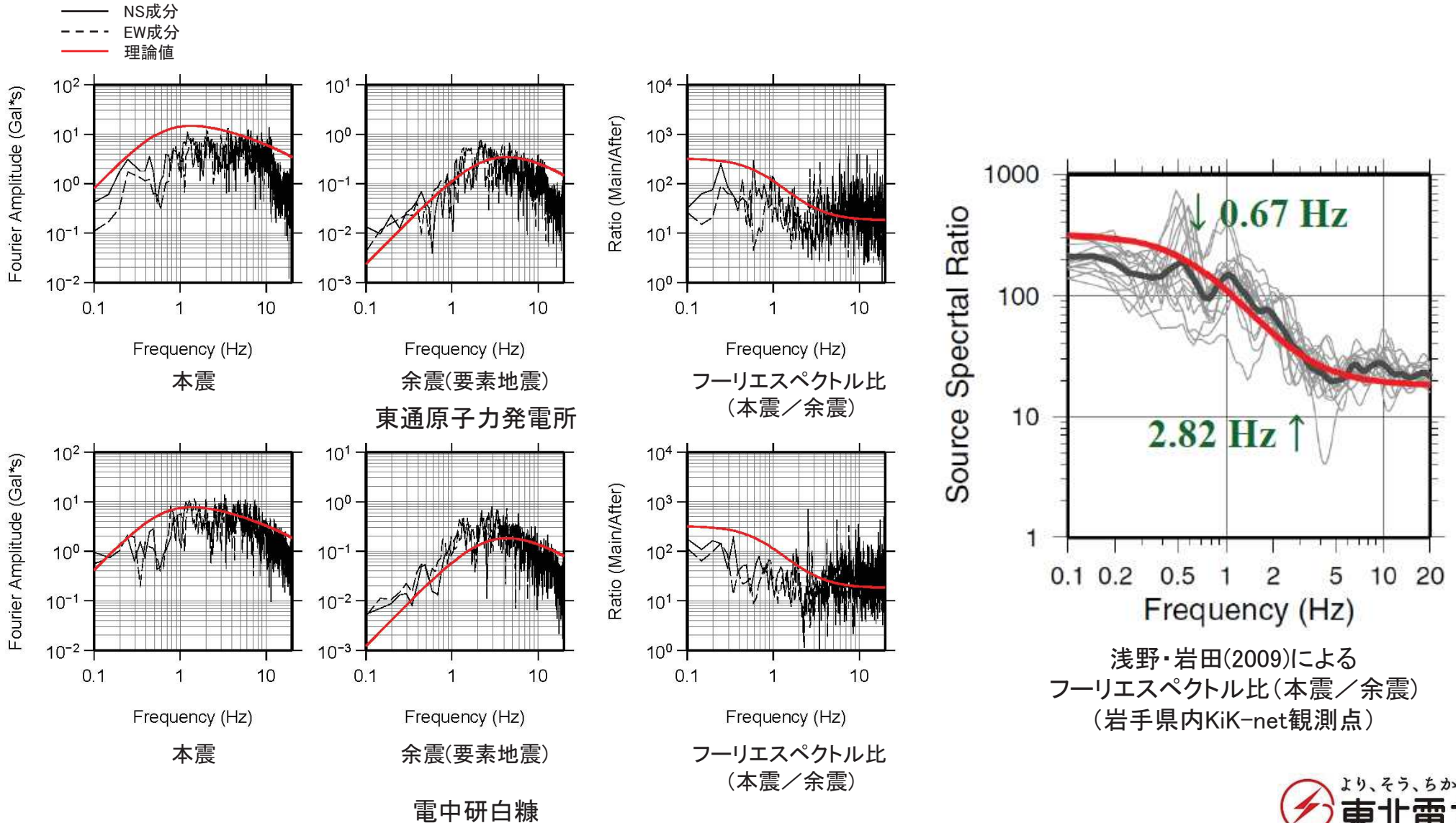
本震のフーリエスペクトル(スムージング)



余震(要素地震)のフーリエスペクトル(スムージング)

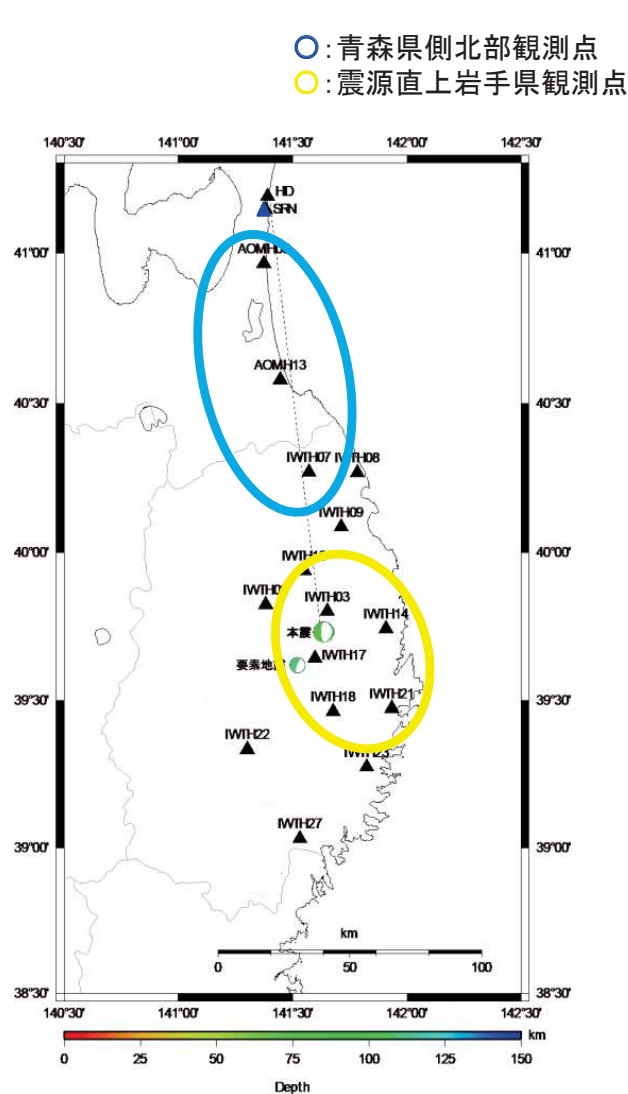
5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (3) 本震/要素地震のフーリエスペクトル比①

- 東通原子力発電所及び電中研白糠における本震と余震(要素地震)のフーリエスペクトル比について確認した。
- 東通原子力発電所と電中研白糠のフーリエスペクトル比は、浅野・岩田(2009)で検討された岩手県内のKiK-netのものと同振動数側で傾向が異なる。

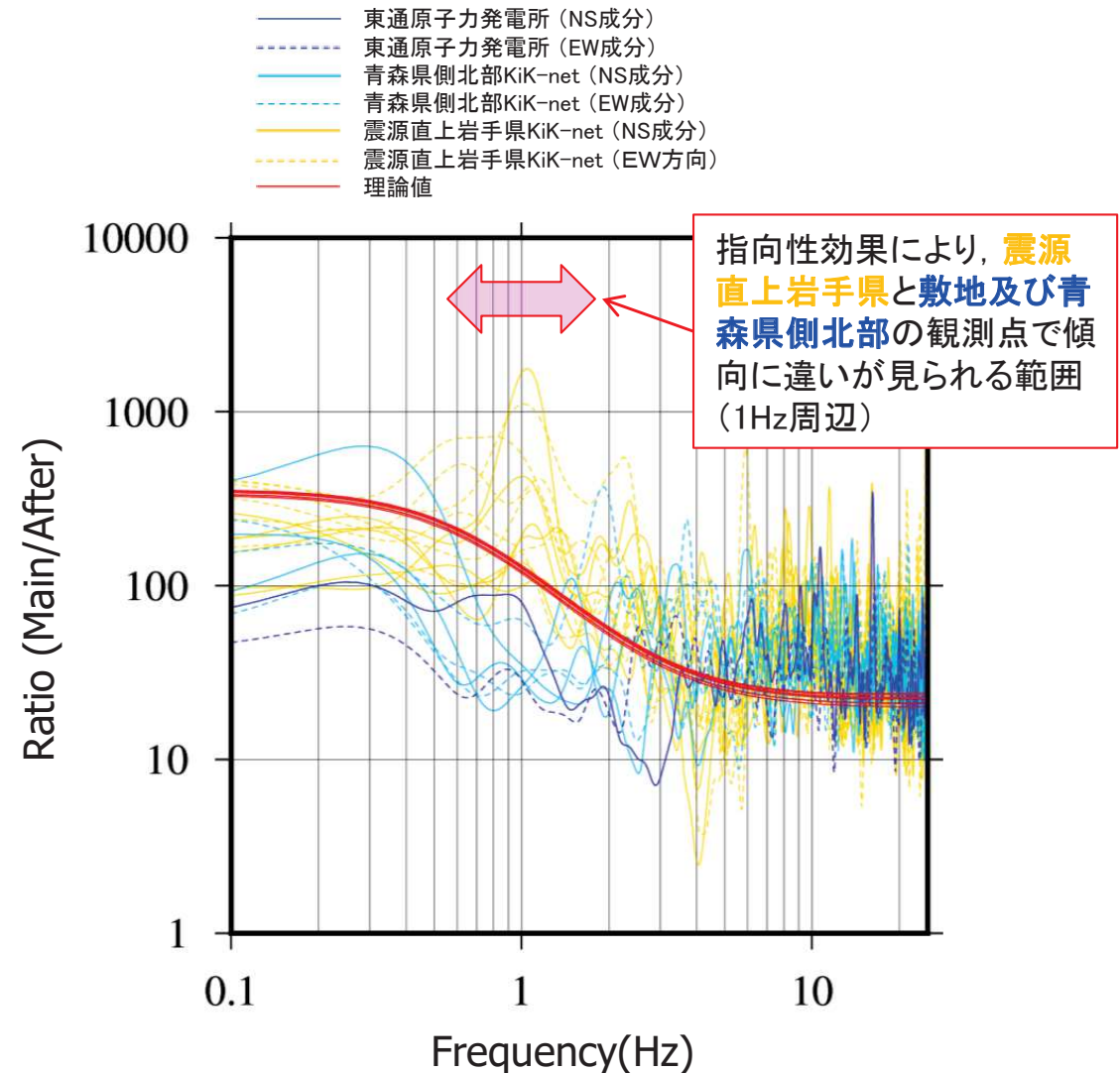


5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (3) 本震/要素地震のフーリエスペクトル比②

- 震源直上の岩手県観測点 (KiK-net 6地点) と青森県側北部観測点 (東通(HD), KiK-net 3地点) の本震/余震 (要素地震) のフーリエスペクトル比を確認した。
- 1Hz周辺に違いがあることから, 指向性効果の可能性が考えられる。



観測点位置図



フーリエスペクトル比(スムージング)

5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築

(4) 震源パラメータの検討

- 指向性効果に着目し, ①ライズタイム, ②M₀が大きいSMGA2の破壊開始点について検討を行う。また, 破壊開始点間の距離の変更に伴い ③破壊時刻(SMGA2)の影響についても確認を行う。
- 最適モデルの選定には, 擬似速度応答スペクトル(h=5%)の適合度を基準とした。適合度の定量化のために, Dreger et al.(2015)によるCombined Goodness-of-fit(CGOF)を用いた。

$$CGOF = \frac{1}{2} \left| \langle \ln(obs/sim) \rangle \right| + \frac{1}{2} \left| \langle \ln(sim/obs) \rangle \right|$$

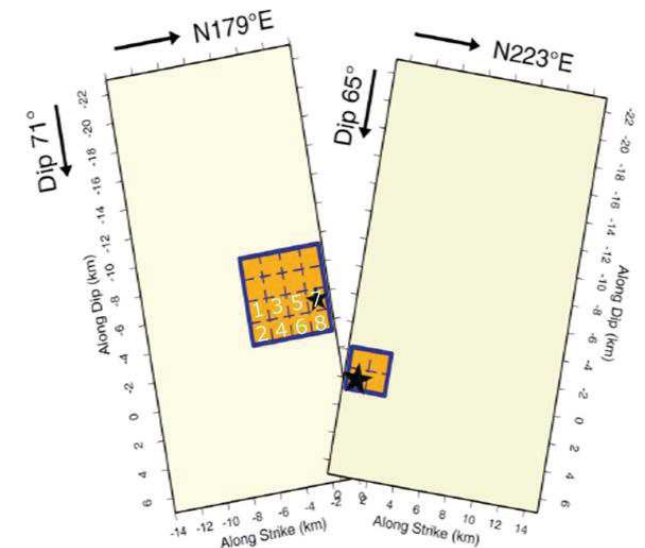
obs 観測記録の擬似速度応答スペクトル
sim EGFによるシミュレーション結果の擬似速度応答スペクトル

|| 絶対値

< > 周期点数、観測点数についての平均

※CGOFの値は0以上の値をとり, Dreger et al. (2015)ではこの値が0.70以上になると不合格、0.35以下で合格としている。

| 断層パラメータ | 変動範囲 | 備考 |
|----------------|---|---|
| ①ライズタイム | tr: 0.16~0.66秒 $\alpha = 0.10 \sim 0.40$ 0.02刻み | <ul style="list-style-type: none"> 浅野・岩田(2009)のtr SMGA1: 0.06秒 SMGA2: 0.12秒 tr = $\alpha W/V_r$ <p>[参考]</p> <ul style="list-style-type: none"> 2003年5月26日宮城県沖の地震 tr: 0.18~0.36秒 浅野ほか(2004) 2011年4月7日宮城県沖の地震 tr: 0.6秒 原田・釜江(2011) |
| ②破壊開始点 (SMGA2) | 8点(右図) | — |
| ③破壊時刻 (SMGA2) | 1.5~2.5秒 0.1秒刻み | <ul style="list-style-type: none"> 浅野・岩田(2009)では2.1秒 |



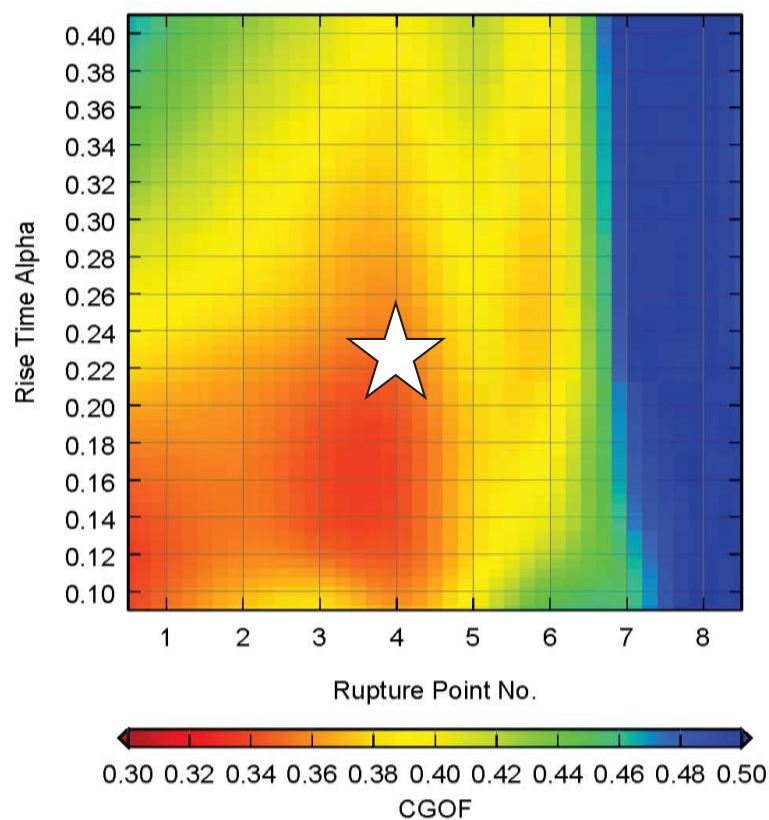
破壊開始点の検討位置
浅野・岩田(2009)に加筆

5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築

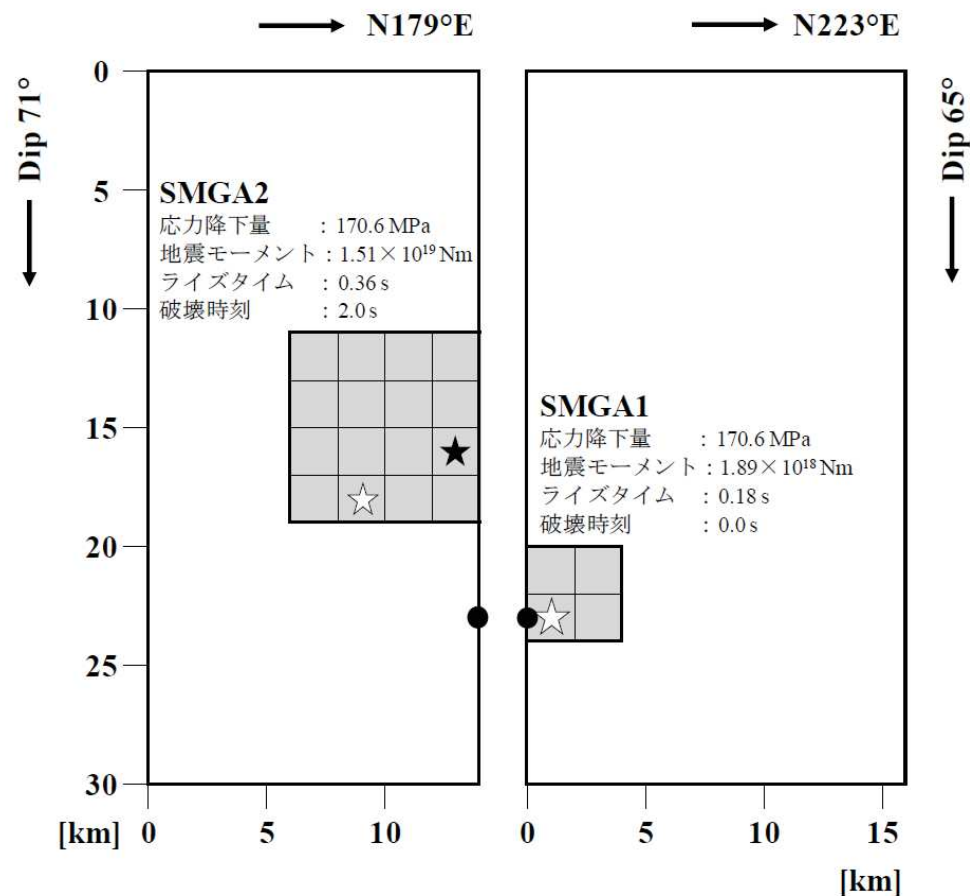
(5) 震源パラメータの検討結果①

➤ 全17観測点の平均でCGOFが小さく、さらに敷地及び青森県側北部の観測記録とシミュレーションの適合が良い以下のパラメータを採用した。なお、破壊時刻については目視で適合を確認した。

- ① ライズタイム: $\alpha=0.22$ SMGA1は0.18秒 SMGA2は0.36秒
- ② 破壊開始点(SMGA2): 4
- ③ 破壊時刻(SMGA2): 2.0秒



全17観測点のCGOF
ライズタイムと破壊開始点

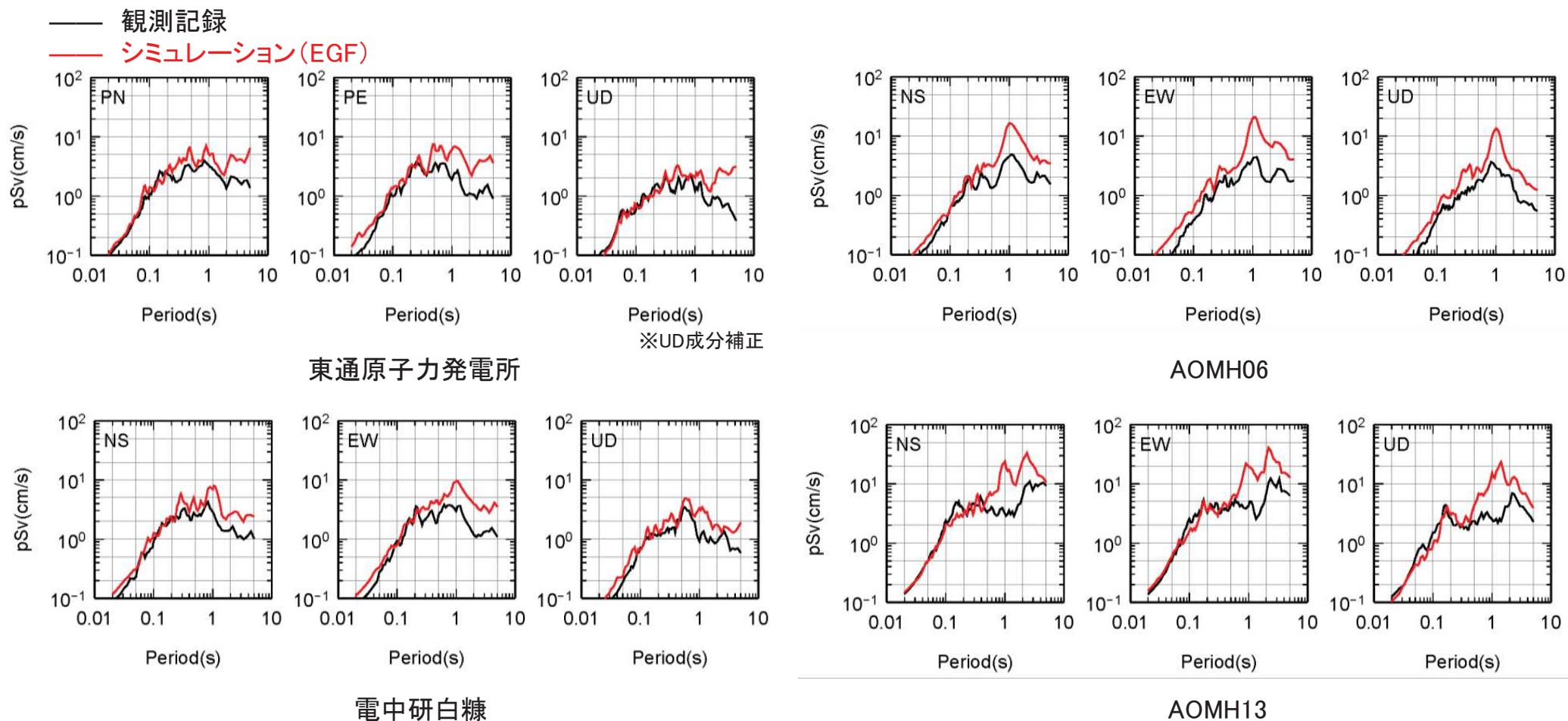


震源モデルの概念図

巨視的断層面はSuzuki *et al.* (2009)、☆: 破壊開始点、●: セグメントが接する点
★: 浅野・岩田(2009)の破壊開始点 (SMGA1は共通)

5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (5) 震源パラメータの検討結果②

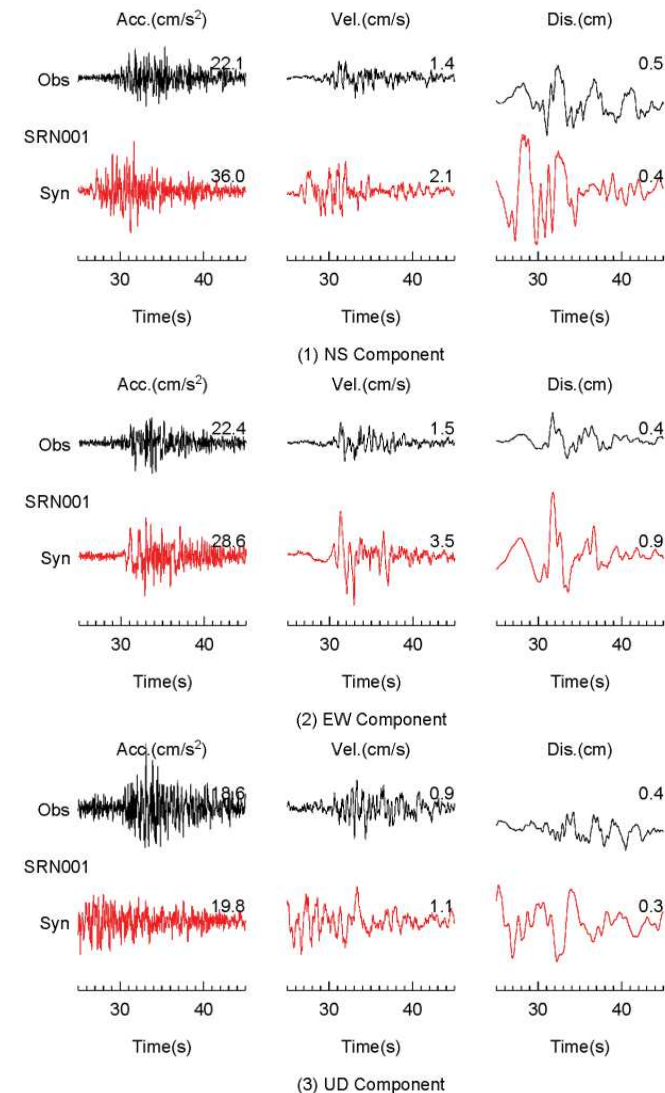
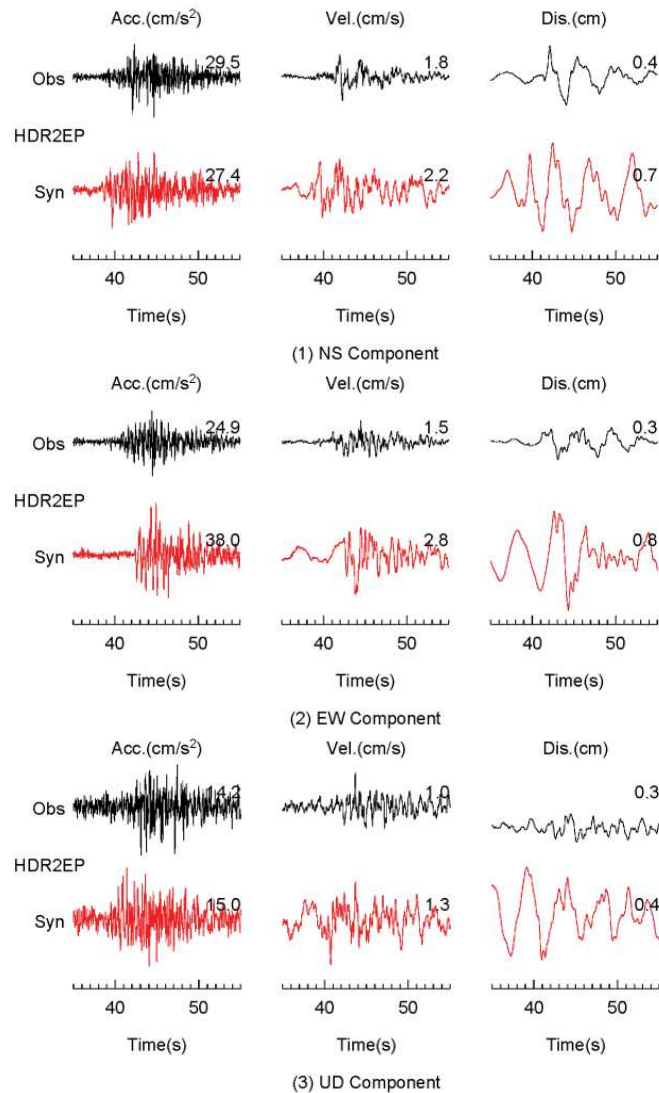
- 青森県4地点の観測記録とシミュレーション結果の応答スペクトルを示す。
- 東通原子力発電所のシミュレーション結果は、浅野・岩田(2009)の震源モデルによる評価結果と比べ観測記録との整合性が向上している。
- また、電中研白糖や青森県KiK-net2地点についても観測記録と概ね整合している。



5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (5) 震源パラメータの検討結果③

➤ 東通原子力発電所，電中研白糠の時刻歴波形を示す。

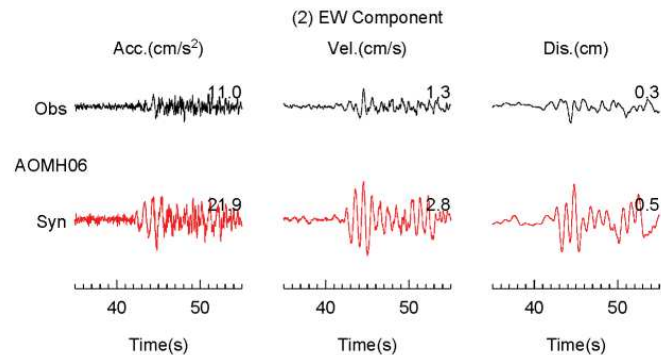
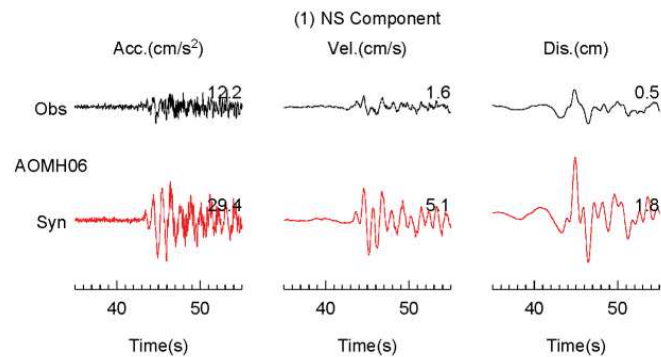
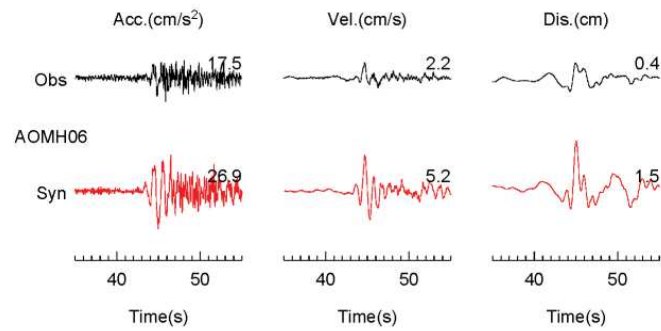
— 観測記録
— シミュレーション(EGF)



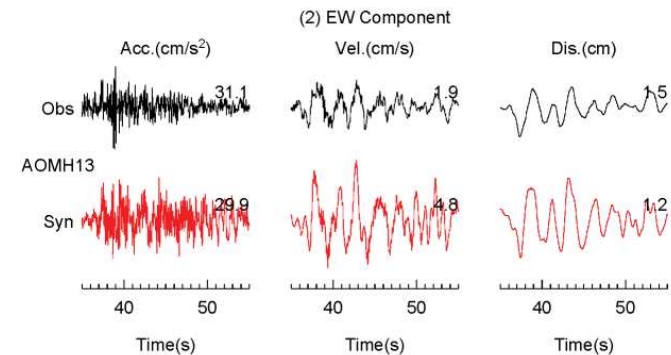
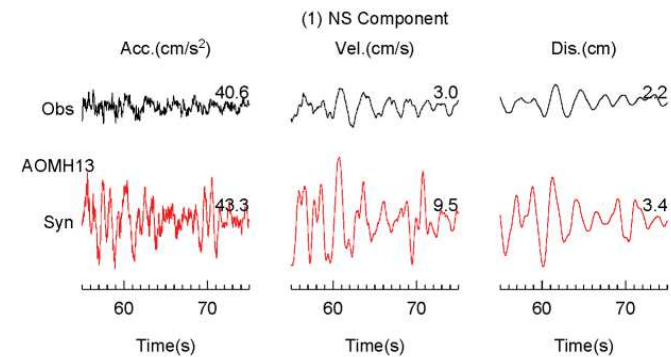
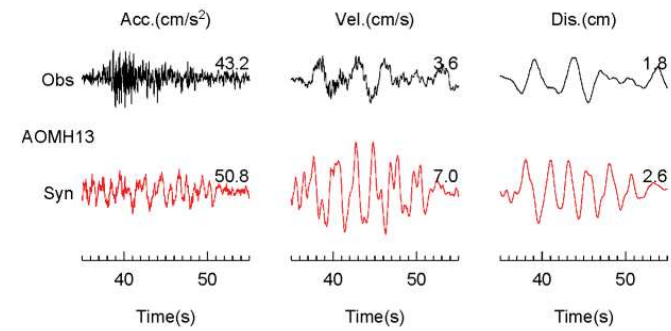
5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (5) 震源パラメータの検討結果④

➤ 青森県KiK-net 2地点の時刻歴波形を示す。

— 観測記録
— シミュレーション(EGF)



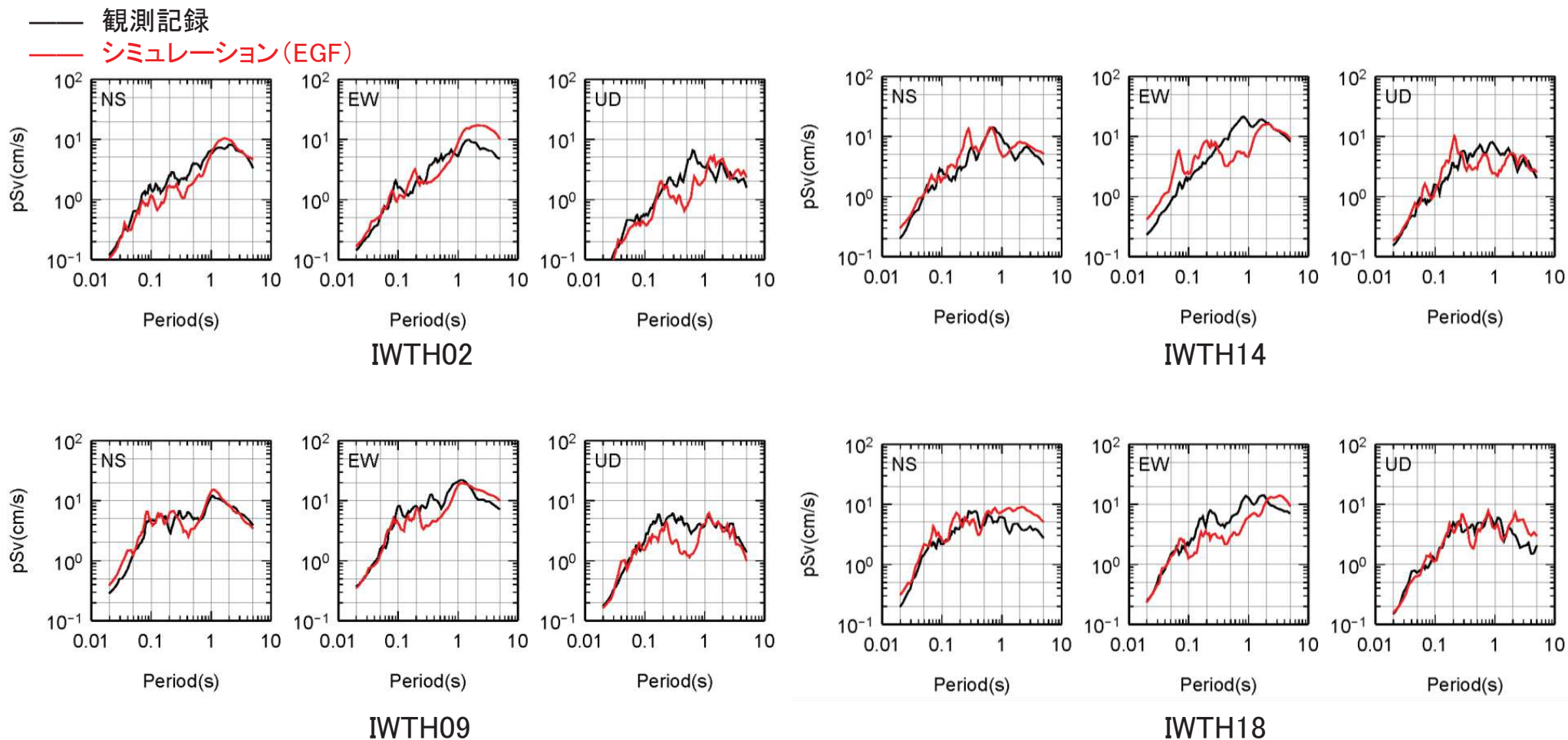
AOMH06



AOMH13

5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (5) 震源パラメータの検討結果⑤

- 岩手県の震源近傍KiK-net 4地点の観測記録とシミュレーション結果の応答スペクトル※を示す。
- シミュレーション結果は、観測記録と概ね整合している。



※ 時刻歴波形は、補足説明資料p.68～71を参照。

5.3 再現性向上を図った2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築 (5) 震源パラメータの検討結果 まとめ

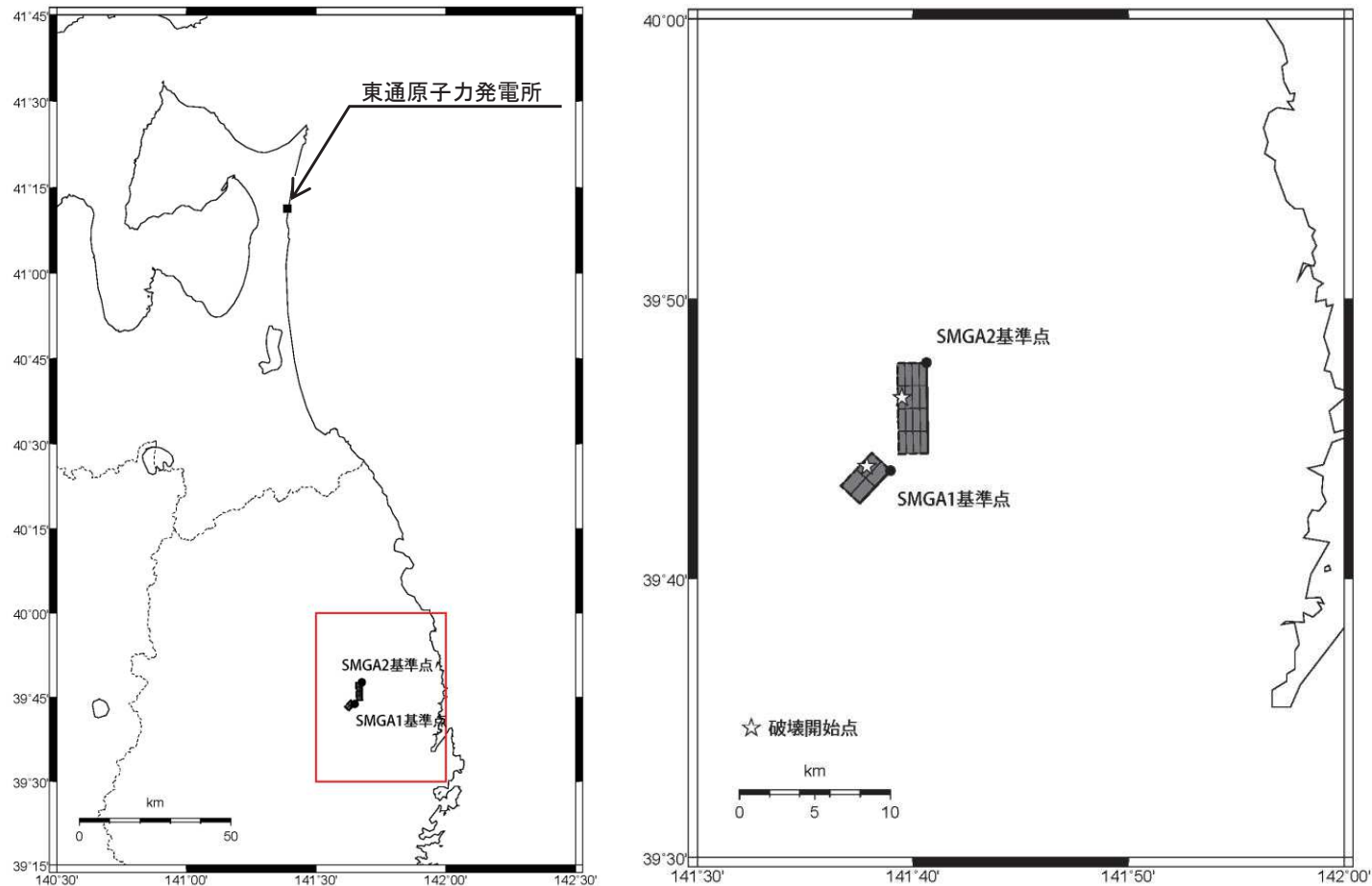
パラメータの検討結果のまとめ

- 浅野・岩田(2009)モデルをベースに、以下のとおりパラメータを変更すると、青森県側の観測点のシミュレーション結果の再現性が向上した。
 - ① ライズタイム: $\alpha=0.22$ SMGA1は0.18秒 SMGA2は0.36秒
 - ② 破壊開始点(SMGA2): 4
 - ③ 破壊時刻(SMGA2): 2.0秒
- また、見直したモデルは、岩手県側の観測点のシミュレーション結果においても浅野・岩田(2009)の震源モデル用いた検討と同程度の再現性となる。

以上のことから、東通原子力発電所のSGFによるシミュレーション解析には、浅野・岩田(2009)の見直しモデルを採用する。

5.4 2008年岩手県沿岸北部の地震のSGFによる強震動シミュレーション (1) 統計的グリーン関数法 震源断層モデル

- 前節(4)で再検討した震源パラメータに従い、東通原子力発電所において、統計的グリーン関数法(SGF)によるシミュレーション解析を実施した。
- SGFの断層モデル図(全体図)を示す。



赤枠の拡大図

2008年岩手県沿岸北部の地震のシミュレーション解析に用いる震源断層モデル

5.4 2008年岩手県沿岸北部の地震のSGFによる強震動シミュレーション (1) 統計的グリーン関数法 震源断層モデル

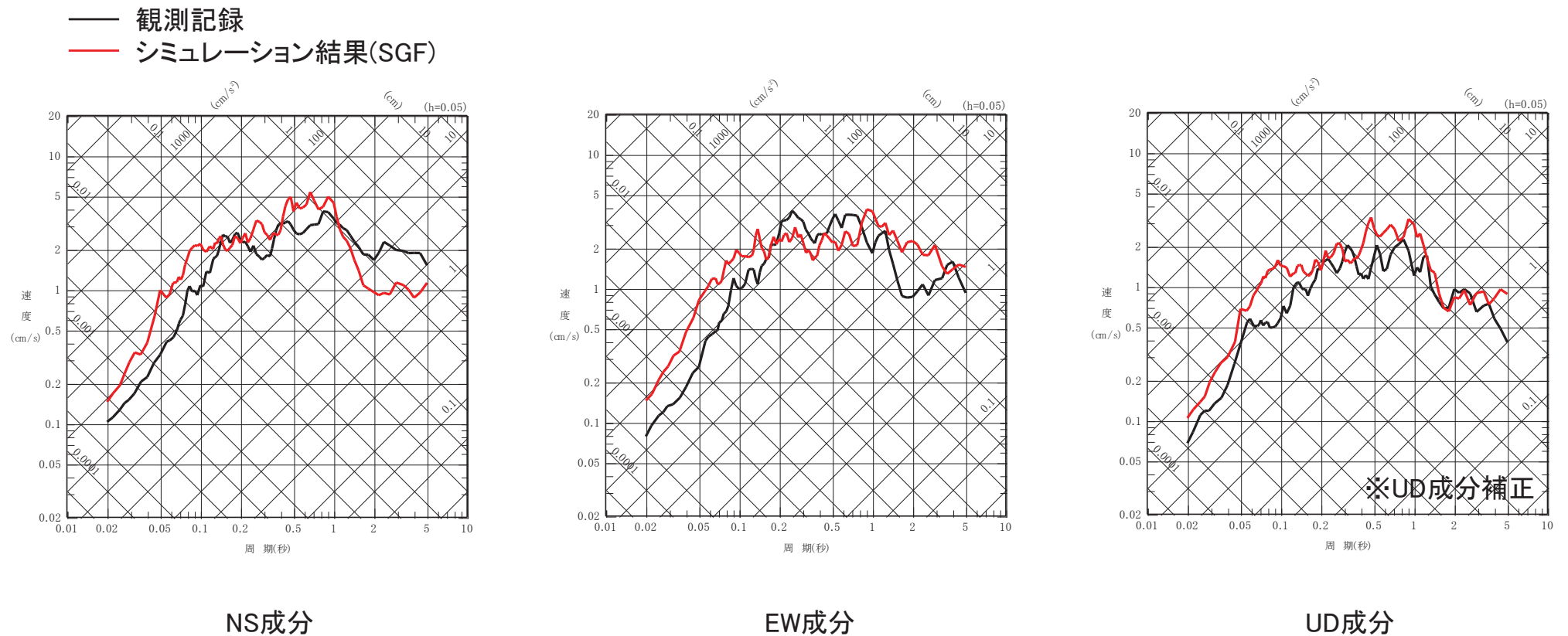
| 断層パラメータ | 記号 | SMGA1 | SMGA2 | 設定方法 |
|--------------|----------------|---|---|---|
| 断層位置 | - | N39.7311° , E141.6494° | N39.7954° , E141.6772° | 浅野・岩田(2009) |
| 走向 | θ | 223° | 179° | 浅野・岩田(2009) |
| 傾斜角 | δ | 65° | 71° | 浅野・岩田(2009) |
| 断層長さ | L | 3.0 km | 6.0 km | 浅野・岩田(2009) |
| 断層幅 | W | 3.0 km | 6.0 km | 浅野・岩田(2009) |
| 断層面積 | S | 9.0 km ² | 36.0 km ² | 浅野・岩田(2009) |
| 断層上端深さ | - | 106.0 km | 99.3 km | 浅野・岩田(2009) |
| 破壊開始点* | - | 前頁参照 | 前頁参照 | 設定 |
| 破壊伝播形式 | - | 同心円状 | 同心円状 | 設定 |
| 地震モーメント | M_0 | 1.89×10^{18} Nm | 1.51×10^{19} Nm | 浅野・岩田(2009) |
| モーメントマグニチュード | M_w | 6.1 | 6.7 | $M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$ |
| 気象庁マグニチュード | M_J | 6.8 | | 気象庁 |
| 剛性率 | μ | 8.06×10^{10} N/m ² | 8.06×10^{10} N/m ² | $\mu = \rho \beta^2$ |
| 密度 | ρ | 3.5 g/cm ³ | 3.5 g/cm ³ | Ludwig et al.(1970) |
| S波速度 | β | 4.8 km/s | 4.8 km/s | 浅野・岩田(2009) |
| 平均すべり量 | D | 2.60 m | 5.20 m | $D = M_0 / (\mu S)$ |
| 応力降下量 | $\Delta\sigma$ | 170.6 MPa | 170.6 MPa | 浅野・岩田(2009) |
| ライズタイム* | tr | 0.1808 s | 0.3616 s | $tr = \alpha W / V_r$, $\alpha = 0.22$ |
| 破壊時刻* | - | 0.0 s | 2.0 s | 設定 |
| 破壊伝播速度 | V_r | 3.65 km/s | 3.65 km/s | 浅野・岩田(2009) |
| 短周期レベル | A | 8.36×10^{19} Nm/s ² | 1.67×10^{20} Nm/s ² | $A = 4\pi (S/\pi)^{0.5} \Delta\sigma \beta^2$ |

パスのQ値; $154f^{0.91}$ (佐藤(2003)による)

※今回再検討したパラメータ

5.4 2008年岩手県沿岸北部の地震のSGFによる強震動シミュレーション (2) 統計的グリーン関数法 によるシミュレーション結果

- SGFによる地震動評価結果と自由地盤観測点の地震観測記録(岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)におけるはぎとり波)の比較を示す。
- 地震動評価結果は観測記録と概ね整合している。従って、同じ震源モデルを用いたシミュレーション解析において、EGFとSGFの評価結果が整合していることから、今回設定した地盤モデルは妥当と判断した。



2008年岩手県沿岸北部の地震の敷地における観測記録(岩盤上部の地震観測点におけるはぎとり波)とSGFによる地震動評価結果の応答スペクトルによる比較

6. まとめ

6. まとめ

1. 敷地の地質・地質構造及び解放基盤表面の設定

- 敷地には、新第三系の岩盤が相当な広がりをも有して分布し、速度構造は概ね水平な成層構造で、著しい高低差は認められない。解放基盤表面は、著しい風化が認められずVsが約0.7km/s以上の岩盤である原子炉建屋設置レベル(T.P.-16.3m)に設定する。

2. 敷地地盤の振動特性

- 原子炉建屋直下と自由地盤の水平アレイ観測等から、自由地盤の岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)の揺れは解放基盤表面と同等以上であり、解放基盤表面の振動特性は自由地盤の岩盤上の地震観測点で代表する。
- 敷地で実施している地震観測や臨時地震観測、及び敷地周辺の地震観測の記録を用いた検討から、自由地盤の地震観測点(T.P.+2.0m)の振動特性は一般的な岩盤における振動特性と同等であり、また、地下構造には振動特性に影響を与えるような著しい不均質性はないと判断される。従って解放基盤表面の地震動評価に用いる地盤モデルについては一次元地盤モデルを適用する。

3. 地盤モデルの設定

- 地震動評価に用いる地盤モデルは、敷地の観測記録等に基づき、はぎとり地盤モデル、統計的グリーン関数法による地震動評価に用いる地盤モデル及び理論的手法に用いる地盤モデルを設定した。

4. 地盤モデルの妥当性の検証

- 経験的グリーン関数法によって観測記録との整合性を確認した断層モデルを用い、設定した地盤モデルを反映して実施した統計的グリーン関数法による強震動シミュレーション解析は観測記録と整合しており、設定した地盤モデルが妥当であると判断した。

参考文献

3. 敷地地盤の振動特性

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. 柴田明德(2014) :最新 耐震構造解析, 森北出版
3. Takahiro Shiina, Junichi Nakajima, Toru Matsuzawa, Genti Toyokuni, Saeko Kita(2017) :Depth variation in seismic velocity in the subducting crust : Evidence for fluid-related embrittlement for intermediate-depth earthquakes, Geophysical Research Letters.
4. Li Yong-Gang, Peter Leary, Keirri Aki, Peter Malin(1990) : Seismic Trapped Modes in the Oroville and San Andreas Fault Zones, Science, vol.249
5. 伊藤久男(1995) : 地下構造を描く技術の最前線—地下き裂・地震断層の評価をめぐる—, 応用物理 第64巻 第12号
6. 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅明(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, 2006.10
7. 澤田義博, 田澤芳博, 矢島浩, 佐々木俊二, 笠原敬司(2018) : 高密度地震観測に基づく地盤の不整形性の検出方法と地震増幅特性のバラツキの検討, 第15回日本地震工学シンポジウム
8. 東貞成, 芝良昭, 佐藤浩章, 佐藤雄亮, 中島正人, 酒井理哉, 佐藤清隆(2009) : 電力重要施設の設計用地震動策定法, 電力中央研究所報告N04, 2009
9. S. Noguchi, S. Sekine, Y. Sawada, K. Kasahara, S. Sasaki, Y. Tazawa, H. Yajima(2017) : Earthquake monitoring using dense local seismic network, AS-net, in northern Tohoku, Japan, 16th World Conference on Earthquake

4. 地盤モデルの設定

1. 池浦友則(2009) : 鉛直アレイ観測点間で相関する地震動成分の地盤伝達関数, 日本地震工学会論文集 第9巻, 第1号, 2009
2. 梅田尚子, 小林喜久二(2010) : 地震記録の逆解析による地下構造推定手法の適用性検討, 第13回地震工学シンポジウム論文集
3. Kobayashi, K., Uetake, T., Mashimo, M. and Kobayashi, H.(2000) : Estimation of deep underground velocity structure by inversion of spectral ratio of horizontal to vertical component in P-wave part of earthquake motion, 12WCEE, paper No. 2658, 2000.
4. Rachel E. Abercrombie(1997) : Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep borehole recordings, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.87, No.3, pp.731-744.
5. P. E. Malin, J. A. Waller, R. D. Borchardt, E. Cranswick, E. G. Jensen, J. Van Schaack(1998) : Vertical seismic profiling of Oroville microearthquakes: Velocity spectra and particle motion as a function of depth, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.78, No.2, pp.401-420.
6. Richard C. Aster, Peter M. Shearer(1991) : High-frequency borehole seismograms recorded in the San Jacinto Fault zone, Southern California Part 2. Attenuation and site effects, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.81, No.4, pp.1081-1100.
7. Ralph J. Archuleta, Sandra H. Seale, Peter V. Sangas, Lawrence M. Baker, Scott T. Swain(1992) : Garner Valley downhole array of accelerometers: Instrumentation and preliminary data analysis, Bulletin of the Seismological Society of America ,Vol.82, No.4, pp.1592-1621.

参考文献

8. Sam Blakeslee, Peter Malin(1991): High-frequency site effects at two Parkfield downhole and surface stations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.81, No.2, pp.332-345.
 9. Denis Jongmans and Peter E. Malin(1995): Microearthquake S-Wave Observations from 0 to 1 km in the Varian Well at Parkfield, California, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, No.6, pp.1805-1820.
 10. Egill Hauksson, Ta-liang Teng, Thomas L. Henyey(1987): Results from a 1500 m deep, three-level downhole seismometer array: Site response, low Q values, and f_{max} , Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.77, No.6, pp.1883-1904.
 11. 地震調査研究推進本部 (2004): 三陸沖北部の地震を想定した強震動評価について
 12. 永井理子, 菊地正幸, 山中佳子 (2001): 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究—1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較—, 地震 第2輯, 第54巻
 13. 藤江剛 (1999): 屈折および反射波を用いた走時インバージョンの開発と三陸沖プレート境界の地殻構造への適用. 東京大学博士論文
 14. 三浦誠一・高橋成美・仲西理子・小平秀一・金田義行 (2001): 日本海溝前弧域(宮城沖)における地震学的探査—KY9905航海—, JAMSTEC深海研究, 第18号, 145-156.
5. 地盤モデルの妥当性の検証
1. 浅野公之, 岩田知孝 (2009): 経験的グリーン関数法を用いた2008年7月24日岩手県沿岸北部のスラブ内地震の震源モデルの推定, 日本地球惑星科学連合2009年大会, S152-009, 2009年5月.
 2. 佐藤智美 (2003): 中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究, 土木学会地震工学論文集
 3. 三宅弘恵, 岩田知孝, 入倉孝二郎 (1999): 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日 (M_{JMA} 6.5) 及び5月13日 (M_{JMA} 6.3) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震 第2輯 第51巻
 4. Wataru Suzuki, S. Aoi, and H. Sekiguchi (2009): Rupture Process of the 2008 Northern Iwate Intraslab Earthquake Derived from Strong-Motion Records. Bulletin of the Seismological Society of America, 99-5, 2825-2835
 5. Dreger, D. S., G. C. Gregory, C. Beroza, S. M. Day, C. A. Goulet, T. H. Jordan, P. A. Spudich and, J. P. Stewart (2015): Validation of the SCEC Broadband Platform V14.3 Simulation Methods Using Pseudospectral Acceleration Data, Seismological Research Letters, Vol. 86, pp. 39-47.
 6. 浅野公之, 岩田知孝, 入倉孝二郎 (2004): 2003年5月26日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, 地震 第2輯 第57巻
 7. 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/>>
 8. William J. Liding, John E. Nafe, Charles L. Drake(1970): Seismic Reflection, the Sea. Vol. 4 (Part 1), Wiley-Interscience, New York, 53-84.

参考資料

- 参考1. 観測記録の信号成分から伝達関数を求める方法
- 参考2. 前回提示地盤モデルとの差異

参考1. 観測記録の信号成分から伝達関数を求める方法

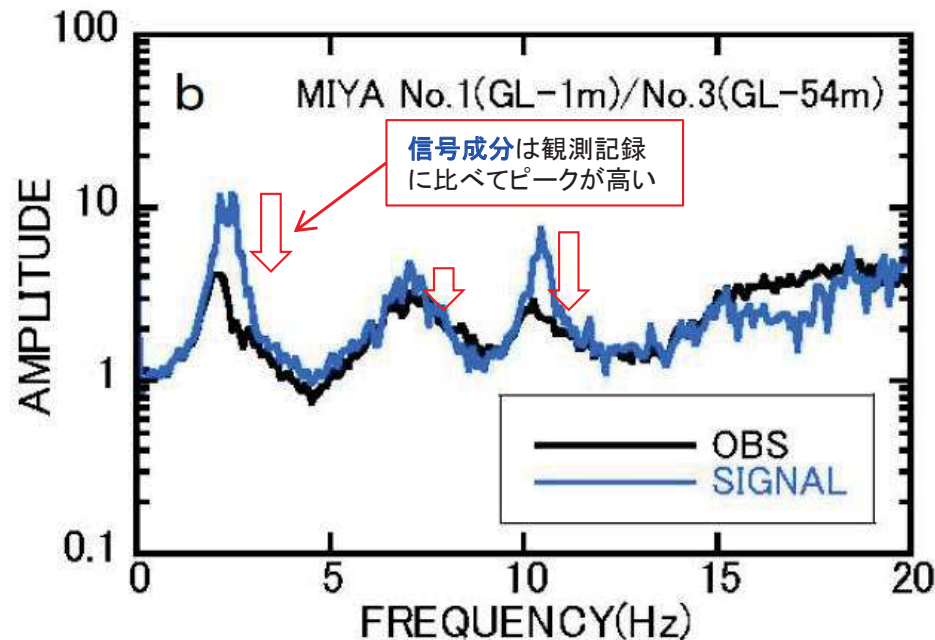
(1) 池浦(2009)の概要

S169

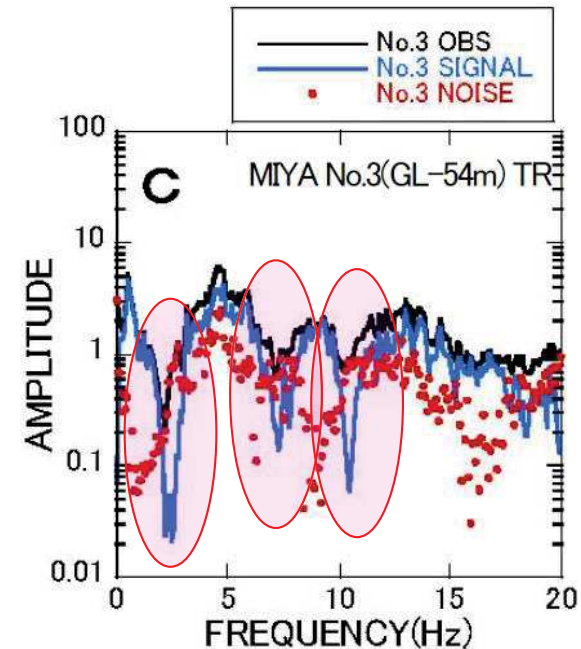
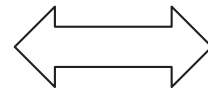
池浦(2009)は、観測地震動をコヒーレントな波動成分(信号成分)とインコヒーレントな成分(雑音成分)に分離する方法及び信号成分を対象とした伝達関数の計算方法を提案している。

【池浦(2009)の概要】

- 地盤の波動伝播現象には散乱等のインコヒーレントな影響が含まれることから、次元波動論を適用する場合、コヒーレントな成分に着目した検討を行う必要がある。
- 観測地震動をコヒーレントな信号成分とインコヒーレントな雑音成分に分離する手法を提案した。
- 仙台高密度アレイMIYA地点に適用し、信号成分と雑音成分の振幅特性を調べ、以下を得た。
 - A) 鉛直アレイ観測記録から地盤内部の波動伝播を解釈する際には、**観測点間のインコヒーレントな雑音成分の存在は無視できない。**
 - B) 観測記録に含まれるインコヒーレントな雑音成分は、伝達関数のピークを抑制しており、その結果、**減衰定数の過大評価の原因**となっている。



ピークに差が見られる箇所は、雑音成分が信号成分をマスクしている帯域に該当する。



信号成分と観測記録の伝達関数の比較(一部加筆)

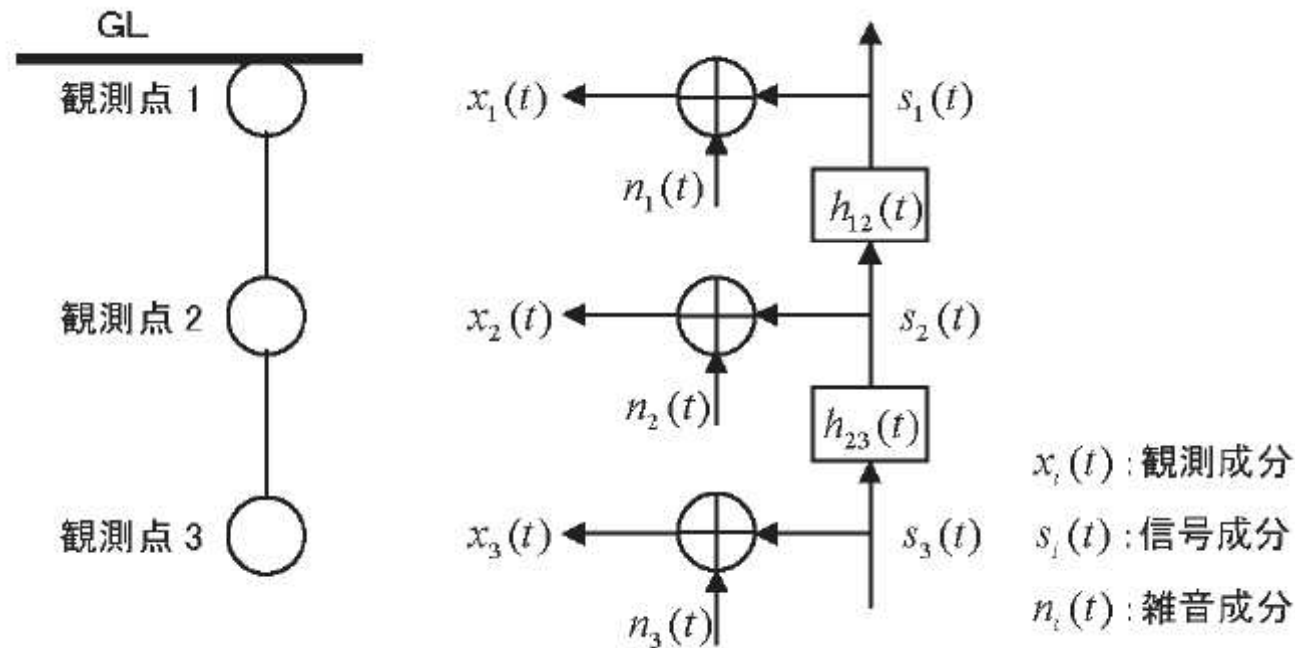
$$\text{信号成分(SIGNAL)} \quad H_{ij}(f) = \frac{C_{ij}(f)}{D_{ij}(f)} \quad (i, j = 1 \sim N, i \neq j)$$

$$\text{観測記録(OBS)} \quad H'_{ij}(f) = \sqrt{\frac{C_{ii}(f)C_{ij}(f)}{C_{ji}(f)C_{jj}(f)}}$$

信号成分と雑音成分の基準化パワースペクトル
(一部加筆)

参考1. 観測記録の信号成分から伝達関数を求める方法 (2) 信号成分から伝達関数を求める方法①

【池浦(2009)における信号成分伝達関数の算定概要】



池浦(2009)より

- ・地震動 $x_i(t)$ は、各観測点において信号成分 $s_i(t)$ に雑音成分 $n_i(t)$ が加わった形で観測されている。
- ・ $s_i(t)$ は、地盤内部でコヒーレントに伝播する地震動を各観測点において観測した信号成分を表す。
- ・ $n_i(t)$ は、各観測点においてそれらとは独立に入射するインコヒーレントな雑音成分を表す。

参考1. 観測記録の信号成分から伝達関数を求める方法 (3) 信号成分から伝達関数を求める方法②

i 観測点($i=1\sim N$)の観測地震動が信号成分と雑音成分の和は、

$$x_i(t) = s_i(t) + n_i(t) \quad (1)式$$

で表され、 i 観測点の信号成分は j 観測点の信号成分と次の線形関係で結ばれているものとする。

$$s_i(t) = h_{ij}(t) * s_j(t) \quad (2)式$$

ここで、 $h_{ij}(t)$: j 観測点から i 観測点へのインパルス応答
* : コンボリューション

(2)式をもとに、次式が得られる。

$$D_{ii}(f) = H_{ij}(f) H_{ij}^*(f) D_{jj}(f) \quad (3)式$$

また、 $D_{ij}(f)$, $H_{ij}(f)$, $D_{jj}(f)$ は、次式の関係にある。

$$D_{ij}(f) = H_{ij}(f) D_{jj}(f) \quad (4)式$$

ここで、 $D_{ij}(f)$: $S_i(t)$ と $S_j(t)$ のクロススペクトル
 $D_{ii}(f)$, $D_{jj}(f)$: それぞれ $S_i(t)$ と $S_j(t)$ のパワースペクトル
 $H_{ij}(f)$: $h_{ij}(t)$ のフーリエ変換, $S_j(f)$ ($S_j(t)$ のフーリエ変換) から $S_i(f)$ ($S_i(t)$ のフーリエ変換) の伝達関数
 $H_{ij}^*(f)$: $H_{ij}(f)$ の複素共役

このとき、 $x_i(t)$ と $x_j(t)$ のクロススペクトル $C_{ij}(f)$ は、 $n_i(t)$ に関する無相関の条件を適用すると、

$$C_{ij}(f) = \begin{cases} D_{ii}(f) + E_{ij}(f) & (i=j) \\ D_{ij}(f) & (i \neq j) \end{cases} \quad (5)式$$

ここで、 $E_{ii}(f)$: $n_i(t)$ のパワースペクトル

参考1. 観測記録の信号成分から伝達関数を求める方法 (4) 信号成分から伝達関数を求める方法③

$x_i(t)$ と $x_j(t)$ のコヒーレンス $Coh_{ij}(f)$ は次式で定義される。

$$Coh_{ij}(f) = \frac{C_{ij}(f) C_{ij}^*(f)}{C_{ii}(f) C_{jj}(f)} \quad (6)式$$

(6)式の右辺の分子は(3)～(5)式を適用し、次式となる。

$$C_{ij}(f)C_{ij}^*(f) = D_{ij}(f)D_{ij}^*(f) = H_{ij}(f)H_{ij}^*(f)D_{jj}(f)D_{jj}(f) = D_{ii}(f)D_{jj}(f) \quad (7)式$$

ここで、 $C_{ii}(f)$ に含まれる $D_{ii}(f)$ の割合を信号パワー比 $p_{ii}(f)$ を

$$p_{ii}(f) = D_{ii}(f) / C_{ii}(f) \quad (8)式$$

と定義すると、 $Coh_{ij}(f)$ は次のように表される。

$$Coh_{ij}(f) = \frac{D_{ii}(f) D_{jj}(f)}{C_{ii}(f) C_{jj}(f)} = p_{ii}(f) p_{jj}(f) \quad (9)式$$

$p_{ii}(f)$ を未知数とすると観測点が N 個のとき未知数は N 個であるが、2観測点間の観測地震動のコヒーレンスは $N(N-1)/2$ 個与えられるので、 $N \geq 3$ であれば解ける。

4観測点以上の鉛直アレイの場合では $N < N(N-1)/2$ なので、未知数に比べて方程式が多い優決定問題となり、最小二乗解を求める問題となる。

以上により $p_{ii}(f)$ が求められると、 j 観測点から i 観測点への信号成分の伝達関数が次のように算出される。

$$H_{ij}(f) = D_{ij}(f) / D_{jj}(f) = C_{ij}(f) / D_{jj}(f) = C_{ij}(f) / [C_{jj}(f)p_{jj}(f)]$$

参考1. 観測記録の信号成分から伝達関数を求める方法

(5) 観測記録に含まれる雑音成分が伝達関数に与える影響

○鉛直アレイの観測点間にインコヒーレントな成分(雑音成分)が含まれる場合は、伝達関数の、特に固有振動数付近のピーク高さが減少するため、これに基づき評価した減衰は過大評価となりやすい。インコヒーレントな成分(雑音成分)としては、岩盤の不均質性に起因する散乱波等が該当する。

★入出力に一樣な観測ノイズを含む振動システムの伝達関数の例

(『地震動 その合成と波形処理(理論地震動研究会 編著)(1994)』(鹿島出版会)から引用)

出力: ①応答値

②ホワイトノイズ(入出力で同じ振幅)

固有振動数1.0Hz

減衰5%の定常線形1自由度システム

入力: ①0.5~1.0Hzでゆるやかに卓越するスペクトル特性を持つ波

②ホワイトノイズ(入出力で同じ振幅)

$H_0(\omega)$: 真の伝達関数

$H_1(\omega)$: 入力側のノイズの影響を受ける伝達関数

$$H_1(\omega) = S_{xy}(\omega) / S_{xx}(\omega) = H_0(\omega) \cdot coh^2_x(\omega)$$

$H_2(\omega)$: 出力側のノイズの影響を受ける伝達関数

$$H_2(\omega) = S_{yy}(\omega) / S_{yx}(\omega) = H_0(\omega) / coh^2_y(\omega)$$

$H_R(\omega)$: 観測記録のフーリエスペクトル比から算定される 一般に用いられる伝達関数

$$H_R(\omega) = Y(\omega) / X(\omega) \text{の平均} = H_0(\omega) \cdot \sqrt{coh^2_x(\omega) / coh^2_y(\omega)}$$

ここに、 $S_{xy}(\omega)$: 入力xと出力yのクロススペクトル、 $S_{xx}(\omega)$: 入力xのパワースペクトル
 $coh^2_x(\omega)$, $coh^2_y(\omega)$: それぞれ入力側(x), 出力側(y)の観測におけるノイズの混入度合
 (池浦(2009)では、この値を算出する。)

図1 振動システムと各種伝達関数

【伝達関数の特徴】

・A部分(長周期の波が入力する部分)

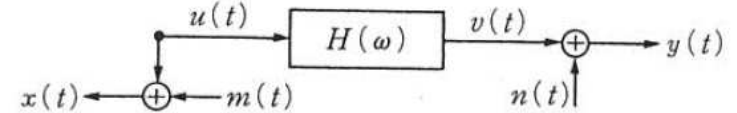
長周期の波が入力する周期帯では、質点系は相対的に剛構造的挙動を示すため、増幅率は1になる。その場合、入力側、出力側とも、信号成分に対するノイズの割り合いが同じになるため、 H_R が H_0 (真の伝達関数)の推定値として適切になる。

・B部分(固有振動数付近)

固有振動数付近では、応答が大きい=出力側の信号成分が大きい=相対的にノイズの比率が小さいため、 H_2 が H_0 (真の伝達関数)の推定値として適切になる。一方、入力側はモードの節になるため相対的なノイズの影響が大きくなり、 H_1 は過小評価となり、また、 H_R も H_0 に比べ過小になる。

・C部分(短周期の波が入力する部分)

短周期の波が入力する周期帯では、質点系は相対的に柔構造的挙動を示すため、応答値は入力値よりも小さいものになる。その場合、出力側における信号成分に対するノイズの割り合いが大きくなるため、 H_2 は H_0 (真の伝達関数)から乖離していく。



x,y: 観測記録 u,v: 信号成分 m,n: ノイズ

図2 入出力に観測ノイズを含むシステム

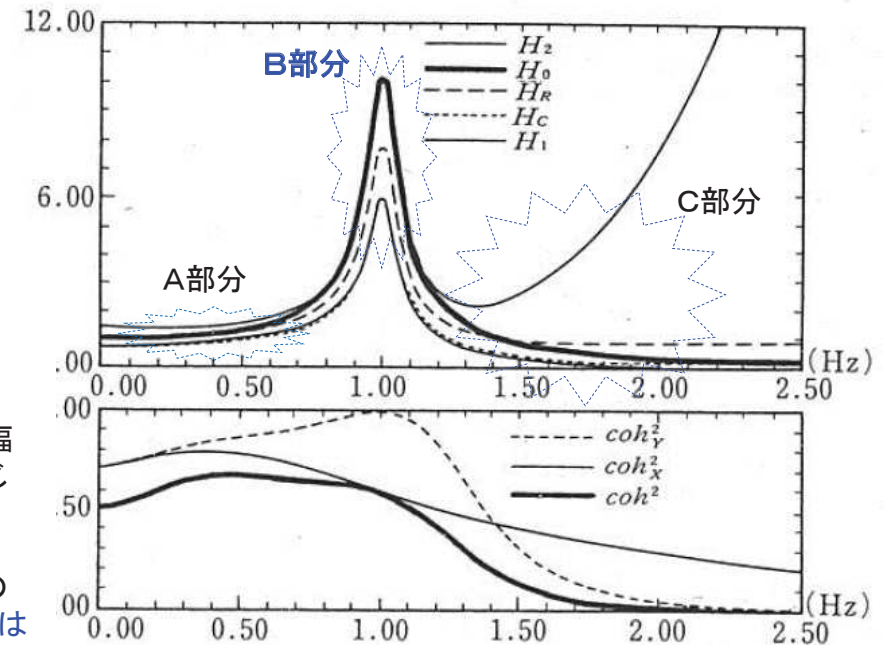
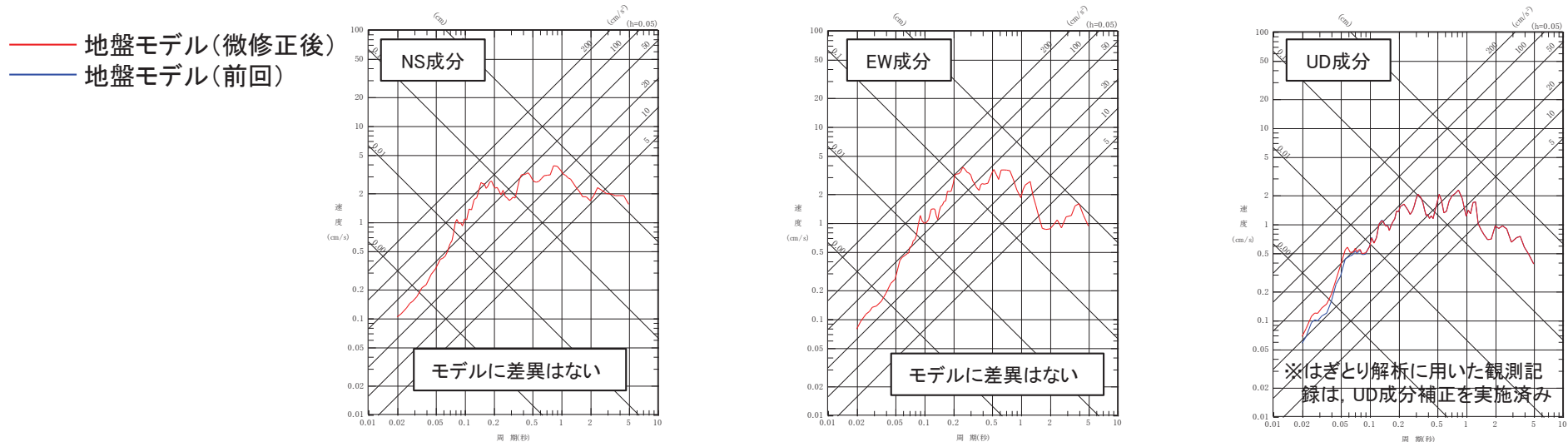


図3 入出力に一樣な観測ノイズを含む振動システムの伝達関数推定値とコヒーレンス関数

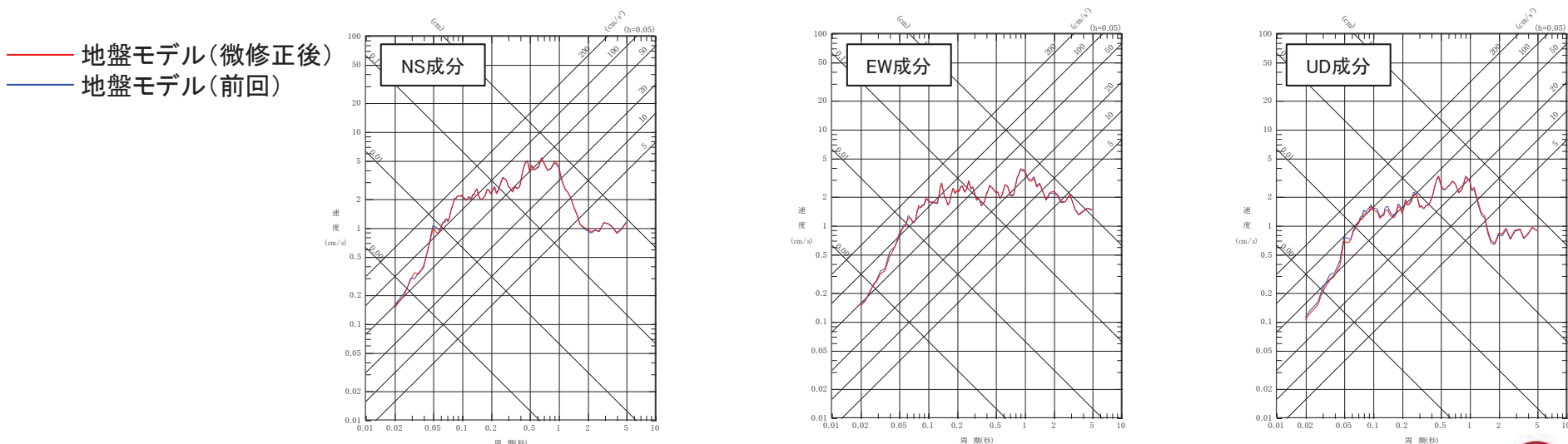
参考2. 前回提示地盤モデルとの差異

(1) はぎとり波及び統計的グリーン関数法によるシミュレーション結果の比較

- 今回の地盤モデル策定においては、T.P.+2m観測点のUD成分補正(同時性の補正、極短周期成分の補正)を反映している。そのため前回(第808回審査会合)提示した地盤モデルと若干の差異が生じており、その違いが地震動評価に与える影響を、「5. 地盤モデルの妥当性の検証」において強震動シミュレーションを行った2008年岩手県沿岸北部の地震を例に示す。
- UD成分のはぎとり波の極短周期成分で若干の違いは認められるが、統計的グリーン関数法による地震動評価結果の違いはほとんどない。



観測記録の比較〔2008年岩手県沿岸北部の地震, はぎとり波(T.P.+2.0m)〕



統計的グリーン関数法によるシミュレーション結果の比較(2008年岩手県沿岸北部の地震)

参考2. 前回提示地盤モデルとの差異 (2)はぎとり地盤モデルの比較(微修正前後)

【青文字】地震観測点位置を示す。
 Vs<0.7km/sの表層を示す。

前回(第808回審査会合)はぎとり地盤モデル

| 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} | 1.01f ^{0.50} |
| +11.0 | 0.5 | 1.90 | 60 | 180 | 0.52f ^{0.53} | 1.01f ^{0.50} |
| +10.0 | 1 | 1.90 | 280 | 480 | 9.94f ^{1.00} | 1.00f ^{1.00} |
| +8.0 | 2 | 1.90 | 280 | 480 | 9.94f ^{1.00} | 1.00f ^{1.00} |
| +6.0 | 2 | 1.90 | 380 | 810 | 9.97f ^{1.00} | 1.24f ^{0.53} |
| +3.0 | 3 | 1.90 | 920 | 1710 | 9.97f ^{1.00} | 1.24f ^{0.53} |
| +2.0 | 1 | 2.24 | 1300 | 2250 | 1.02f ^{0.83} | 1.53f ^{0.72} |
| -7.0 | 9.0 | 2.24 | 1300 | 2250 | 1.02f ^{0.83} | 1.53f ^{0.72} |
| -62.0 | 55.0 | 2.24 | 1790 | 3020 | 1.02f ^{0.83} | 1.53f ^{0.72} |
| -82.8 | 20.8 | 2.72 | 1800 | 3200 | 1.02f ^{0.83} | 1.53f ^{0.72} |
| -106.0 | 23.2 | 2.72 | 1800 | 3200 | 1.02f ^{0.83} | 1.53f ^{0.72} |
| -166.0 | 60.0 | 2.30 | 1910 | 3500 | 1.57f ^{0.88} | 1.37f ^{0.91} |
| -190.0 | 24.0 | 2.30 | 2030 | 3540 | 1.57f ^{0.88} | 1.37f ^{0.91} |
| -252.0 | 62.0 | 2.30 | 2100 | 3600 | 1.57f ^{0.88} | 1.37f ^{0.91} |
| -282.8 | 30.8 | 2.33 | 2090 | 3690 | 1.57f ^{0.88} | 1.37f ^{0.91} |
| | ∞ | 2.33 | 2090 | 3690 | 1.57f ^{0.88} | 1.37f ^{0.91} |



はぎとり地盤モデル(微修正後)

| 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} |
| -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} |

参考2. 前回提示地盤モデルとの差異

(3)統計的グリーン関数法に用いる地盤モデルの比較(微修正前後)

【青文字】地震観測点位置を示す。

前回(第808回審査会合)統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル

| 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 | — | — | — | — | — | — |
| -7.0 | 9.0 | 2.24 | 1300 | 2250 | 1.23f ^{0.74} | 3.06f ^{0.51} |
| -62.0 | 55.0 | 2.24 | 1790 | 3020 | 1.23f ^{0.74} | 3.06f ^{0.51} |
| -82.8 | 20.8 | 2.72 | 1800 | 3200 | 1.23f ^{0.74} | 3.06f ^{0.51} |
| -106.0 | 23.2 | 2.72 | 1800 | 3200 | 1.23f ^{0.74} | 3.06f ^{0.51} |
| -166.0 | 60.0 | 2.30 | 1910 | 3500 | 8.91f ^{0.94} | 3.55f ^{0.76} |
| -190.0 | 24.0 | 2.30 | 2030 | 3540 | 8.91f ^{0.94} | 3.55f ^{0.76} |
| -252.0 | 62.0 | 2.30 | 2100 | 3600 | 8.91f ^{0.94} | 3.55f ^{0.76} |
| -282.8 | 30.8 | 2.33 | 2090 | 3690 | 8.91f ^{0.94} | 3.55f ^{0.76} |
| -553.8 | 271.0 | 2.45 | 2440 | 3760 | 100 | 100 |
| -1484.8 | 931.0 | 2.45 | 2450 | 3930 | 100 | 100 |
| -2407.8 | 923.0 | 2.46 | 2490 | 3940 | 100 | 100 |
| -2987.8 | 580.0 | 2.52 | 2780 | 4060 | 100 | 100 |
| | ∞ | 2.63 | 3360 | 5800 | 150 | 150 |

統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル(微修正後)

| 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 | — | — | — | — | — | — |
| -7.0 | 9.0 | 2.24 | 1300 | 2250 | 1.23f ^{0.74} | 2.33f ^{0.50} |
| -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 |
| | ∞ | 2.63 | 3340 | 5800 | 150 | 150 |