

島根原子力発電所 震源を特定せず策定する地震動について

平成26年6月27日
中国電力株式会社

本日の説明内容

震源を特定せず策定する地震動の検討対象の16地震

○「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」に示される16地震



1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

○No. 1の2008年岩手・宮城内陸地震は、「地域差」の観点で整理
 ○No. 2の2000年鳥取県西部地震は、島根原子力発電所の周辺地域で発生した地震であるため、震源近傍の観測記録を収集して検討

《説明内容》
 ・2008年岩手・宮城内陸地震は、地質・地質構造の観点で整理
 ・2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム(監査廊)の観測記録を震源を特定せず策定する地震動として考慮



2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

○No. 3～16の14地震について、震源近傍の観測記録を収集して検討
 ○収集した観測記録のうち、敷地に与える影響が大きいと考えられる観測記録を用いて基盤地震動を評価

《説明内容》
 ・断層最短距離及び地盤条件(AVS30)を考慮して、14地震の震源近傍の観測記録を収集
 ・2004年北海道留萌支庁南部地震のHKD020(港町)の基盤地震動に基づき設定した地震動を震源を特定せず策定する地震動として考慮



3. 「震源を特定せず策定する地震動」の策定

○検討対象の16地震に関する上記1及び2の検討結果に基づき、震源を特定せず策定する地震動を策定

《説明内容》
 ・震源を特定せず策定する地震動として考慮した地震動についてのまとめ、及び今後の取り組みについて整理

検討対象地震(16地震)

No	地震名	日時	規模	No	地震名	日時	規模
1	2008年岩手・宮城内陸地震	2008/06/14, 08:43	Mw6.9	9	2011年静岡県東部地震	2011/03/15, 22:31	Mw5.9
2	2000年鳥取県西部地震	2000/10/06, 13:30	Mw6.6	10	1997年山口県北部地震	1997/06/25, 18:50	Mw5.8
3	2011年長野県北部地震	2011/03/12, 03:59	Mw6.2	11	2011年茨城県北部地震	2011/03/19, 18:56	Mw5.8
4	1997年3月鹿児島県北西部地震	1997/03/26, 17:31	Mw6.1	12	2013年栃木県北部地震	2013/02/25, 16:23	Mw5.8
5	2003年宮城県北部地震	2003/07/26, 07:13	Mw6.1	13	2004年北海道留萌支庁南部地震	2004/12/14, 14:56	Mw5.7
6	1996年宮城県北部(鬼首)地震	1996/08/11, 03:12	Mw6.0	14	2005年福岡県西方沖地震の最大余震	2005/04/20, 06:11	Mw5.4
7	1997年5月鹿児島県北西部地震	1997/05/13, 14:38	Mw6.0	15	2012年茨城県北部地震	2012/03/10, 02:25	Mw5.2
8	1998年岩手県内陸北部地震	1998/09/03, 16:58	Mw5.9	16	2011年和歌山県北部地震	2011/07/05, 19:18	Mw5.0

1 . Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討	3
2 . Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討	53
3 . 「震源を特定せず策定する地震動」の策定	122

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(概要)

■ 概要(発生日時, 地震規模等)

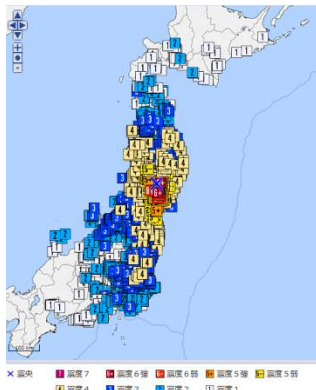
- 地震発生日時 (気象庁他)
 - ・発生日時: 平成20年6月14日 8時43分
 - ・地震規模: $M_j 7.2$ ($M_w 6.9$)
 - ・震源深さ: 8km
 - ・震源位置: 北緯 $39^{\circ} 1.7'$, 東経 $140^{\circ} 52.8'$
- 各地の震度及び被害状況

各地の震度(気象庁)は以下のとおり。

 - ・震度6強: 岩手県 奥州市
宮城県 栗原市
 - ・震度6弱: 宮城県 大崎市
 - ・震度5強: 岩手県 北上市, 一関市, 金ヶ崎町
平泉町
宮城県 仙台市, 名取市, 登米市, 利府町,
加美町, 涌谷町, 美里町
秋田県 湯沢市, 東成瀬村
 - ・地震による津波の発生はなし

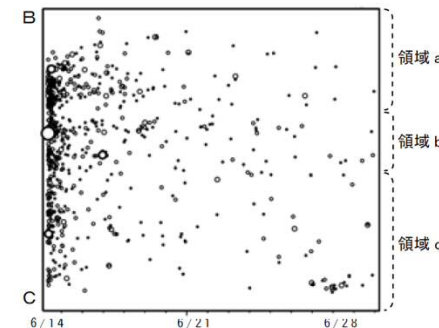
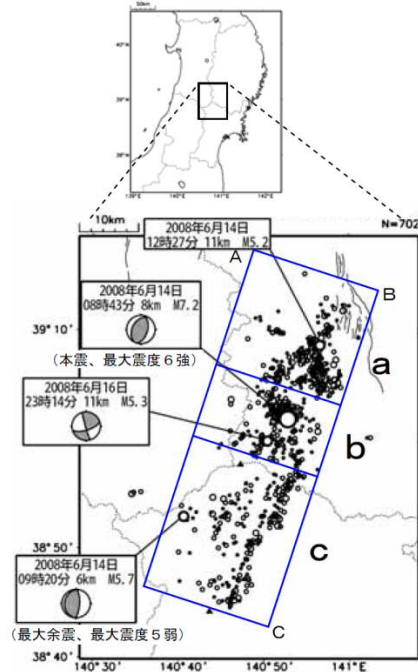
被害状況(消防庁)は以下のとおり。

 - ・住宅全壊: 30棟, 住宅半壊: 146棟,
住家一部破損: 2,521棟
 - ・死者17名, 負傷者426名(重傷70名)
- 地震発生メカニズム (気象庁)
 - ・発生機構解より, 西北西-東南東方向に圧縮軸を持つ**逆断層型**の地震。
 - ・今回の地震の震央周辺では, $M7$ 以上の地震は1914年3月15日に発生した $M7.1$ の地震以来約94年発生していなかった。
 - ・この領域では, 1894年10月22日の庄内地震($M7.0$)から1914年3月15日の秋田仙北地震にかけての約20年間に $M7$ 以上の地震が4回発生するなど地震活動の活発な時期があった。



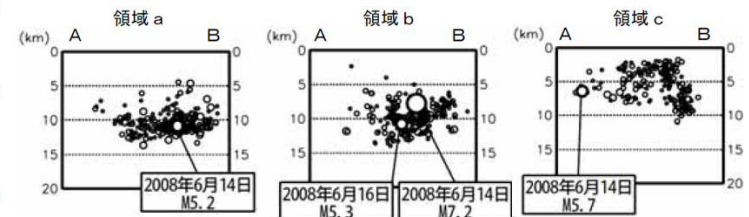
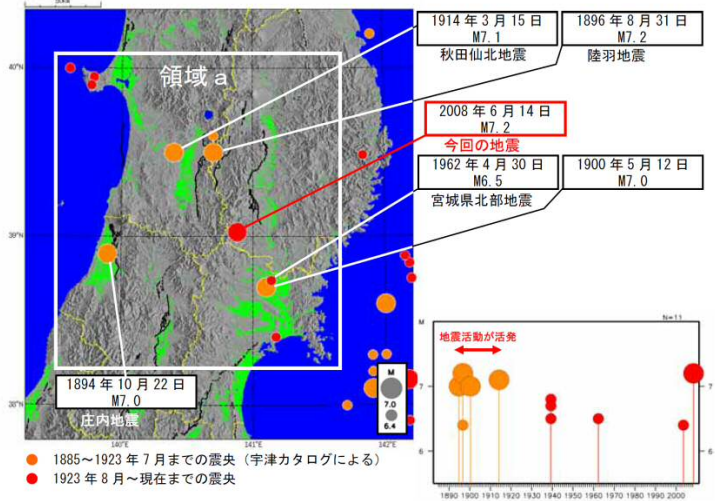
気象庁 震度データベースによる震度分布

震央分布図
(2008年6月14日~2008年6月29日, $M \geq 2.5$)



領域a~c内の時空間分布図

震央分布図
(1885年1月1日~2008年6月30日, $M \geq 6.4$)

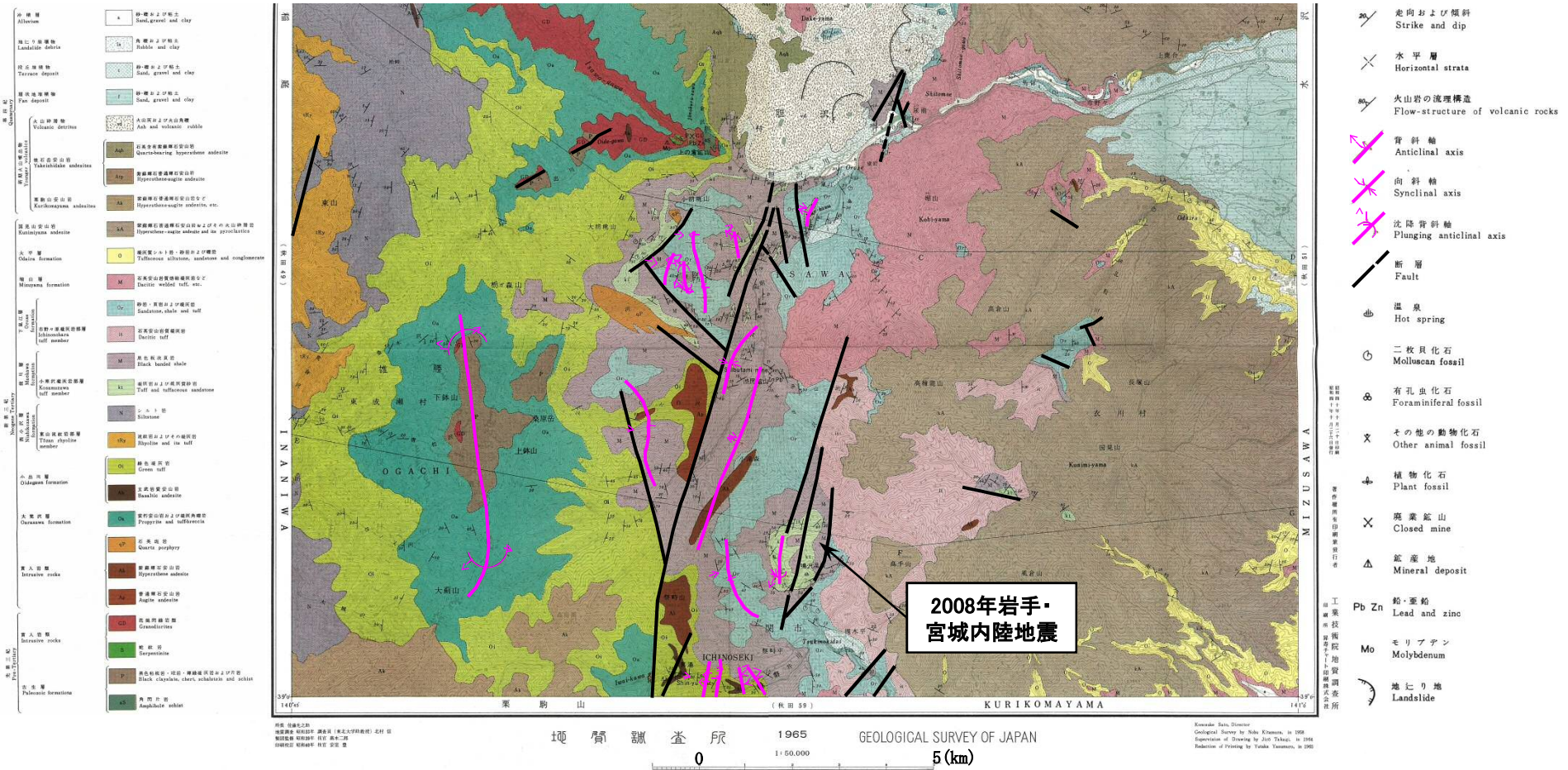


領域a~cの断面図

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(震源域周辺の地質・地質構造)

- 岩手・宮城内陸地震の震源域周辺は、新第三紀以降の火山岩、堆積岩が分布し、「上部に軟岩や火山岩、堆積層が厚く分布する地域」に該当する。
- また、現在の東西圧縮応力場に調和的に南北方向の褶曲・撓曲構造が発達している。

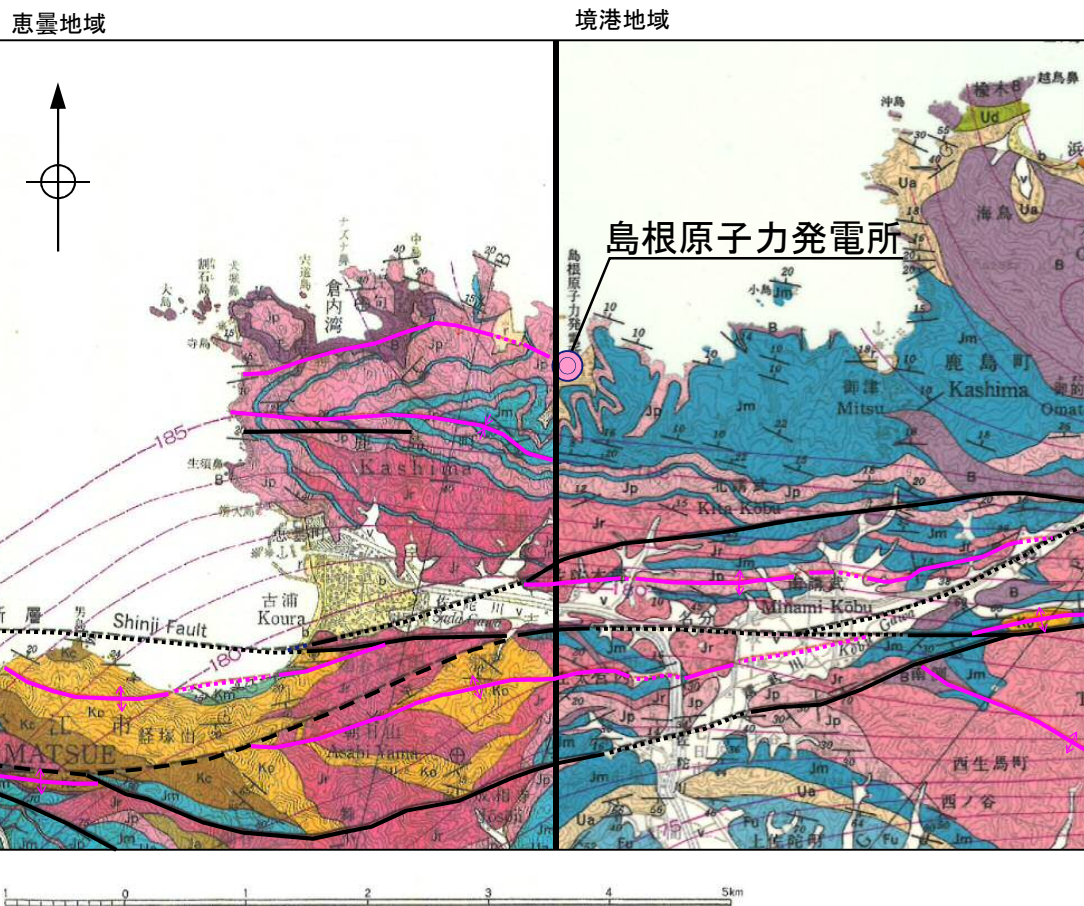


*北村信(1965)5万分の1地質図幅「焼石岳」及び説明書. 地質調査総合センター(旧地質調査所)

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(島根原子力発電所周辺の地質・地質構造)

- 一方, 島根原子力発電所周辺は, 主に新第三紀の堅固な堆積岩(頁岩, 泥岩, 砂岩等)が厚く分布する地域である。
- また, 現在の東西圧縮応力場に調和しない東西方向の褶曲・撓曲構造が認められる。



引用文献および凡例

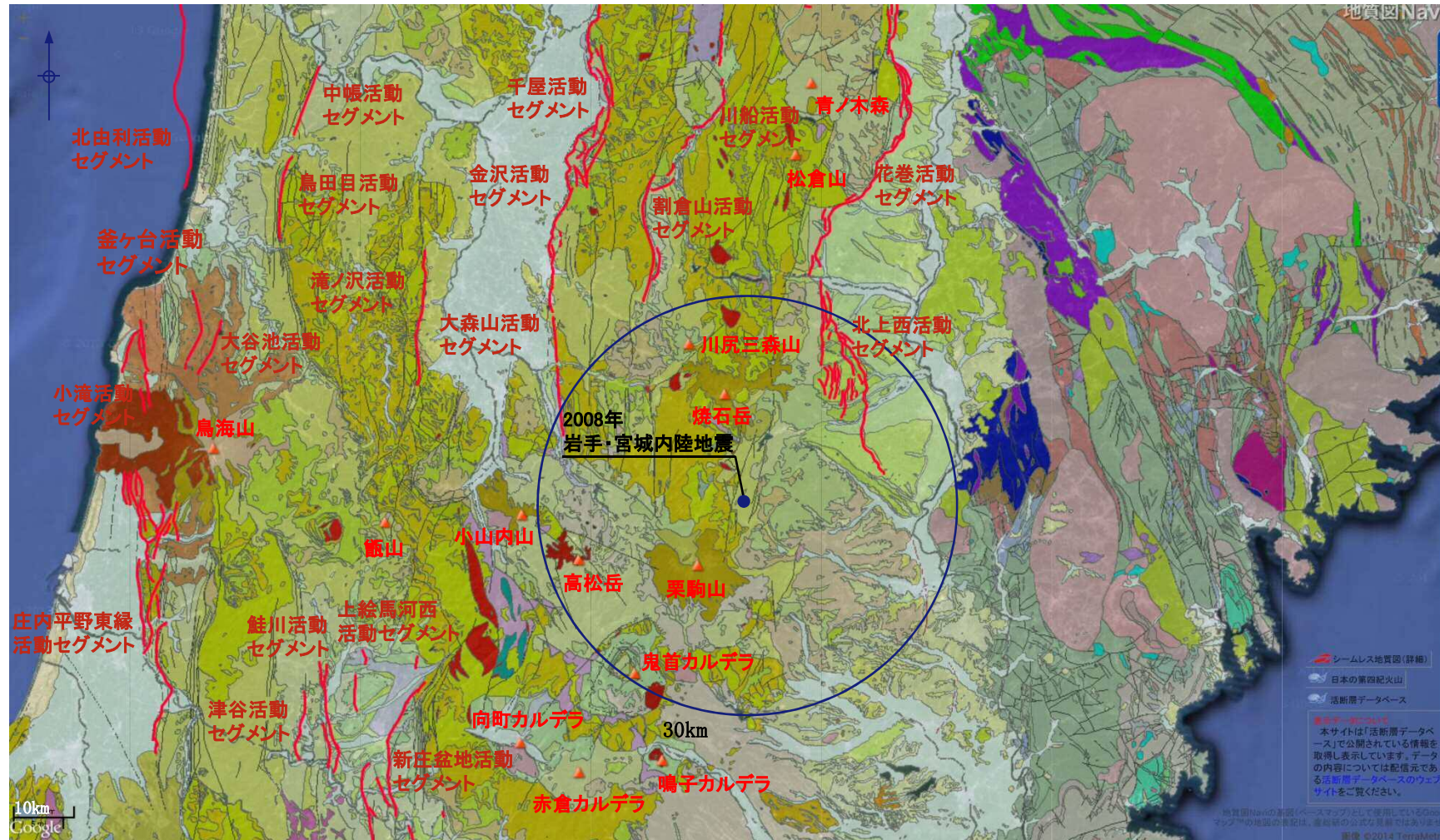
恵曇地域		境港地域	
新第三紀貫入岩	鹿野・中野(1986) Diorite, diorite and andesite 流紋岩・閃輝石岩及び溶岩 (既貫入を含む) Rhyolite volcanics and lavas (with argillaceous rocks)	新第三紀貫入岩	鹿野・吉田(1985) 石英閃輝石岩・閃輝石岩・閃輝石岩・斑岩・閃輝石岩 Quartz diorite, dolerite, porphyrite, basalt, and andesite
成相寺層	Jp 黒色泥岩, シルト岩及び頁岩 (酸性凝灰岩を含む) Black mudstone, siltstone and shale (with acidic tuff) R 流紋岩溶岩及び火砕岩 (貫入岩を含む) Rhyolite lavas, contemporaneous intrusives and volcanics	古江層	Fu 泥岩及びシルト岩 Mudstone and siltstone
古浦層	Kc 礫岩, 砂岩及び火砕岩 Conglomerate, sandstone and volcanics Ks 砂岩, 礫岩及び火砕岩 Sandstone, conglomerate and volcanics	牛切層	Ua 凝灰岩・シルト岩・砂岩・酸性凝灰岩互層 Alternations of argillaceous rocks, sandstone and acidic tuff
		成相寺層	Jm 黒色泥岩・シルト岩及び頁岩 (流紋岩溶岩を含む) Black mudstone, siltstone and shale (with rhyolite tuff) Jp 流紋岩火砕岩及び溶岩 (既貫入を含む) Volcanic rocks and lavas of rhyolite (with argillaceous rocks) R 流紋岩溶岩及び火砕岩 (貫入岩を含む) Lavas, contemporaneous intrusive rocks and volcanics rocks of rhyolite
		古浦層	Ko 砂岩, 礫岩, 斑岩, 閃輝石岩・斑岩及びシルト岩 Sandstone, conglomerate, andesite to dacite volcanic rocks, mudstone and siltstone

鹿野和彦・吉田史郎(1985): 境港地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所
 鹿野和彦・中野俊(1986): 恵曇地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所

鹿野・吉田(1985), 鹿野・中野(1986)より引用・加筆

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討 2008年岩手・宮城内陸地震(震源域周辺の広域の活断層分布)

- 岩手・宮城内陸地震の震源域周辺は、南北走向の逆断層が多数発達している。

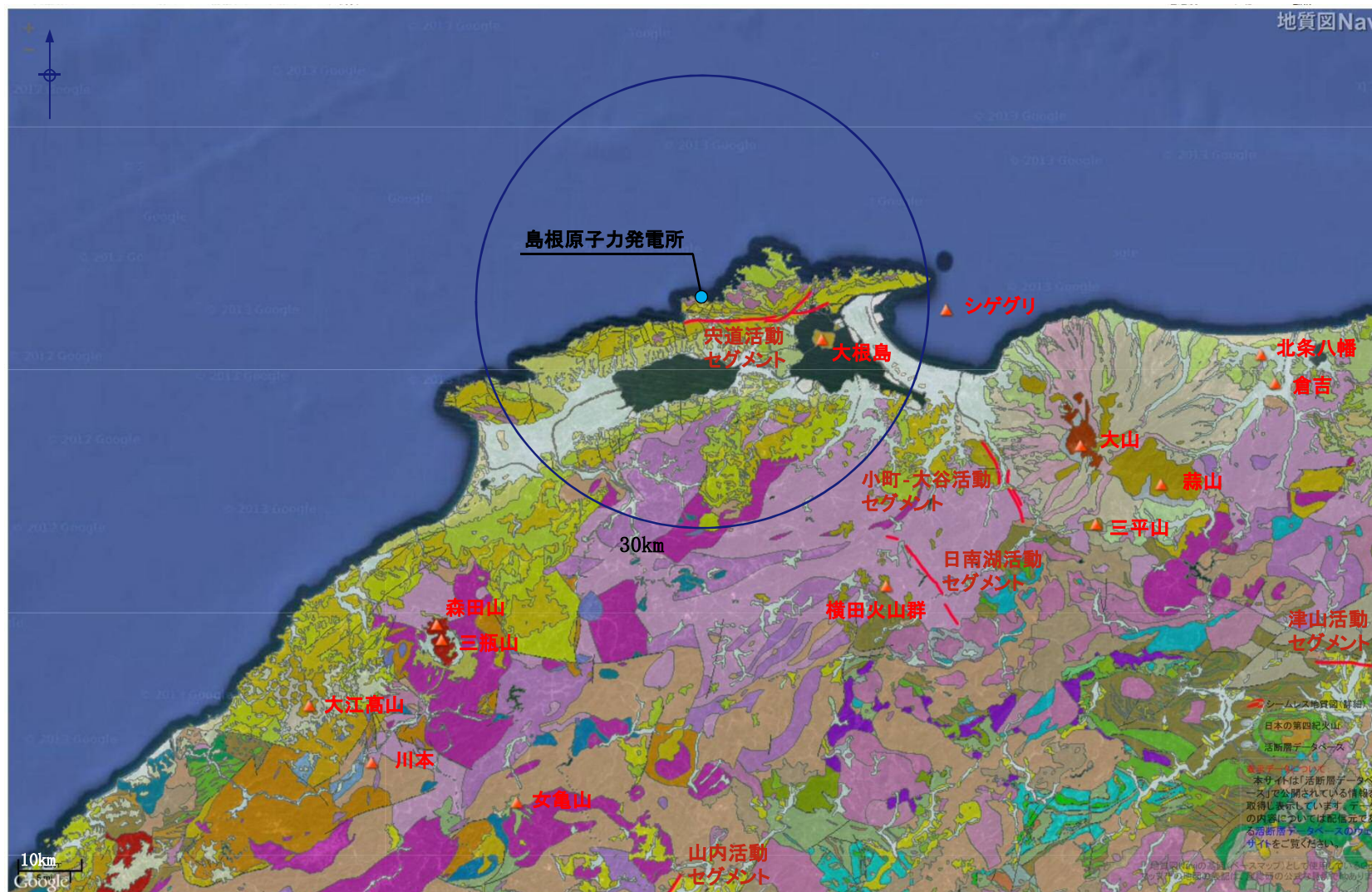


*産業技術総合研究所地質調査総合センター(編)(2012)20万分の1日本シームレス地質図に一部加筆

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(島根原子力発電所周辺の広域の活断層分布)

- 一方, 島根原子力発電所周辺は, 主として右横ずれ断層が認められる。

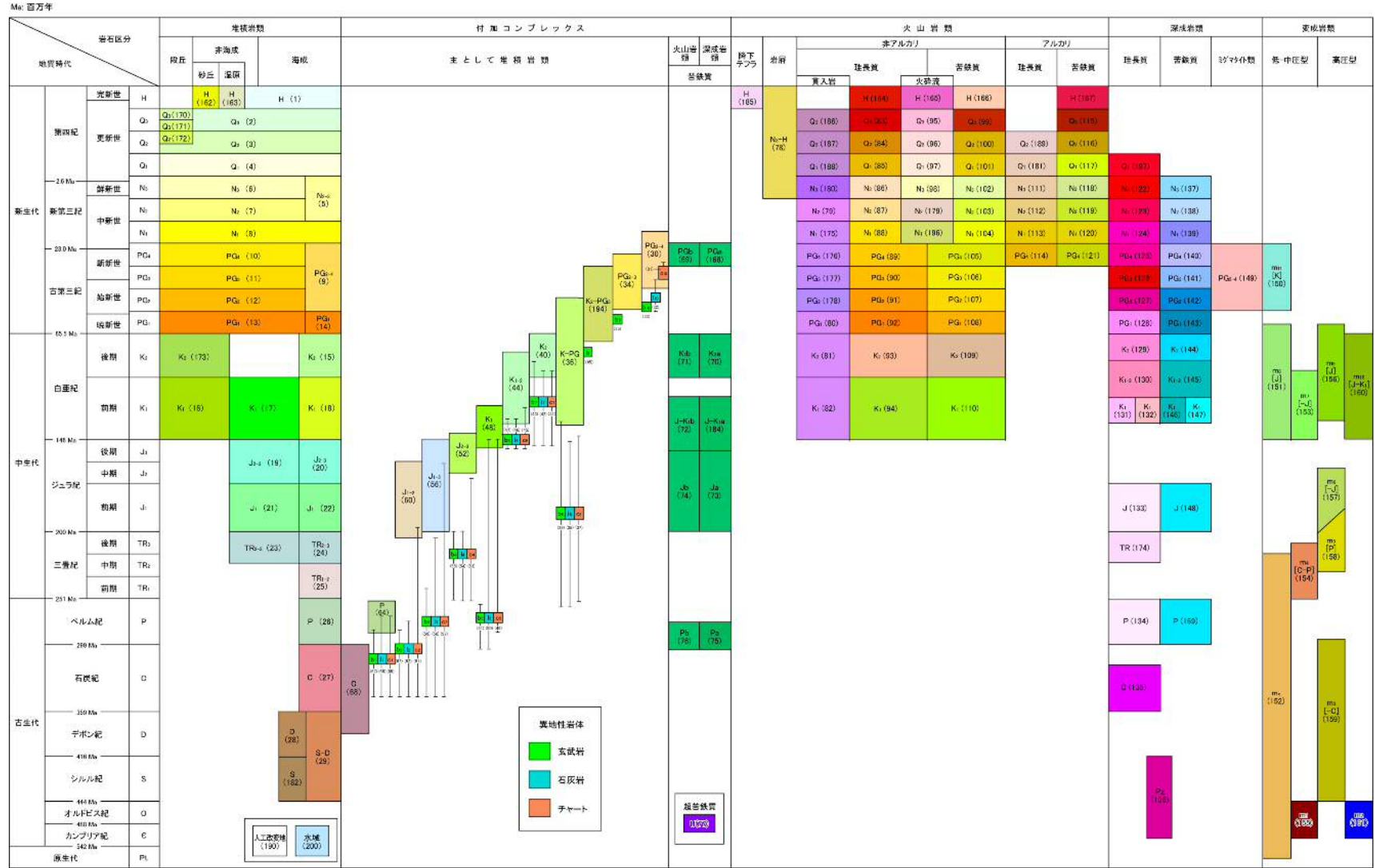


*産業技術総合研究所地質調査総合センター(編)(2012)20万分の1日本シームレス地質図に一部加筆

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(広域の地質・地質構造凡例)

■ 20万分の1日本シームレス地質図全国統一凡例



*産業技術総合研究所地質調査総合センター(編)(2012)20万分の1日本シームレス地質図データベース(2012年7月3日版).産業技術総合研究所研究情報公開データベースDB084,産業技術総合研究所地質調査総合センター.

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(ひずみ集中帯)

- 岩手宮城内陸地震の震源域周辺は、ひずみ集中帯に位置している。
- 一方、島根原子力発電所周辺は、ひずみ集中帯に位置していない。

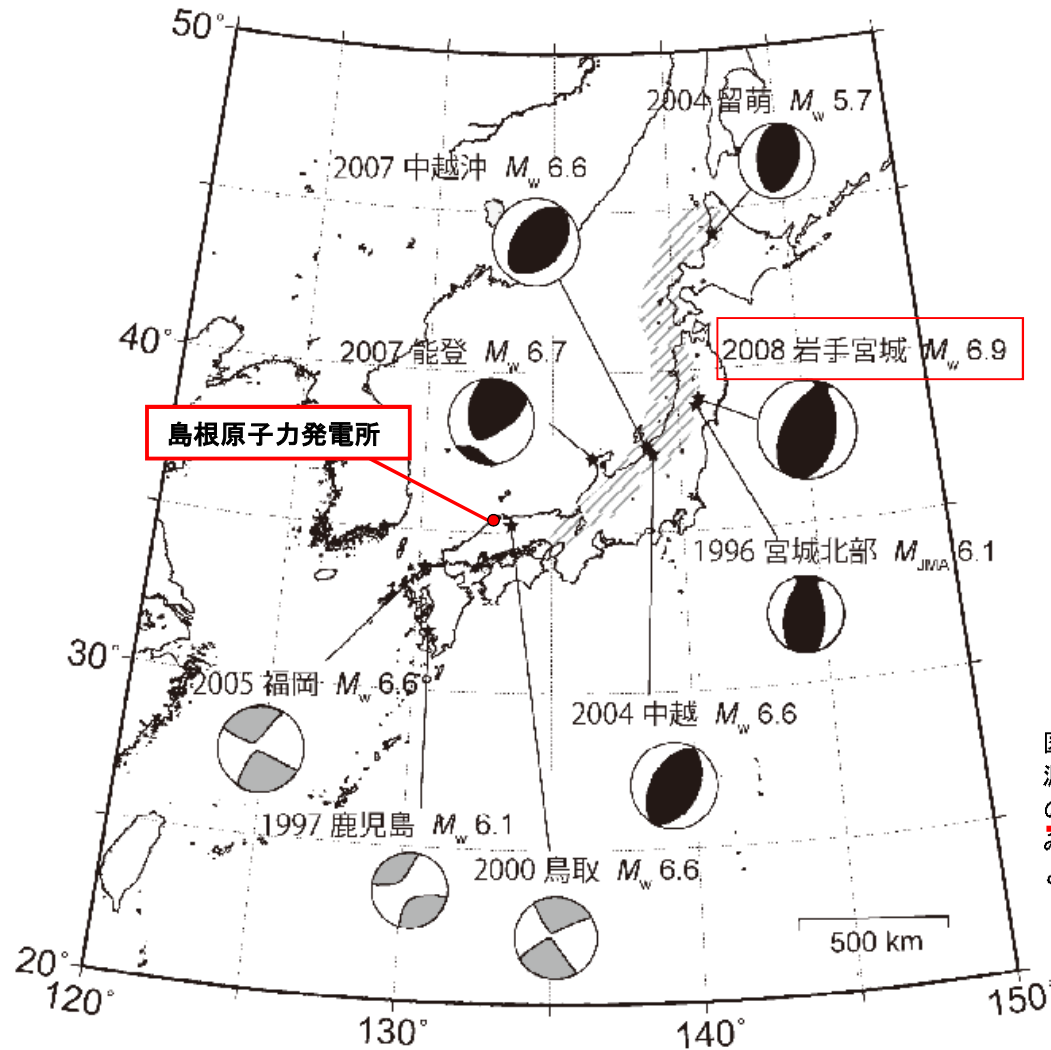


図1 解析した9地震系列の本震震央位置と本震の震源メカニズム解。斜線部は、ひずみ集中帯のおよその分布を表す。メカニズム解について、黒色がひずみ集中帯内、灰色がひずみ集中帯外で発生した地震と分類する。

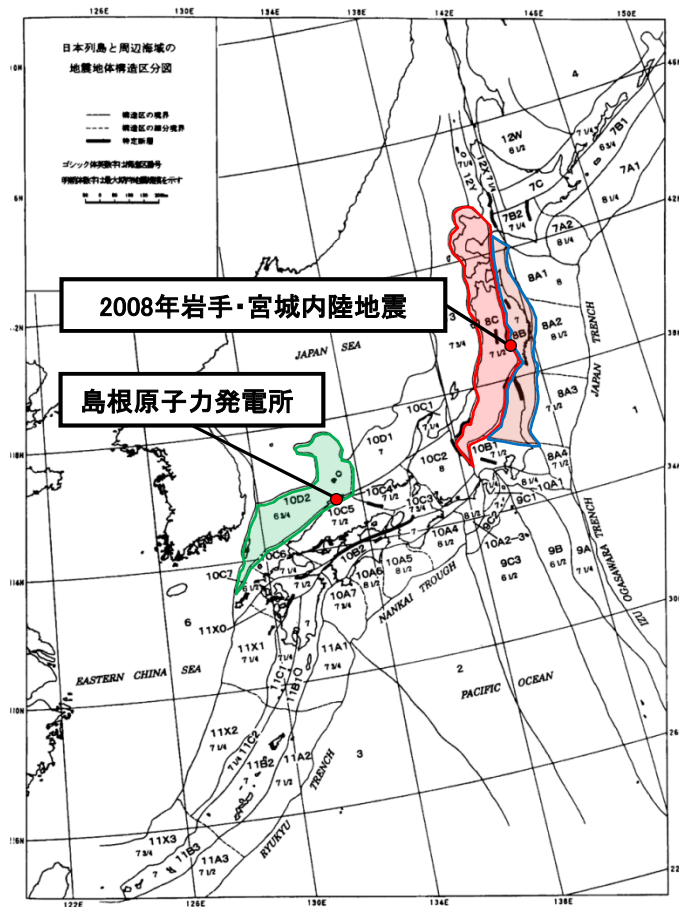
染井ほか(2010)より引用・加筆

染井ほか(2010).ひずみ集中帯内外で発生した地殻内地震系列間の震源特性の比較.第13回日本地震工学シンポジウム

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(地震地体構造区分)

- 垣見ほか(2003)では、各区の特徴, Mmax, 特定断層の知見に基づいて、地震地体構造区分図を作成している。
- 岩手・宮城内陸地震の震源域周辺は、東北日本弧外帯と内帯の境界に区分されている。
- 一方、島根原子力発電所周辺は、隠岐・対馬海域に区分されており、岩手・宮城内陸地震の震源域とは地体構造区分が異なる。



	島根原子力 発電所	2008年岩手・宮城内陸地震	
(1) 構造区	10D2 隠岐・対馬海域	8B 東北日本弧外帯	8C 東北日本弧内帯
(2) 地形地質	広い大陸棚上にゆるやかな褶曲, 南西縁に舟状海盆(西縁部を除き安定域)	外弧隆起帯, 安定域	火山性内弧, 隆起優勢, 脊梁山地・出羽丘陵の火山帯(隆起帯)とその間の盆地列(沈降帯), 島弧方向の逆断層~褶曲発達
(3) 活断層の密度・長さ・活動度・断層型ほか特徴	極小, 中・長, C?, 横?	極小, 短(長), C, 逆・横	中, 中, B, 逆 島弧と平行, 隆起帯基部に発達
(4) 浅発大・中地震活動	低(1884年以前の記録なし)	低	高 東西圧縮逆断層型

*垣見俊弘, 松田時彦, 相田勇, 衣笠善博(2003)から抜粋

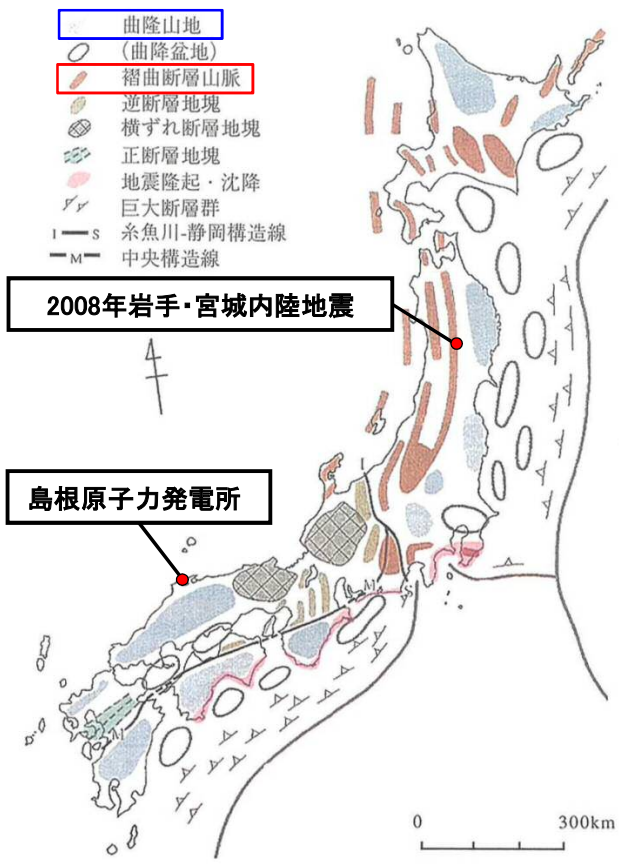
*垣見俊弘, 松田時彦, 相田勇, 衣笠善博(2003)日本列島と周辺海域の地震地体構造区分地震2, 55, 389-406

Fig. 1. Seismotectonic province map in and around the Japanese islands. Boldfaced sign is the symbol of province. Roman-type numeral represents the expected maximum earthquake magnitude (Mmax) assigned to each province. Solid line: boundary between provinces. Broken line: boundary between subprovinces. Bar: the designated fault.

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2008年岩手・宮城内陸地震(変動タイプ)

- 岩手・宮城内陸地震の震源域周辺は、「褶曲断層山脈」に位置しており、東西方向の水平圧縮応力が強まった鮮新世以降の褶曲と逆断層で地形が形成されている。
- 一方、島根原子力発電所周辺は、「曲隆山地」に位置しており、全体として緩やかな傾動を示す山塊であるとされている。



①褶曲断層山脈
 主に褶曲と逆断層によって山地や盆地が形成されているタイプで、東北日本弧で典型的であり島弧に平行な地形・地質構造の帯状配列がみられる(北村編, 1986)。この帯状配列(東から西へ、北上川-阿武隈川低地帯、奥羽山脈、内陸盆地の低地帯、出羽丘陵、日本海岸の低地帯)は、東西方向の水平圧縮応力が強まった鮮新世以降地殻の褶曲と逆断層で作られたもので(Sato, 1994; 大槻, 1995)、波長は約50kmと一定している。山地と平野(盆地)の境界部には南北性の活断層が発達する(活断層研究会編, 1991)。新第三紀以降の堆積層が厚く分布する平野では、段丘面を变形させる活褶曲がみられる(たとえば、日本第四紀学会編, 1987)。海岸段丘の高度からみた隆起速度は、東北日本の背弧側で0.5mm/年前後に達し(たとえば、八木・吉川, 1988; Miyauchi, 1990)、東北日本太平洋側に比べて大きい傾向がある。第四紀の累積隆起量は、このタイプの山地の中心部で1,000mに達する(表 2.5-2)。赤石山脈や丹沢山地は、第四紀の隆起量が日本列島で最も大きい地域のひとつで、伊豆弧の本州弧への衝突が隆起にかかわっている(たとえば、貝塚, 1987)。第四紀の隆起量は赤石山脈の主稜部で2,500mに達する(森山, 1990)。

④曲隆山地
 全体として緩やかな傾動を示す山塊で、東北日本では北上山地や阿武隈山地が、西南日本では、中国・四国・九州と紀伊半島の山地が相当する。北上山地と阿武隈山地は、活断層の密度や地形の起伏が小さく、第四紀における隆起量は500mないし700m程度である(表 2.5-5)。紀伊山地、四国山地、九州山地は、第四紀における隆起量がこのタイプとしては大きく、山地の中心部では1,000m以上に達する(表 2.5-5)。また、過去百万年間の平均隆起速度は、侵食速度と隆起速度の平衡モデルを用いた解析によれば、四国山地中心部で2.5mm/年に達する(大森, 1990)。四国山地の隆起は、地震時の沈降と地震間の緩やかな隆起が合成された結果であることが、測地データと地形データの解析から明らかにされている(たとえば、大森, 1990)。中国地方では、中新世中期から主な隆起が始まったとされ(小畑, 1991)、第四紀における隆起量は最大でも400m程度と考えられる(表 2.5-5)。

*核燃料サイクル開発機構(1999)に一部加筆。

(貝塚ほか(1995)に加筆)

図 3.3.3-2 日本列島の変動のタイプ (出典: 核燃料サイクル開発機構, 1999)

*原子力発電環境整備機構(2004)に一部加筆。

*原子力発電環境整備機構(2004)概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, NUMO-TR-04-02

*核燃料サイクル開発機構(1999)わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊1わが国の地質環境

2008年岩手・宮城内陸地震(評価のまとめ)

- 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺及び島根原子力発電所周辺における地質・地質構造等を整理した結果、両地域の地質・地質構造等の特徴が異なっていることから、2008年岩手・宮城内陸地震については観測記録の収集対象外とする。

項目	2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺	島根原子力発電所周辺
地質・地質構造	<ul style="list-style-type: none"> ・新第三紀以降の火山岩, 堆積岩が厚く分布 ・現在の応力場に調和的に褶曲・撓曲構造が発達 	<ul style="list-style-type: none"> ・主に新第三紀の堅固な堆積岩が厚く分布 ・現在の応力場に調和しない褶曲・撓曲構造が認められる
断層センス	逆断層が卓越	横ずれ断層が卓越
ひずみ集中帯	ひずみ集中帯に位置	ひずみ集中帯ではない
地震地体構造区分	東北日本弧外帯と内帯の境界	隠岐・対馬海域
日本列島の変動タイプ	褶曲断層山脈に位置	曲隆山地に位置

2000年鳥取県西部地震

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討 2000年鳥取県西部地震(概要)

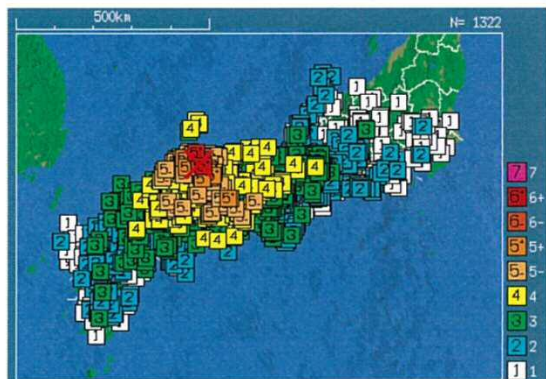
■ 概要(発生日時, 地震規模等)

- 地震発生日時 (気象庁他)
 - ・発生日時: 平成12年10月6日 13時30分
 - ・地震規模: Mj7.3 (Mw6.6)
 - ・震源深さ: 約11km
 - ・震源位置: 北緯35° 16.5', 東経133° 20.9'

- 各地の震度及び被害状況
各地の震度(気象庁)は以下のとおり。
 - ・震度6強: 鳥取県 境港市、日野町
 - ・震度6弱: 鳥取県 西伯町、溝口町、会見町、岸本町、淀江町、日吉津村
 - ・震度5強: 鳥取県 米子市
島根県 仁多町、安来市、宍道町
岡山県 哲多町、落合町、大佐町、新見市、美甘村
香川県 土庄町
 - ・地震による津波の発生はなし

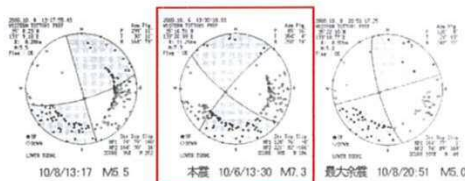
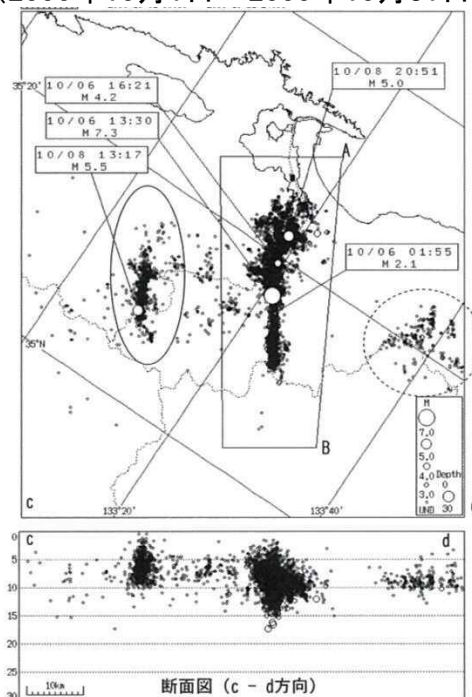
- 被害状況(消防庁)は以下のとおり。
 - ・住家全壊: 435棟、住家半壊: 3101棟、住家一部破損: 18554棟
 - ・負傷者182名(重傷39名)

- 地震発生メカニズム(気象庁)
 - ・発震機構解より、東西方向に圧縮軸を持つ横ずれ断層型の地震。
 - ・鳥取県西部地域は、1990年に今回の地震の極近傍でM5クラスの地震が3回発生している。
 - ・1926年から2000年までの過去の被害地震は、今回の地震の近傍で3地震発生している。



気象庁 震度データベースによる震度分布

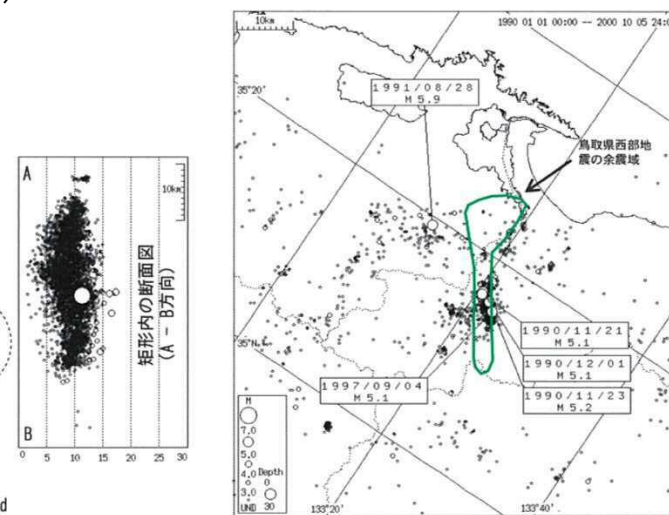
震央分布図
(2000年10月1日~2000年10月31日)



P波初動による発震機構

地震調査研究推進本部 地震調査委員会

今回の活動以前約11年間の地震活動
(1990年1月1日~2000年10月5日)



過去の被害地震(1926年~2000年)

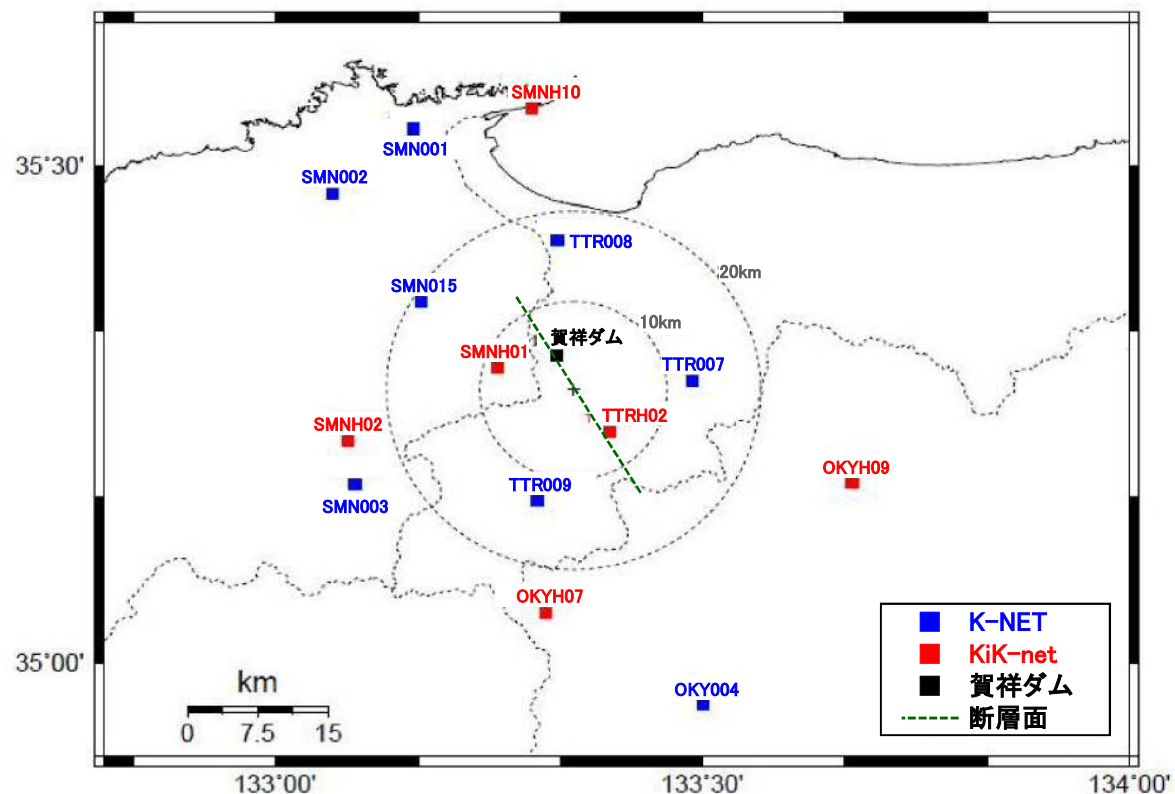
気象庁 平成12年10月 地震・火山月報(防災編)

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集)

- 2000年鳥取県西部地震は、島根原子力発電所周辺地域で発生した地震であるため、震源近傍における観測記録を収集する。
- 収集対象としては、防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-net観測点の観測記録のうち、以下の条件に適合するものとする。
 - ・ 断層最短距離が30km以内の観測点
 - ・ K-NET観測点はAVS30(Kanno et al.(2006))が500m/s程度以上の観測点
 - ・ KiK-net観測点は全ての地中観測点
- あわせて、本地震の震源直上に位置している賀祥ダム(監査廊)の観測記録も収集対象とする。

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集)

- 断層最短距離が30km以内の観測点としては、以下の15地点(K-NET観測点:8地点, KiK-net観測点:6地点, 賀祥ダム)である。



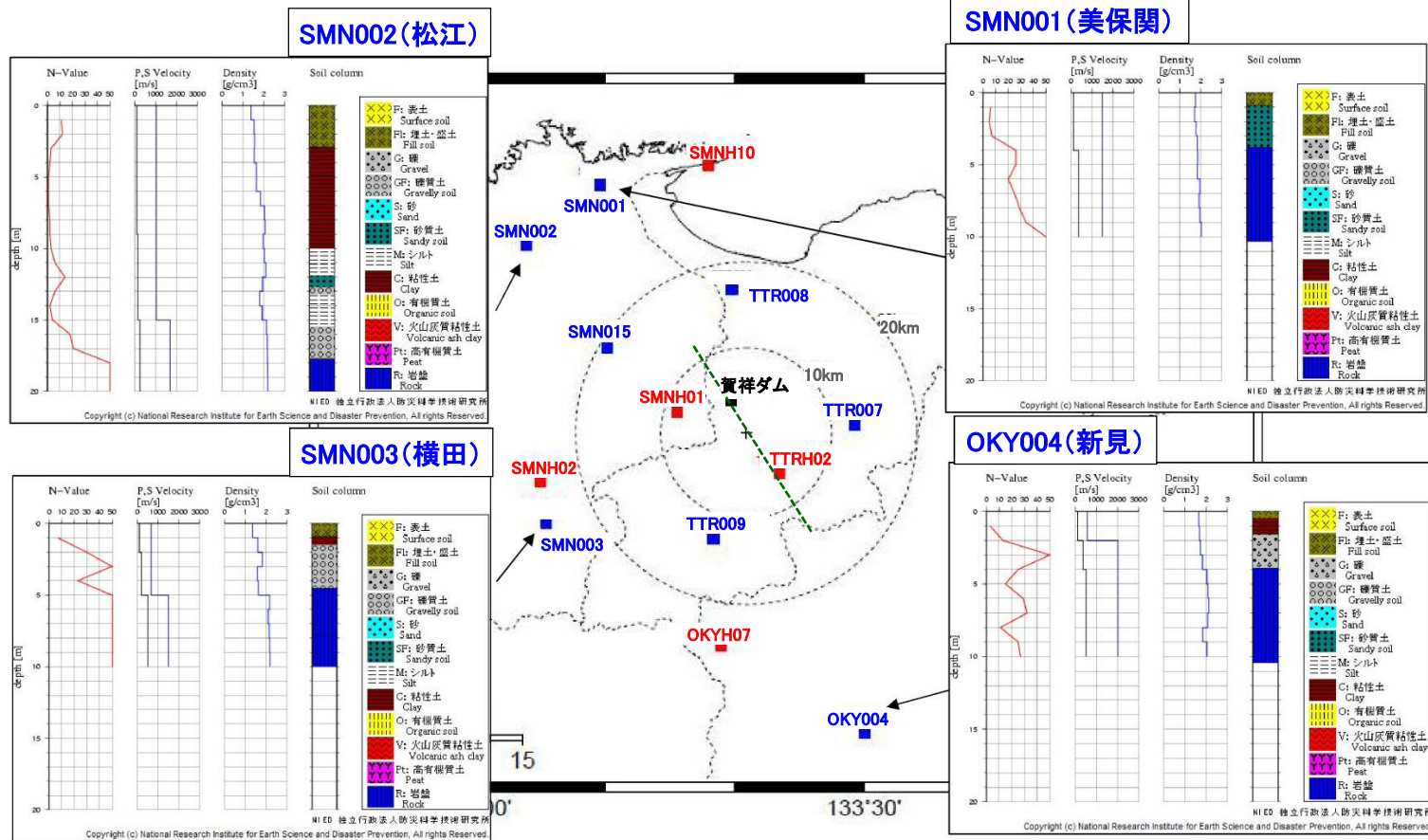
※断層面は地震調査研究推進本部(2002)による

2000年鳥取県西部地震の断層面と観測点位置

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集)

■ K-NET観測点: SMN001(美保関), SMN002(松江), SMN003(横田), OKY004(新見)の地盤情報



※断層面は地震調査研究推進本部(2002)による

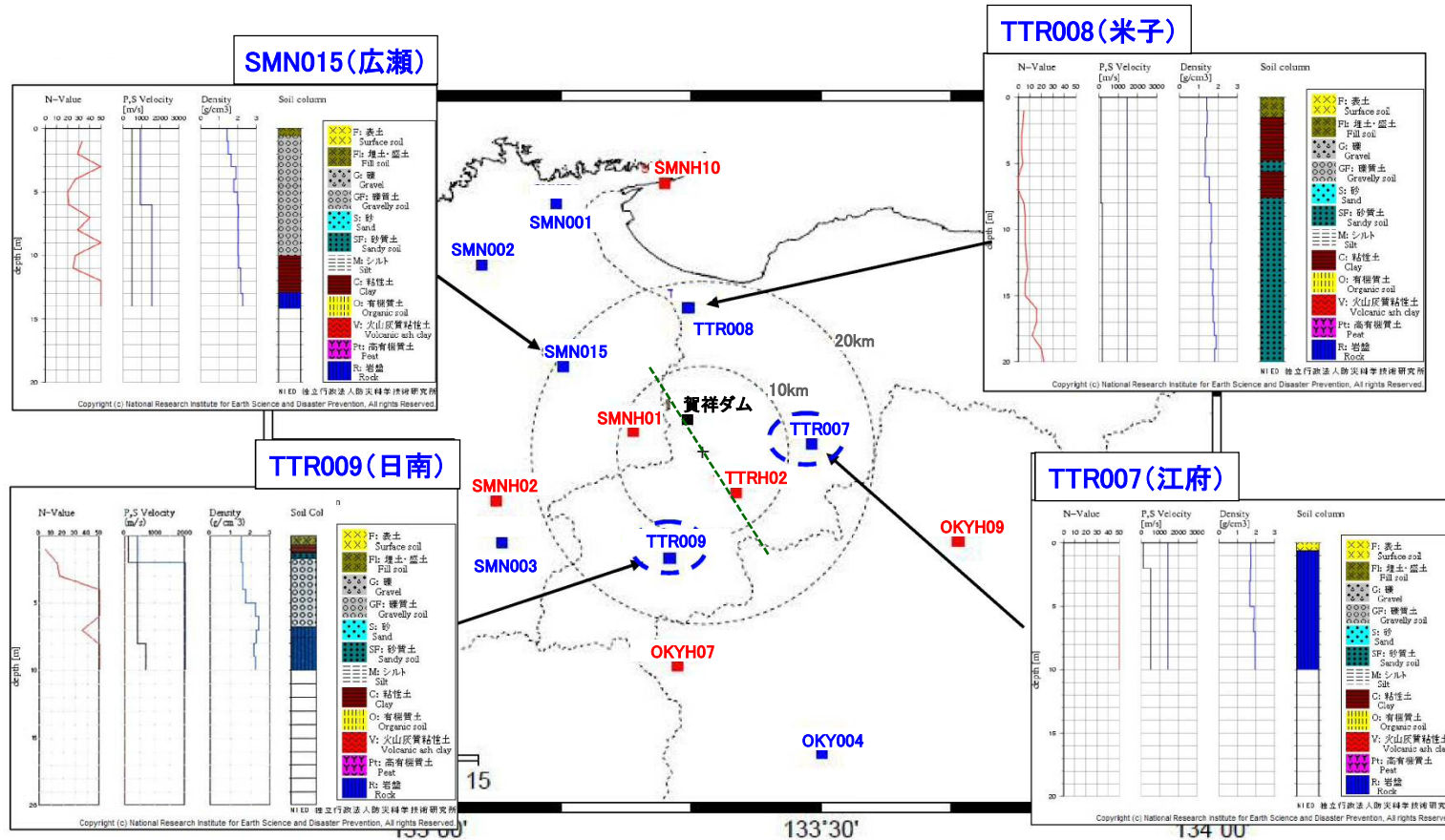
K-NET観測点の地盤情報

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集)

■ K-NET観測点: SMN015(広瀬), TTR007(江府), TTR008(米子), TTR009(日南)の地盤情報

K-NETの8観測点のうち, AVS30が500m/s程度と評価されるのは, TTR007(江府)及びTTR009(日南)であり, その他はAVS30が小さいため検討対象外とする。



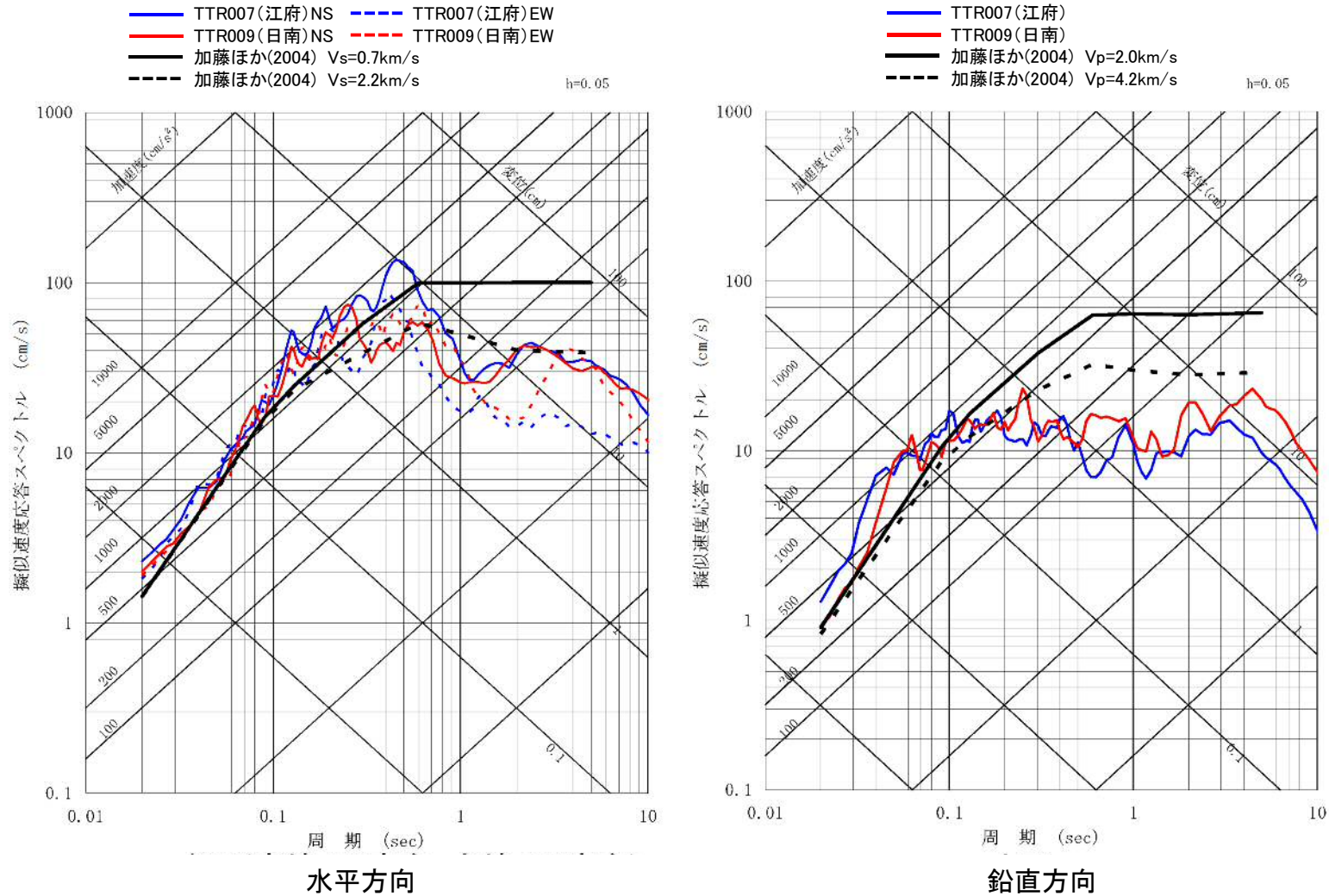
※断層面は地震調査研究推進本部(2002)による

K-NET観測点の地盤情報

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:K-NET)

■ K-NET観測点のうち, AVS30が500m/s程度のTTR007(江府)及びTTR009(日南)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回る。

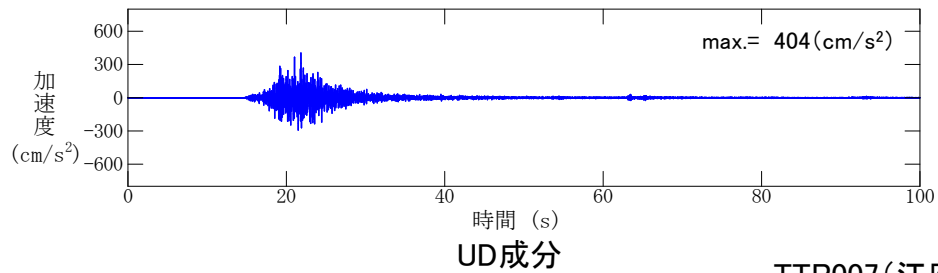
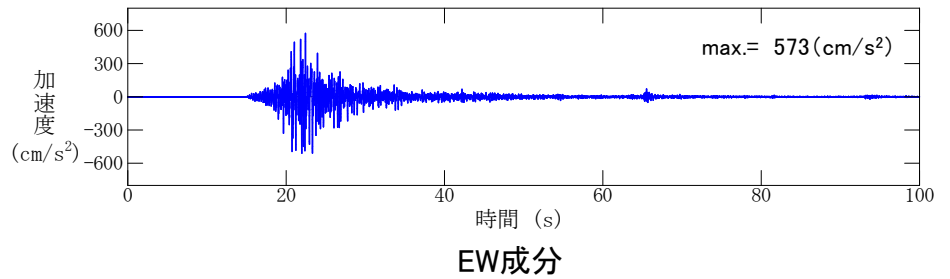
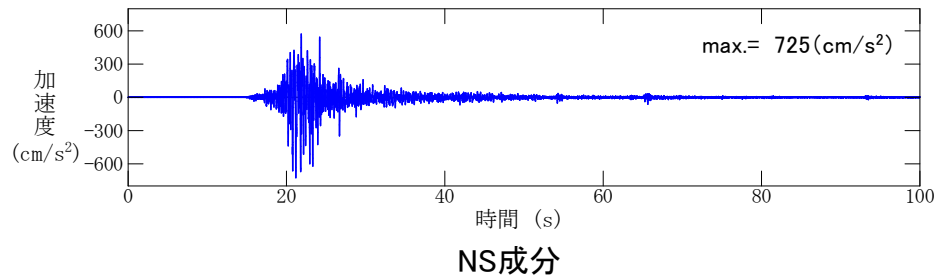


K-NET各観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

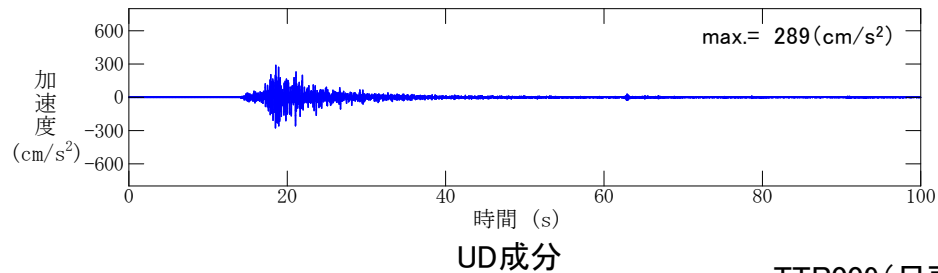
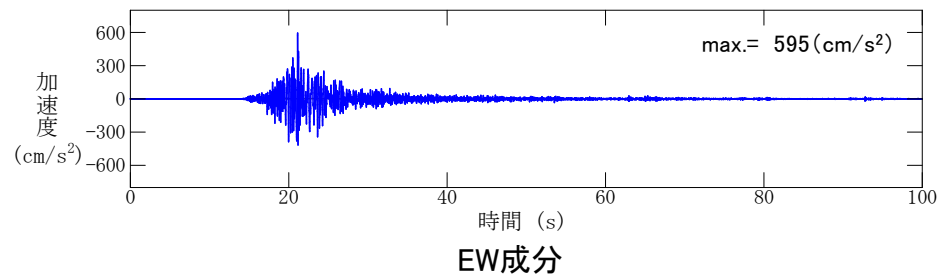
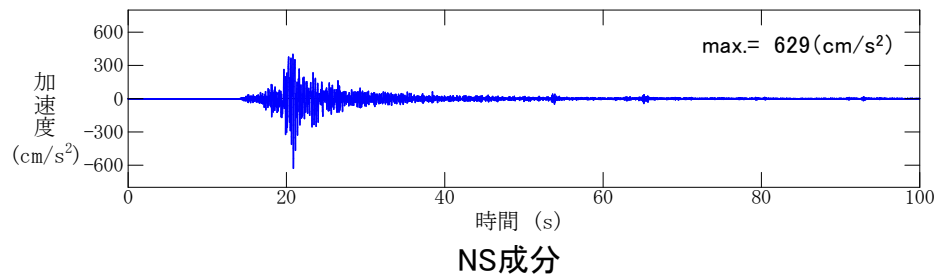
1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:K-NET)

■ 加速度時刻歴波形



TTR007(江府)の観測記録



TTR009(日南)の観測記録

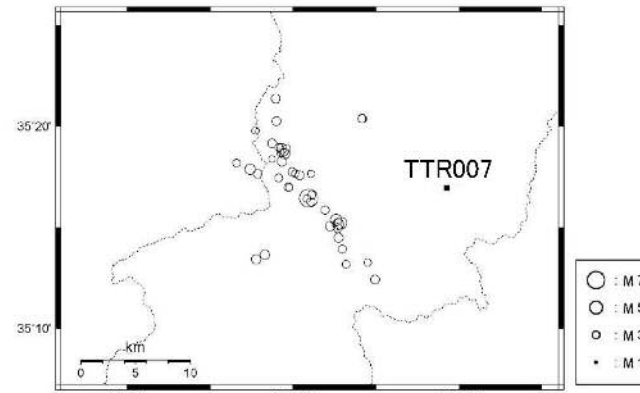
1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:K-NET)

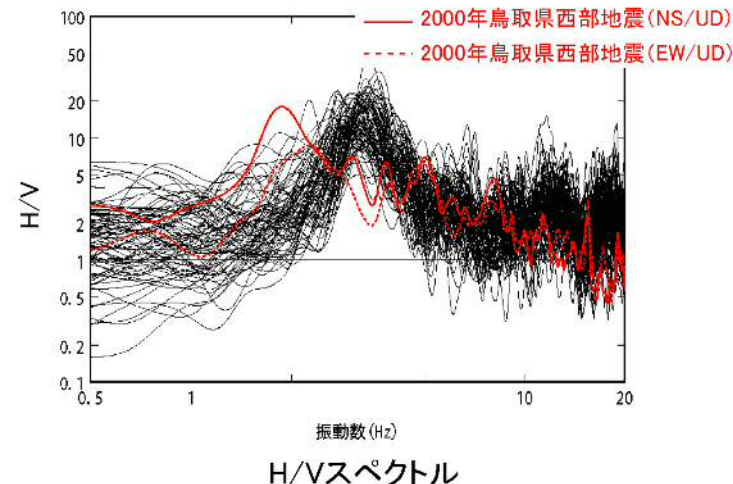
- TTR007(江府)の観測記録について, 2000年鳥取県西部地震と1996年6月以降に観測された中小地震の観測記録のH/Vスペクトルを比較したところ, いずれも本震時にピーク周波数のずれや, 高周波数においてH/Vスペクトルの低下が見られた。
- 本震時には, 表層地盤の非線形性の影響が含まれていると考えられ, また解放基盤相当までの地質データも無いことから, 基盤地震動を評価することはできないと判断した。

検討対象地震の諸元

	発震年月日・時刻	緯度	経度	深さ(km)	Mj
1	1996/06/15 11:10:00.95	35.2537	133.3810	11.3	4.7
2	1997/08/23 08:35:29.83	35.2528	133.3783	13.0	4.2
3	1997/09/02 02:07:48.84	35.2527	133.3787	13.0	4.2
4	1997/09/04 05:12:33.99	35.2563	133.3765	12.3	4.5
5	2000/10/06 23:13:21.85	35.2980	133.2902	6.9	4.2
6	2000/10/07 04:56:03.29	35.2512	133.3705	8.5	3.9
7	2000/10/07 06:22:36.20	35.3108	133.3248	8.2	4.1
8	2000/10/07 08:30:48.71	35.2415	133.3787	8.9	3.7
9	2000/10/07 10:26:53.78	35.2497	133.3780	8.8	3.7
10	2000/10/07 17:54:02.07	35.2768	133.3518	5.7	3.3
11	2000/10/07 18:32:11.44	35.3150	133.3218	7.5	4.0
12	2000/10/08 06:20:58.28	35.2197	133.3865	0.5	3.3
13	2000/10/09 19:24:05.13	35.2738	133.3472	11.7	3.3
14	2000/10/12 17:07:36.65	35.3375	133.3165	10.0	3.6
15	2000/10/13 10:44:21.94	35.2713	133.3513	9.0	3.4
16	2000/10/14 03:36:20.49	35.3152	133.3268	10.0	3.1
17	2000/10/17 22:10:49.41	35.2943	133.2980	6.6	3.5
18	2000/10/18 00:00:05.94	35.3160	133.3192	7.8	3.1
19	2000/10/18 14:22:42.94	35.2908	133.3188	12.1	3.2
20	2000/10/18 23:39:34.17	35.2238	133.2962	8.1	3.7
21	2000/10/24 08:24:53.84	35.2323	133.3828	12.0	3.3
22	2000/11/04 07:15:46.85	35.3563	133.3160	7.4	3.6
23	2000/11/10 19:09:01.21	35.3117	133.3205	9.1	3.0
24	2000/12/08 04:42:26.62	35.2645	133.3655	13.2	3.4
25	2001/02/18 09:57:46.69	35.2072	133.4157	9.5	3.5
26	2001/08/11 17:29:09.24	35.2833	133.3285	15.0	3.4
27	2001/10/08 11:23:01.53	35.3047	133.3220	8.3	3.9
28	2001/12/16 07:13:06.95	35.2943	133.3513	6.6	2.8
29	2002/03/17 09:48:25.84	35.2945	133.3357	8.3	3.1
30	2002/10/24 06:13:15.25	35.3398	133.4025	11.8	3.3
31	2002/10/24 09:52:45.90	35.3397	133.4030	11.8	3.4
32	2003/03/24 09:48:26.76	35.2958	133.3322	7.3	3.4
33	2003/12/13 22:07:43.76	35.2275	133.3048	11.0	3.8
34	2005/07/18 18:22:55.95	35.3032	133.2765	5.6	3.1
35	2005/12/30 15:18:32.75	35.3065	133.3120	8.6	2.7
36	2006/06/01 18:43:56.48	35.2828	133.3292	15.0	3.1
37	2007/04/04 06:46:57.91	35.2932	133.3398	10.5	3.5
38	2008/05/13 15:25:29.92	35.3298	133.2953	9.4	2.8
39	2008/10/21 10:07:25.62	35.3122	133.3243	7.5	3.0
40	2008/12/22 22:24:25.41	35.3193	133.3120	8.0	3.6
41	2010/05/15 01:44:30.11	35.2212	133.4082	9.4	2.9



検討に用いた地震の震央分布



H/Vスペクトル

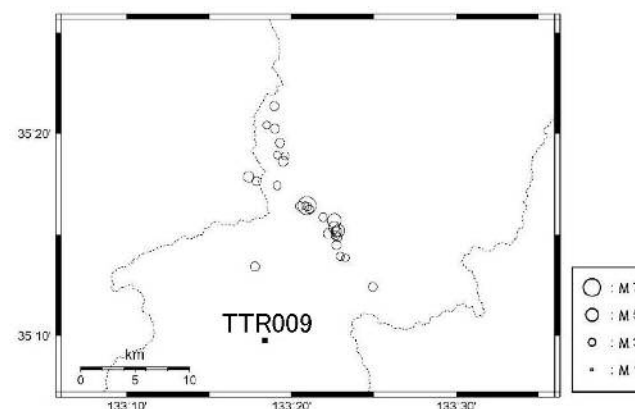
1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:K-NET)

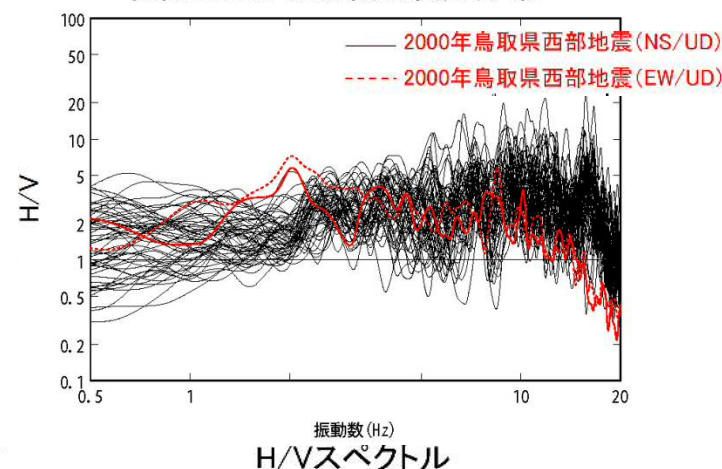
- TTR009(日南)の観測記録について、2000年鳥取県西部地震と1996年6月以降に観測された中小地震の観測記録のH/Vスペクトルを比較したところ、いずれも本震時にピーク周波数のずれや、高周波数においてH/Vスペクトルの低下が見られた。
- 本震時には、表層地盤の非線形性の影響が含まれていると考えられ、また解放基盤相当までの地質データも無いことから、基盤地震動を評価することはできないと判断した。

検討対象地震の諸元

	発震年月日・時刻	緯度	経度	深さ(km)	Mj
1	1996/06/15 11:10:00.95	35.2537	133.3810	11.3	4.7
2	1997/08/23 08:35:29.83	35.2528	133.3783	13.0	4.2
3	1997/09/02 02:07:48.84	35.2527	133.3787	13.0	4.2
4	1997/09/04 05:12:33.99	35.2563	133.3765	12.3	4.5
5	1997/09/04 05:15:43.22	35.2620	133.3767	8.9	5.5
6	2000/10/06 18:54:42.23	35.2733	133.3495	12.7	3.4
7	2000/10/06 19:57:22.54	35.2737	133.3418	13.4	3.6
8	2000/10/06 21:28:59.89	35.3260	133.3217	6.8	3.8
9	2000/10/06 23:13:21.85	35.2980	133.2902	6.9	4.2
10	2000/10/07 04:56:03.29	35.2512	133.3705	8.5	3.9
11	2000/10/07 06:22:36.20	35.3108	133.3248	8.2	4.1
12	2000/10/07 08:30:48.71	35.2415	133.3787	8.9	3.7
13	2000/10/07 10:26:53.78	35.2497	133.3780	8.8	3.7
14	2000/10/09 01:14:08.20	35.2312	133.3880	2.6	3.1
15	2000/10/09 19:24:05.13	35.2738	133.3472	11.7	3.3
16	2000/10/12 17:07:36.65	35.3375	133.3165	10.0	3.6
17	2000/10/13 10:44:21.94	35.2713	133.3513	9.0	3.4
18	2000/10/14 03:36:20.49	35.3152	133.3268	10.0	3.1
19	2000/10/17 22:10:49.41	35.2943	133.2980	6.6	3.5
20	2000/10/18 00:00:05.94	35.3160	133.3192	7.8	3.1
21	2000/10/18 14:22:42.94	35.2908	133.3188	12.1	3.2
22	2000/10/18 23:39:34.17	35.2238	133.2962	8.1	3.7
23	2000/10/24 07:43:35.19	35.2482	133.3800	9.5	3.5
24	2000/10/24 08:24:53.84	35.2323	133.3828	12.0	3.3
25	2000/11/04 07:15:46.85	35.3563	133.3160	7.4	3.6
26	2000/11/19 11:41:02.68	35.3407	133.3083	11.0	3.1
27	2000/12/08 04:42:26.62	35.2645	133.3655	13.2	3.4
28	2001/02/18 09:57:46.69	35.2072	133.4157	9.5	3.5



検討に用いた地震の震央分布

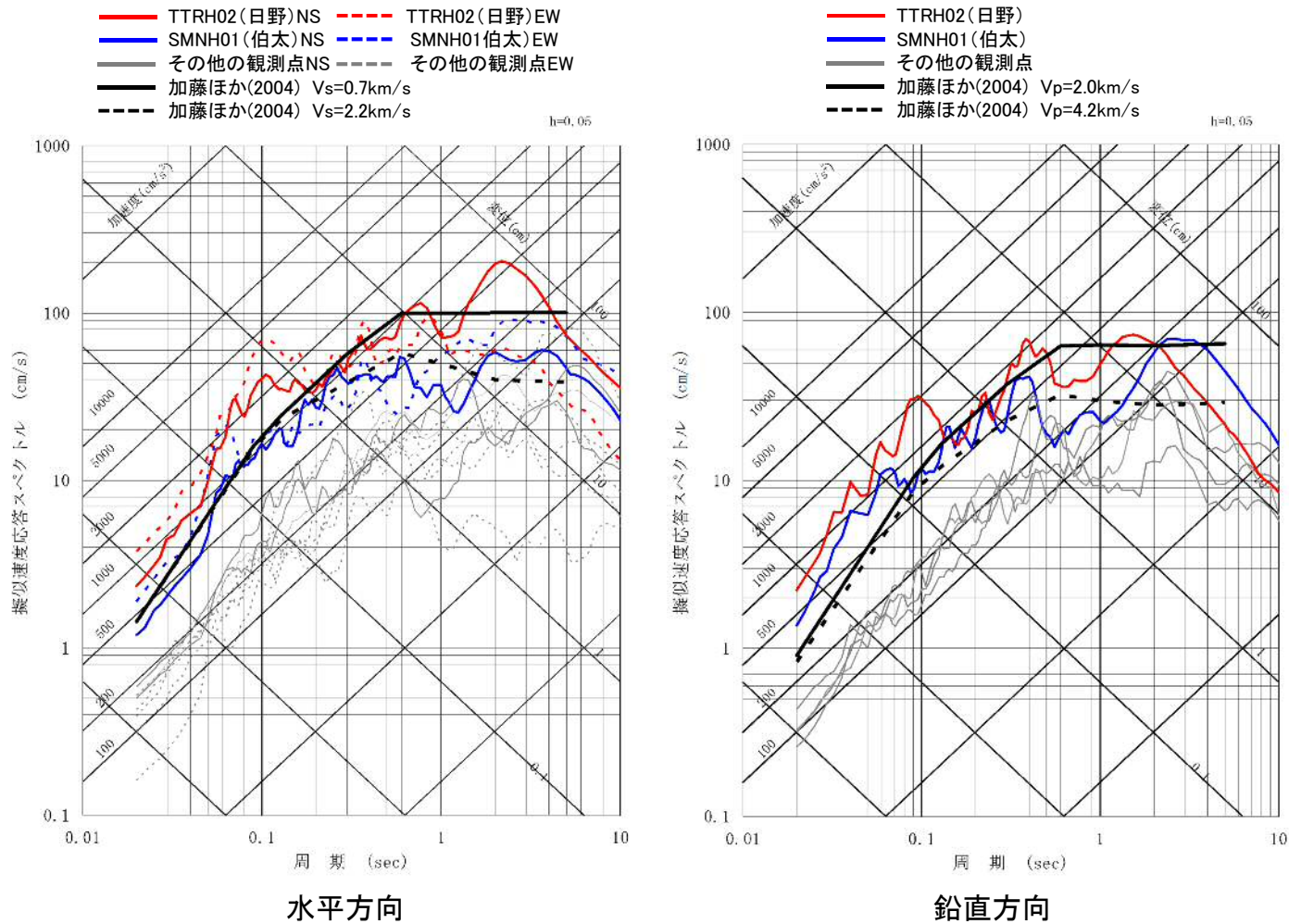


※TTR009(日南)については、2001年10月に観測点が移設されているため、移設前の地震記録を用いた

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:KiK-net)

■ KiK-net観測点の地中観測記録(地中×2)のうち, TTRH02(日野)及びSMNH01(伯太)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回る。

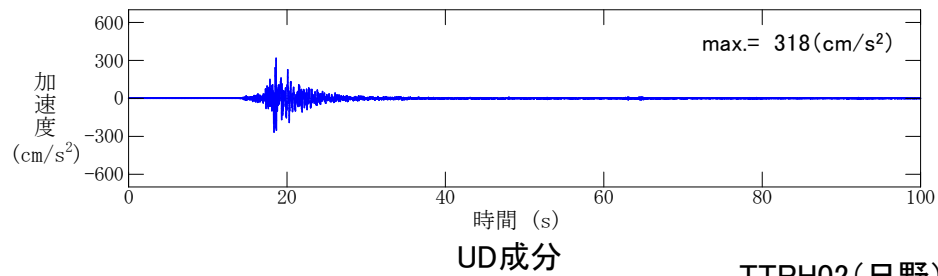
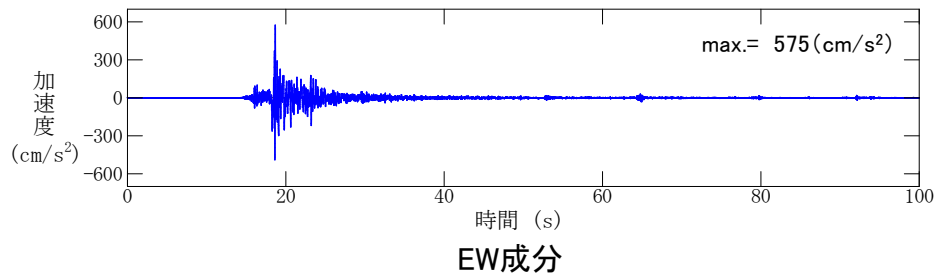
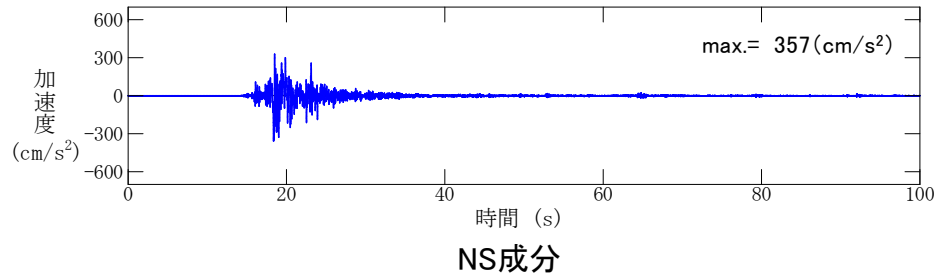


KiK-net各観測記録(地中×2)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

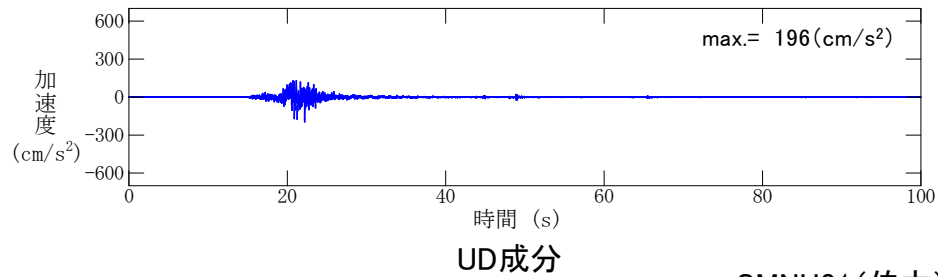
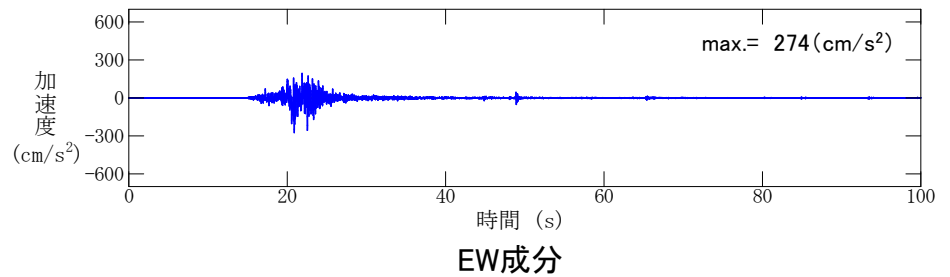
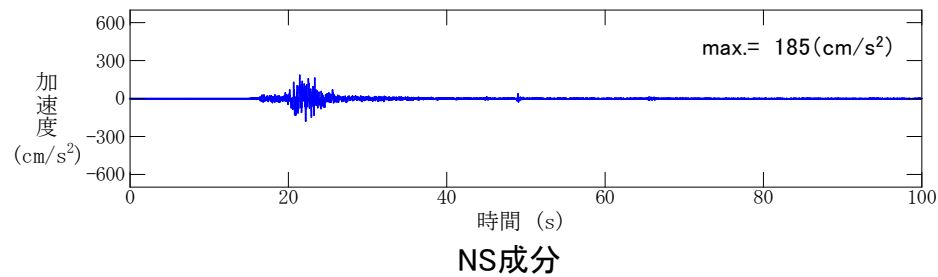
1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:KiK-net)

■ 加速度時刻歴波形



TTRH02(日野)の地中観測記録



SMNH01(伯太)の地中観測記録

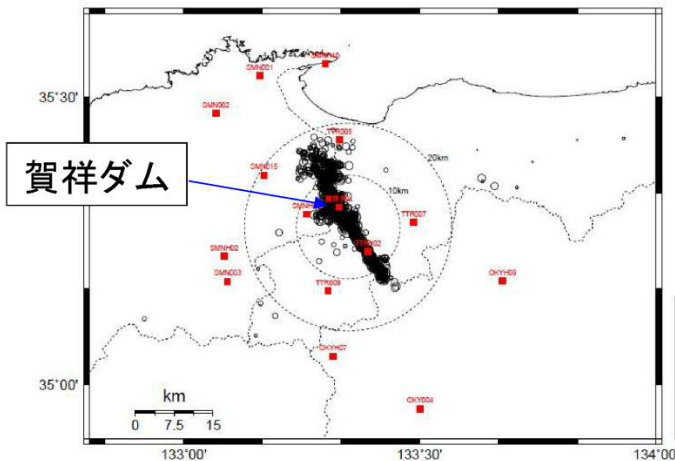
1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:賀祥ダム)

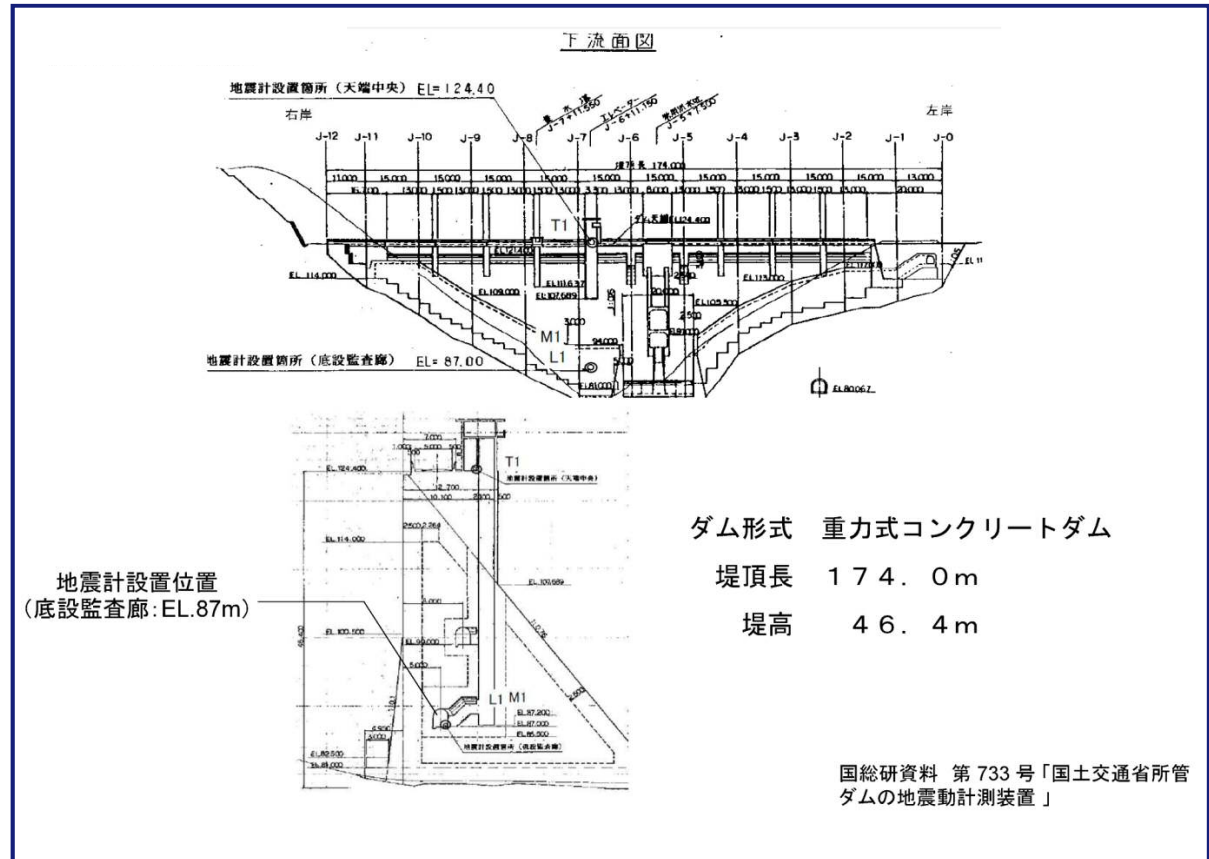
■ 賀祥ダムは、2000年鳥取県西部地震の震源直上に位置している。

賀祥ダムの概要

所在地	鳥取県
水系名	日野川
河川名	法勝寺川
竣工年	1989
最低基礎面標高	E.L.78.0m
天端標高	E.L.124.4m
堤高	46.4m



賀祥ダムの位置

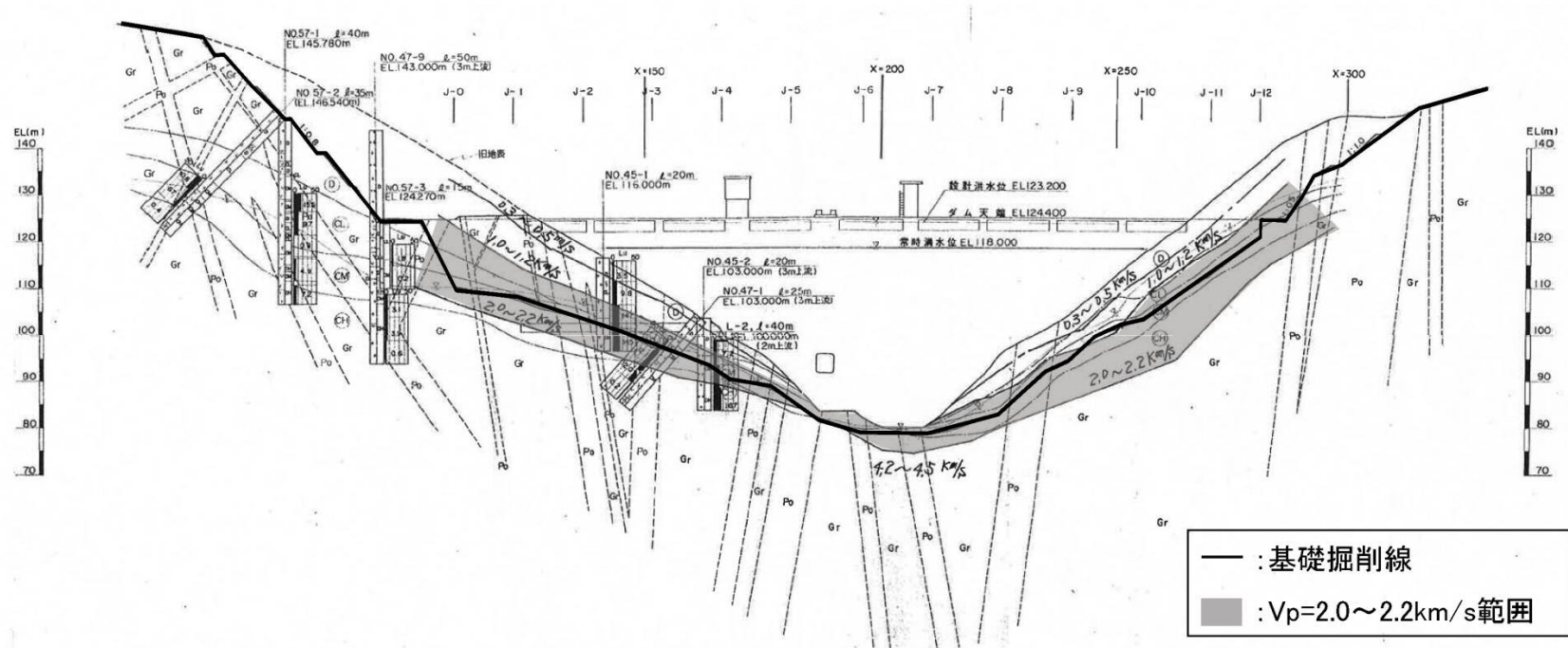


賀祥ダムの構造

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:賀祥ダム)

- 弾性波探査の結果, 4つの速度層に区分され, ダム基礎が設置されている第3速度層は, $V_p=2.0\sim 2.2\text{km/s}$ のCM級岩盤とされている。



弾性波速度と岩盤の関係

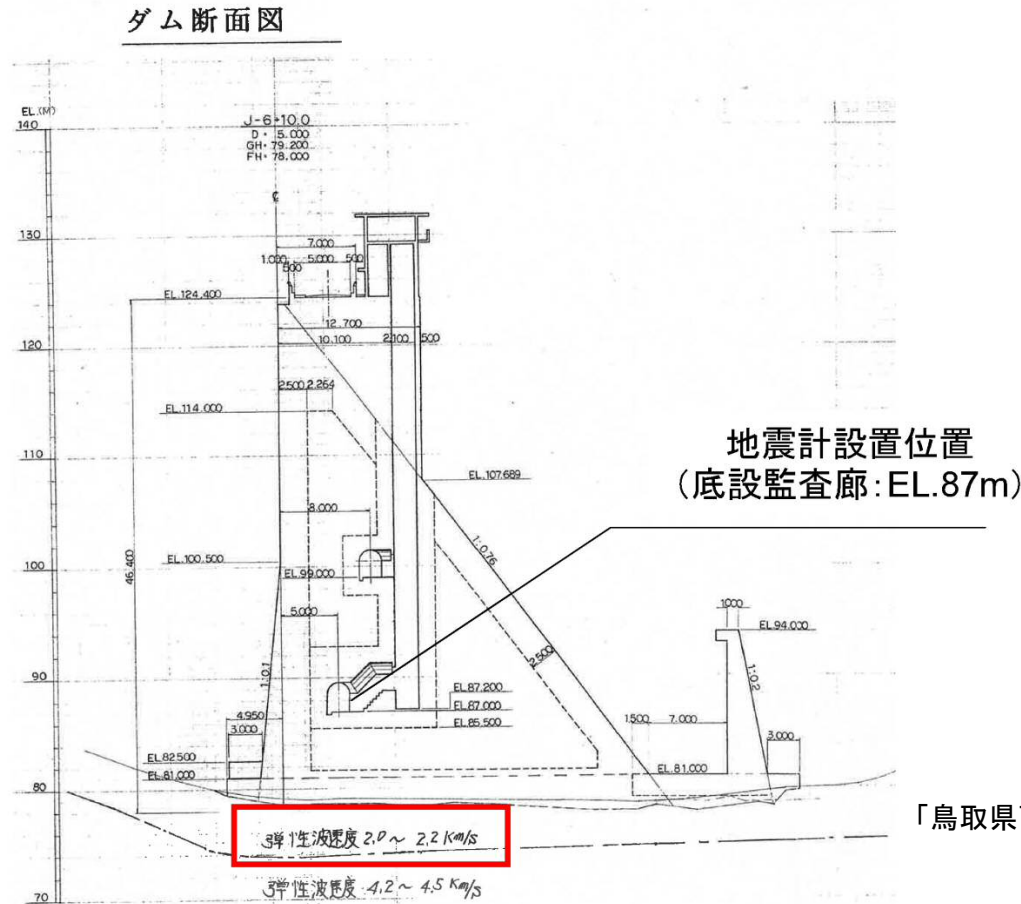
速度層名	速度 (km/sec)	層厚		岩級 区分
		左岸	右岸	
第1速度層	0.3~0.8	3~15	5~10	C _L
第2速度層	1.0~1.2	5~15	10~15	
第3速度層	2.0~2.2			C _M
第4速度層	3.6~4.5			C _H 以上

「鳥取県西部総合事務所」提供資料による

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:賀祥ダム)

- 賀祥ダム堤体は、基礎岩盤として $V_p=2.0\sim 2.2\text{km/s}$ のCM級岩盤に設置されているため、監査廊における観測記録は、ダム構造物の影響が全くないとはいえないものの、島根原子力発電所の解放基盤表面($V_s=1.5\text{km/s}$)に比べれば、速度の遅い岩盤上($V_s=1.2\sim 1.3\text{km/s}$ 程度)の記録であると判断されることから、観測記録をそのまま検討対象にすることは問題ないと考えられる。



ダム堤体底部はCM級岩盤に設置
 $V_p=2.0\sim 2.2\text{km/s}$

↓ V_p と V_s の一般的な関係式
($V_p=1.73 \times V_s$)を適用

$V_s=1.2\sim 1.3\text{km/s}$

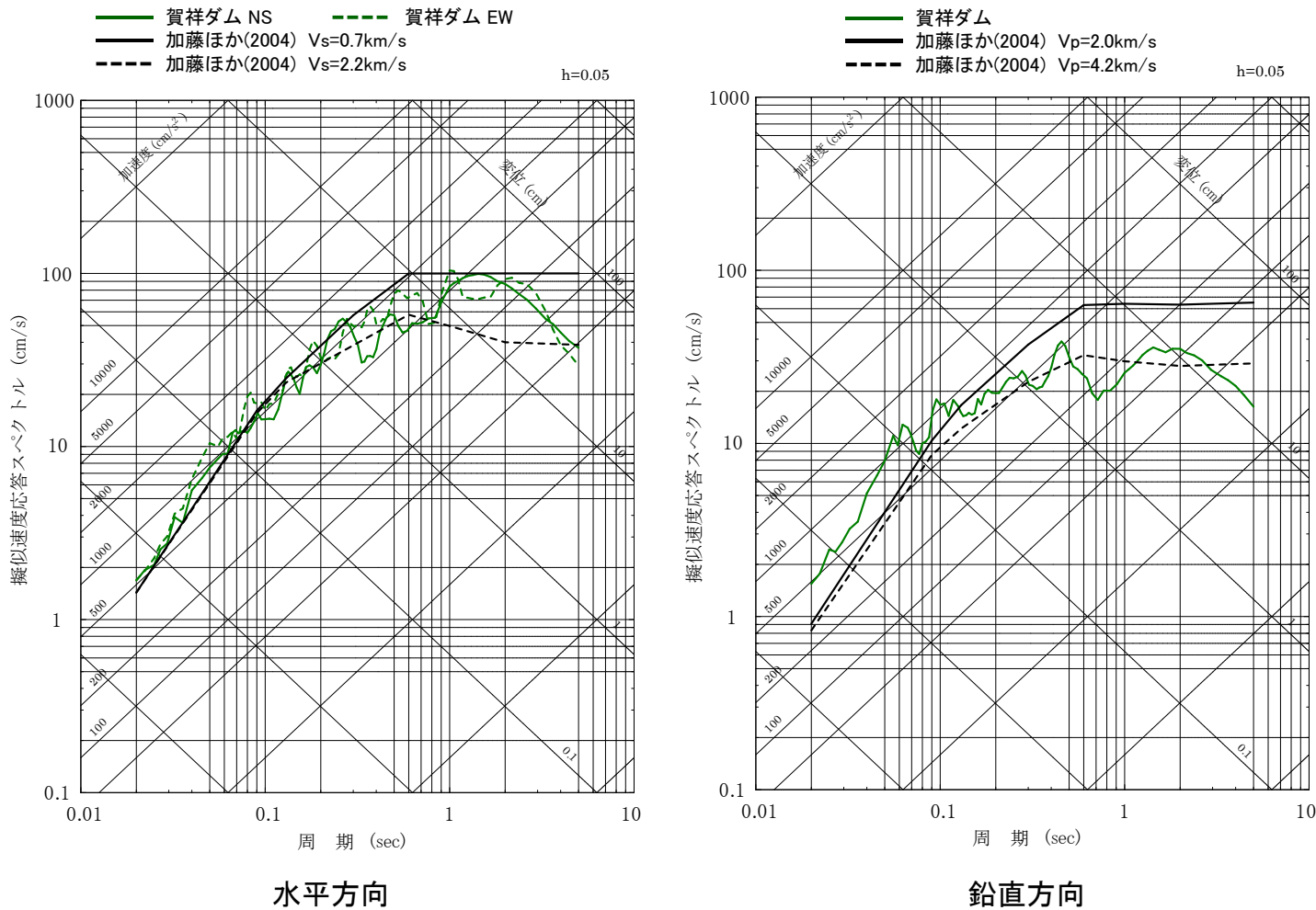
「鳥取県西部総合事務所」提供資料による

弾性波探査結果

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

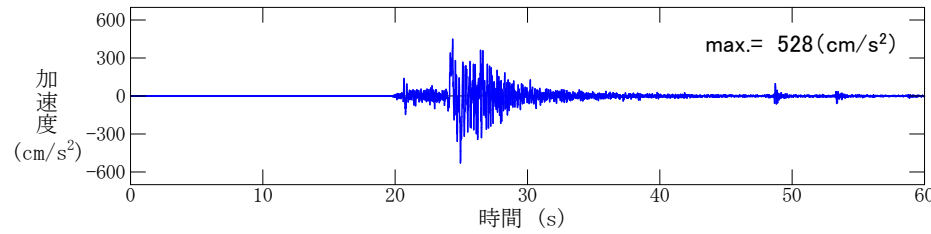
2000年鳥取県西部地震(観測記録の収集:賀祥ダム)

■ 賀祥ダム(監査廊)の観測記録は、加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回る。

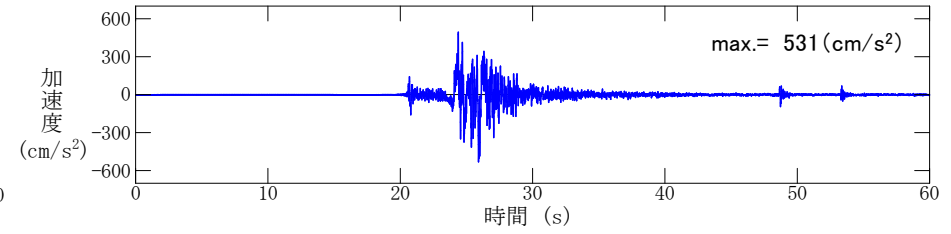


賀祥ダム(監査廊)の観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

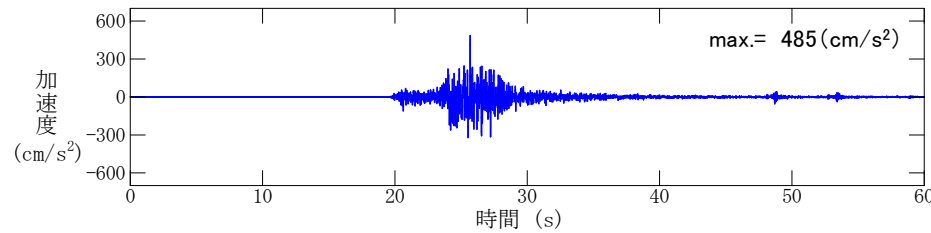
■ 加速度時刻歴波形



NS成分



EW成分



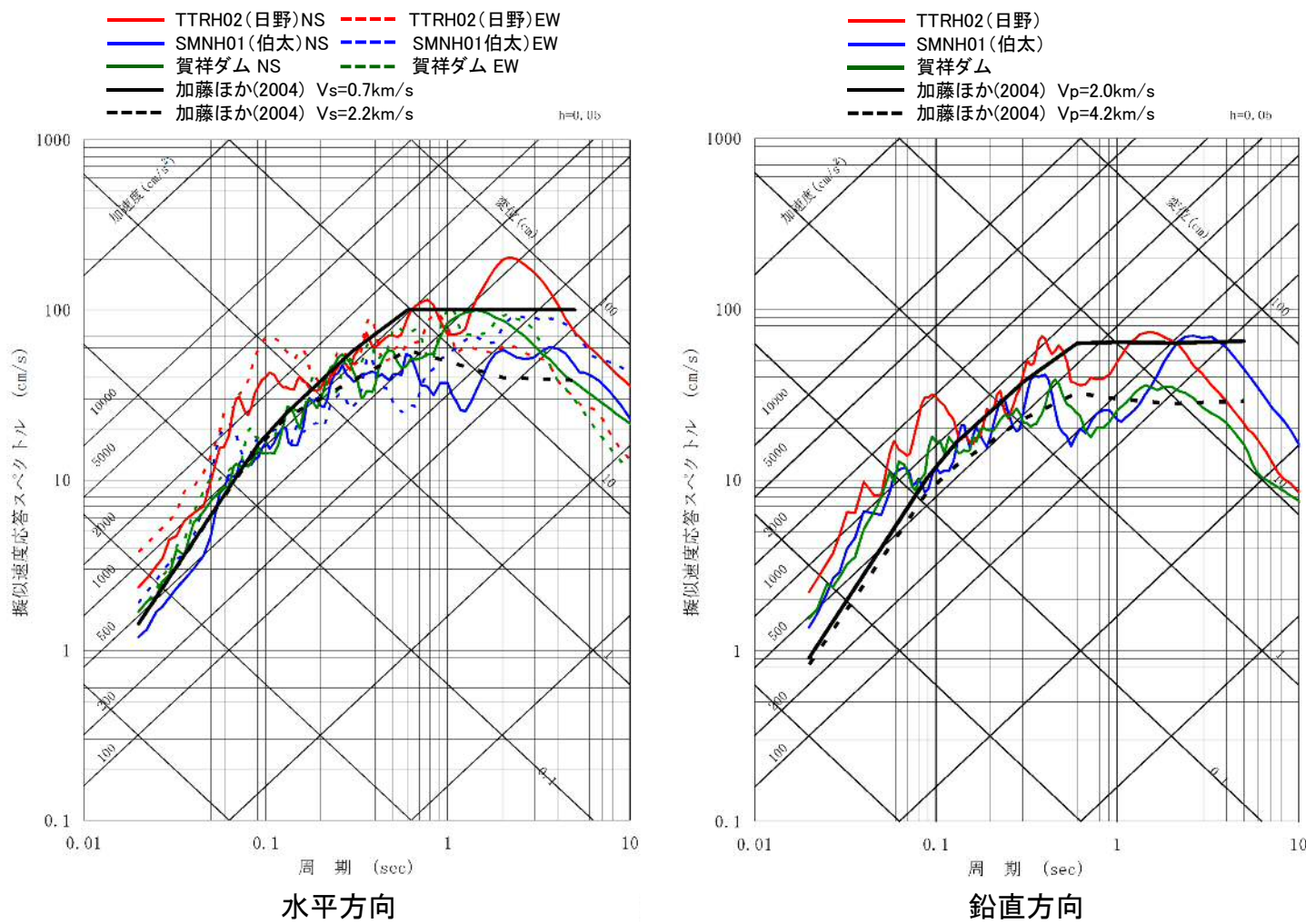
UD成分

賀祥ダム(監査廊)の観測記録

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(観測記録の選定)

■ 2000年鳥取県西部地震の震源近傍における観測記録を収集し、島根原子力発電所の「震源を特定せず策定する地震動」として考慮している加藤ほか(2004)の応答スペクトルと比較したところ、TTRH02(日野), SMNH01(伯太)及び賀祥ダム(監査廊)の観測記録が加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回ったことから、それらの観測記録について詳細に検討を行う。



賀祥ダム(監査廊)等の観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2000年鳥取県西部地震(既往の知見)

■ TTRH02(日野)及びSMNH01(伯太)の観測記録に関する既往の知見

- 永野ほか(2001)は、余震と本震の地中に対する地表のフーリエスペクトル比に基づいてS波速度構造を推定した結果、本震時に表層が非線形化した可能性を指摘
- 山田・三浦(2002)は、特性曲線法によるシミュレーション解析により表層地盤の非線形特性を同定

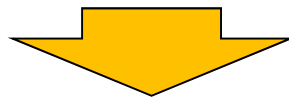
上記検討において含まれる課題

■ 2地点共通の問題点

- ① 本震時に表層が非線形化した可能性がある(永野ほか(2001), 山田・三浦(2002))
- ② 地中記録には地震計センサーの共振の影響と考えられる20Hzの高振動成分が含まれている可能性がある(笠原ほか(2000))

■ TTRH02(日野)の問題点

- ③ 地震計の観測小屋の問題として、TTRH02(日野)の地表観測記録には7~8Hzを中心に観測小屋の影響が含まれていることを指摘(日比野ほか(2003))
- ④ KiK-netにより公開されているPS検層結果では、観測記録の説明ができず、基盤層のS波速度はPS検層結果よりも高速度である可能性を指摘(永野ほか(2001), 山田・三浦(2002))
- ⑤ TTRH02(日野)の地表観測記録における地盤の2次元性の影響を指摘(中道・川瀬(2001))

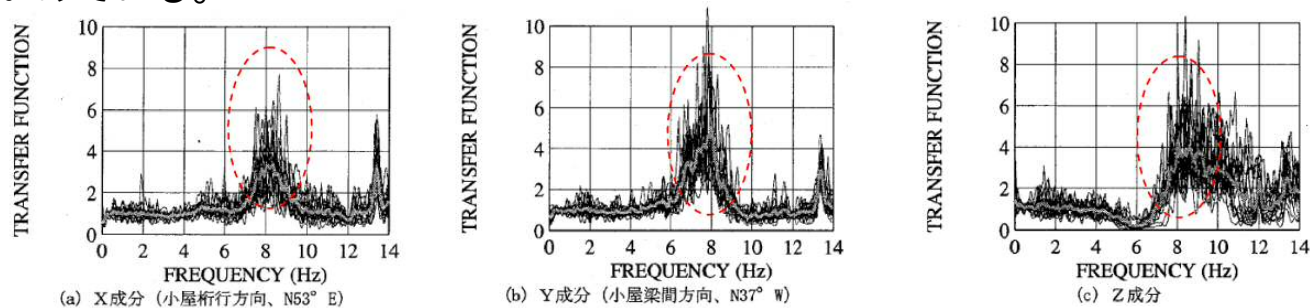


山添ほか(2004)の検討

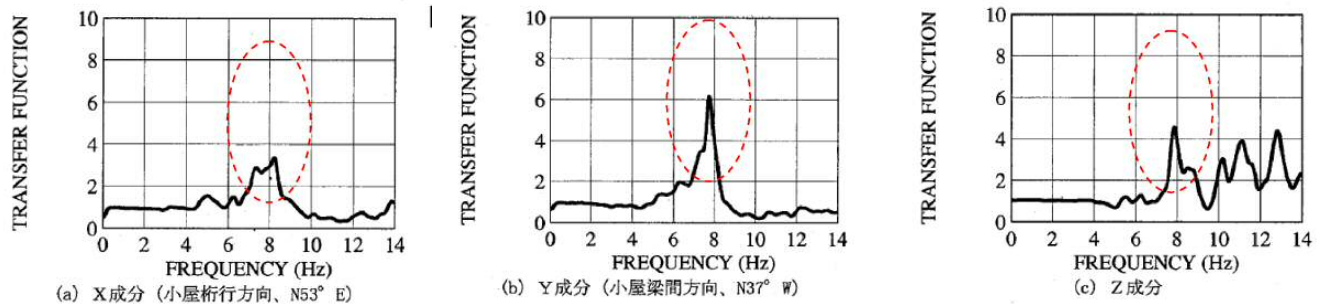
- 上記課題を回避するため、山添ほか(2004)では、本震前の観測記録を対象に、観測記録のスペクトル比の1次卓越振動数と1次元波動論による理論伝達関数の1次振動数との対応関係から0.5~5Hzを対象に初期地盤モデルを推定し、特性曲線法を用いて、地表観測記録から基盤地震動を評価している。

2000年鳥取県西部地震(日比野ほか(2003))

- 日比野ほか(2003)は, TTRH02(日野)の観測小屋土間上と観測小屋脇の自由地盤で微動観測を行い, 得られた微動記録及び地震記録の分析から, 観測小屋の影響を指摘している。
- また, 日比野ほか(2003)に記載されているとおり, 記録に見られる7~8Hz付近のピークが, 観測小屋の影響であることを確認するため, 現地において掛矢で打撃を加える加振実験を行っており, 建屋-地盤連成系の1次固有振動数がX方向で7.9Hz, Y方向で7.1Hzであり, ロッキングが卓越していることを確かめている。



微動記録における自由地盤と観測小屋土間上のフーリエスペクトル比



地震記録における自由地盤と観測小屋土間上のフーリエスペクトル比



TTRH02(日野)の地表観測記録については, 7~8Hz付近に観測小屋の影響があるため, 7Hzよりも短周期側の基盤地震動を精度良く評価することは困難であると考えられる。

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(山添ほか(2004))

- 永野ほか(2001), 山田・三浦(2002)が指摘したとおり, 地表記録と地中記録のフーリエスペクトル比と理論伝達関数の比較から, 本震時に表層地盤が非線形化していることを改めて確認している。
- さらに, TTRH02(日野)については, 永野ほか(2001), 山田・三浦(2002)が指摘したように, 地盤増幅を1次元波動論で説明しようとした場合, 基盤層のS波速度を1500m/s程度にする必要があることを改めて確認している。

PS検層結果による地盤構造

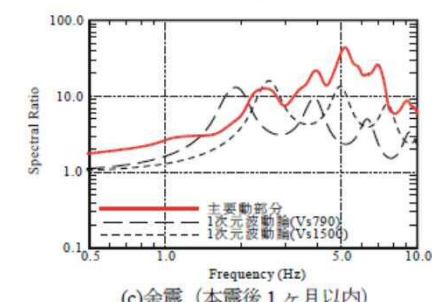
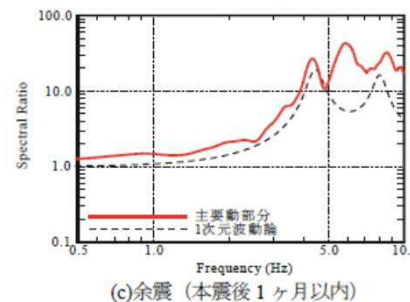
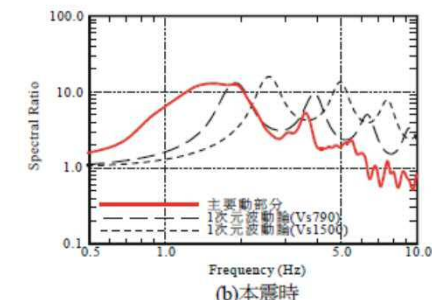
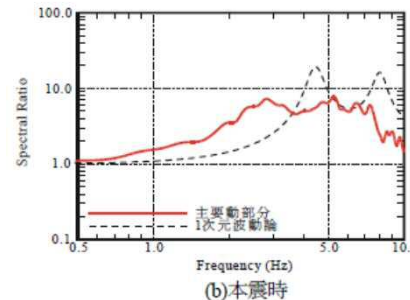
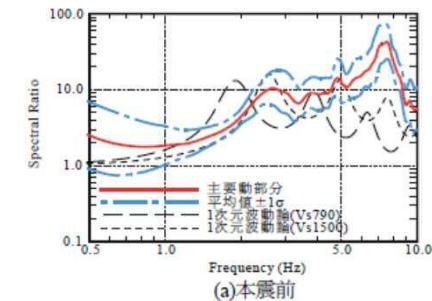
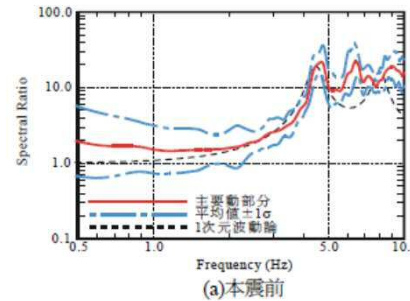
<伯太>

層	岩種区分	Vs(m/s)	Vp(m/s)	ρ	d(m)
1	盛土、シルト混じり砂礫	290	900	1.7	4
2	玉石混じり砂礫	290	1200	1.8	7
3	玄武岩	550	2500	2.2	11
4	玄武岩	1200	3700	2.4	20
5	玄武岩	1900	5300	2.6	12
6	玄武岩	2800	5300	2.6	-

<日野>

層	岩種区分	Vs(m/s)	Vp(m/s)	ρ	d(m)
1	砂礫	210	860	1.7	11
2	花崗岩	340	1500	1.9	9
3		560	2100	2.1	22
4	安山岩 花崗岩	790 (1500)*1	2600	2.2	-

注1) 括弧内の値は、文献2).3)において余震記録に基づく検討から推定された値



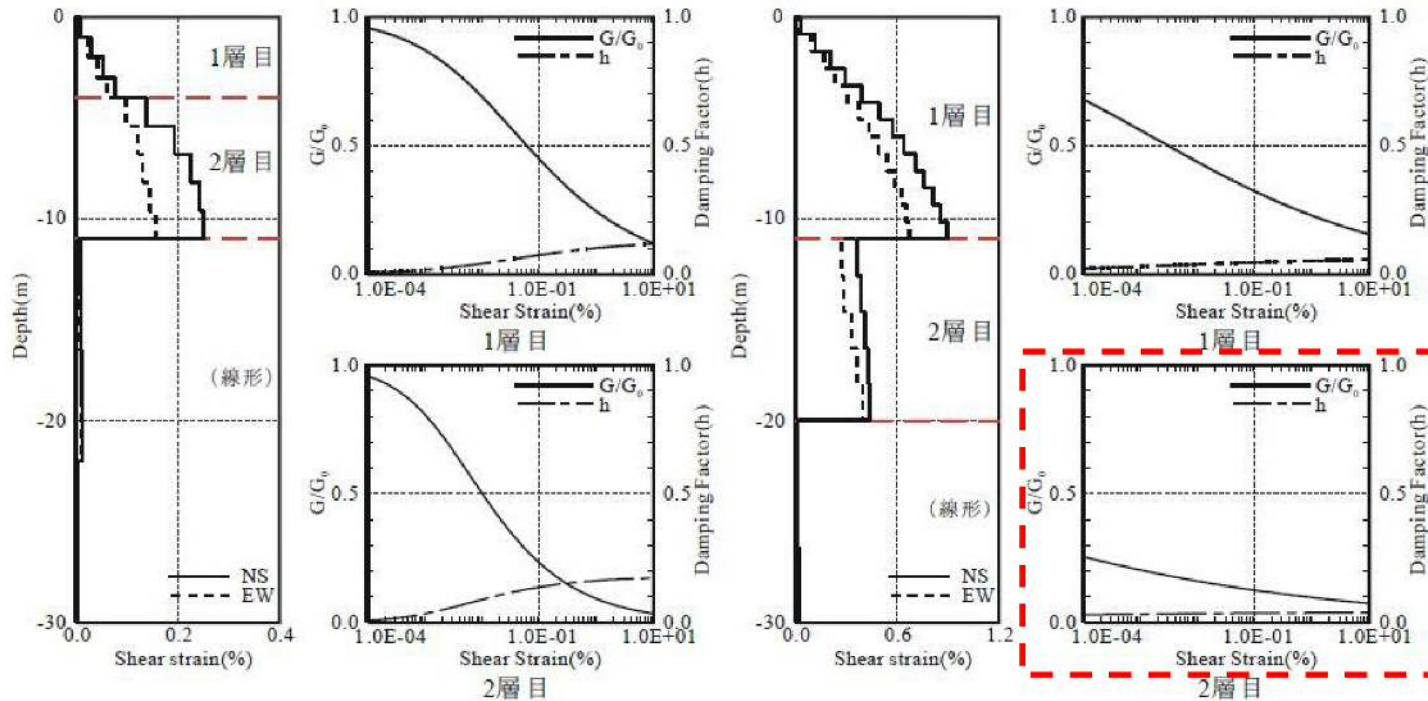
伯太

日野

地表記録と地中記録のフーリエスペクトル比

2000年鳥取県西部地震(山添ほか(2004))

- 山添ほか(2004)では, シミュレーション解析時に得られたTTRH02(日野)における非線形特性は, 一般的な非線形特性とは異なり, 特に2層目の形状は, $1.0 \times 10^{-4}\%$ の微小ひずみ時で剛性低下率が既に0.3程度で, ひずみが大きくなっても減衰定数の上昇が見られないなど特異な形状となっており, 観測記録から評価されるTTRH02(日野)の地中に対する地表の地盤増幅が, 1次元波動論で考えられるよりも大きな増幅であることを示すとしている。



(a)最大せん断ひずみ分布 (b)非線形特性
伯太の最大せん断ひずみ分布と非線形特性

(a)最大せん断ひずみ分布 (b)非線形特性
日野の最大せん断ひずみ分布と非線形特性

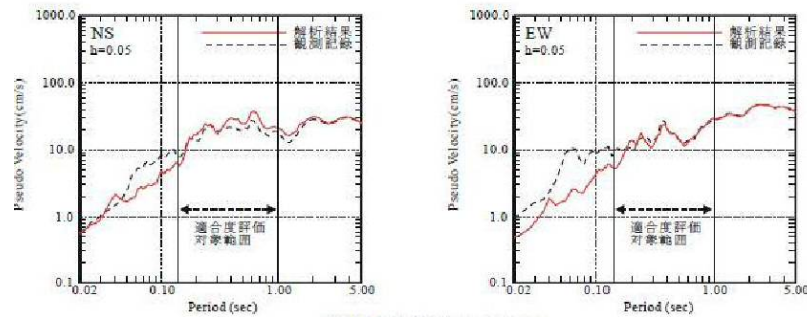


TTRH02(日野)については, 1次元波動論で説明しようとした場合, 非現実的な地盤特性を与える必要があるため, 観測記録を1次元波動論で説明することは困難と考えられる。

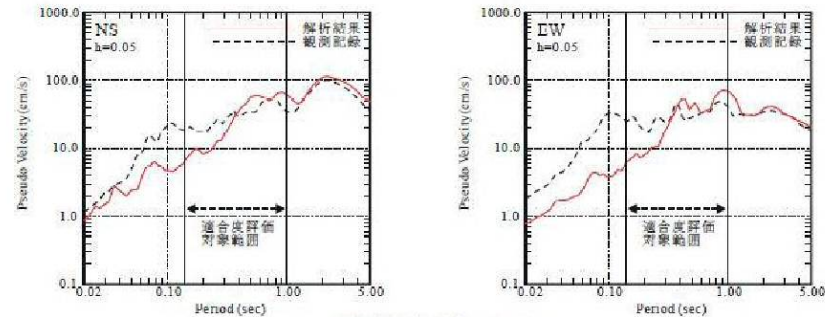
1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(山添ほか(2004))

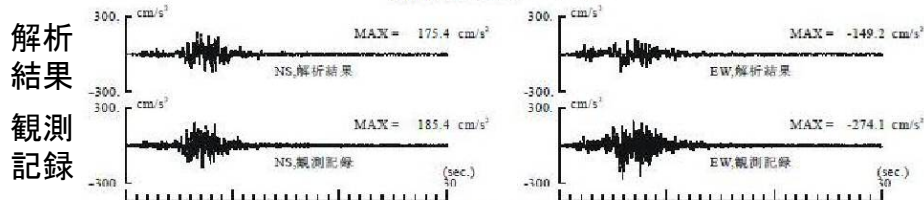
■ 山添ほか(2004)では、特性曲線法による地中記録の再現解析の結果、SMNH01(伯太)・TTRH02(日野)ともに、高周波数ノイズの影響を回避して解析したため、加速度時刻歴波形は記録と対応していないが、速度時刻歴波形は良く対応し、また、応答スペクトルについては、SMNH01(伯太)は0.14秒より長周期側で、TTRH02(日野)は0.3秒より長周期側で良く対応するとしている。



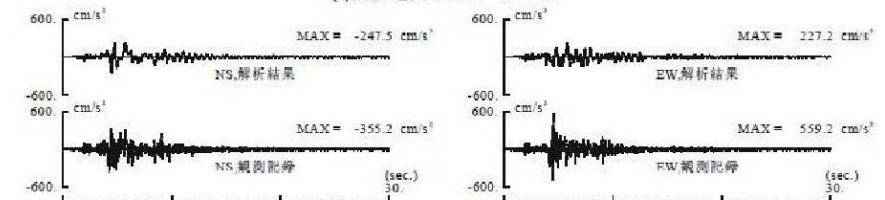
(a)擬似速度応答スペクトル



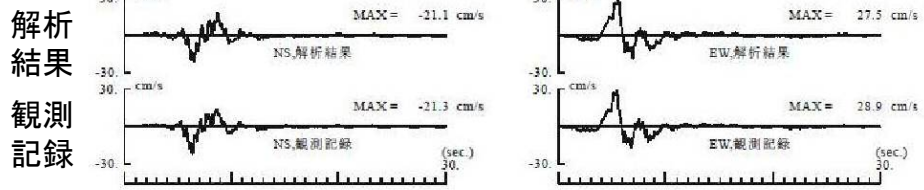
(a)擬似速度応答スペクトル



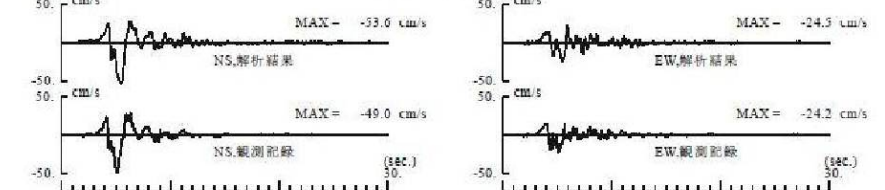
(b)加速度波形



(b)加速度波形



(c)速度波形



(c)速度波形

NS成分

EW成分

NS成分

EW成分

伯太

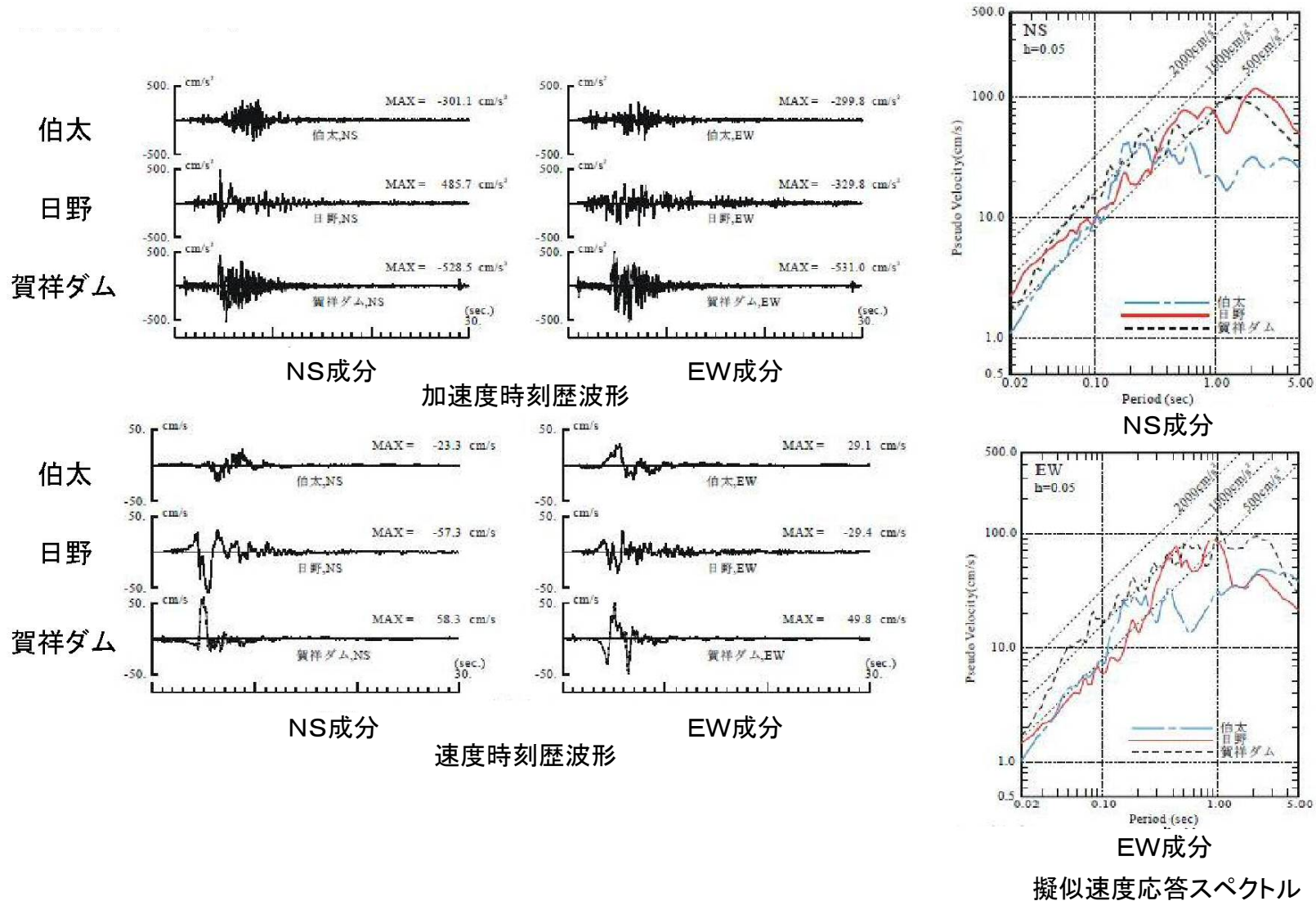
日野

観測記録と解析結果の比較(上段:擬似速度応答スペクトル, 中段:加速度時刻歴波形, 下段:速度時刻歴波形)

1. Mw6.5以上の地震(2地震)に関する検討

2000年鳥取県西部地震(山添ほか(2004))

- 山添ほか(2004)では, 推定されたSMNH01(伯太)・TTRH02(日野)の基盤地震動は, 賀祥ダムの観測記録とほぼ同程度のレベルであると評価している。

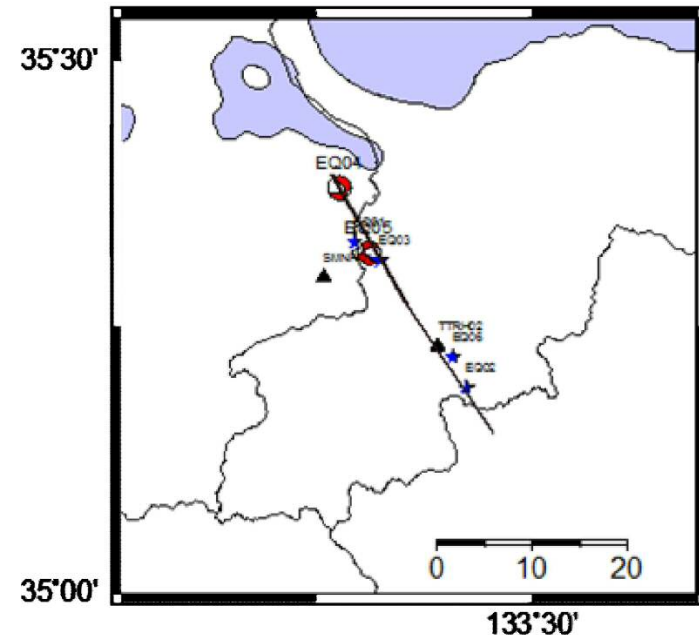


2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

- SMNH01(伯太)について、地震計センサーの共振の影響を避けるため、センサー更新後の共振の影響のない最近の地震記録を用い、再度地盤モデルの同定を行い、基盤地震動を評価する。
- 検討対象地震は以下に示す中小地震の6地震とし、それらの平均伝達関数をターゲット(20Hz以下)として地盤同定を行う。

検討対象地震の諸元

ID	発震年月日・時刻						震央位置				深さ (km)	Mj
	年	月	日	時	分	秒	緯度		経度			
01	2008	5	13	15	25	29.92	35	19.79	133	17.72	9.4	2.8
02	2008	5	16	7	16	14.68	35	11.52	133	25.4	5.89	3
03	2008	10	21	10	7	25.62	35	18.73	133	19.46	7.47	3
04	2008	11	23	13	56	17.73	35	22.82	133	16.69	11.56	3.3
05	2008	12	22	22	24	25.41	35	19.16	133	18.72	8.01	3.6
06	2010	5	15	1	44	30.11	35	13.27	133	24.49	9.35	2.9



検討対象地震の震央分布

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

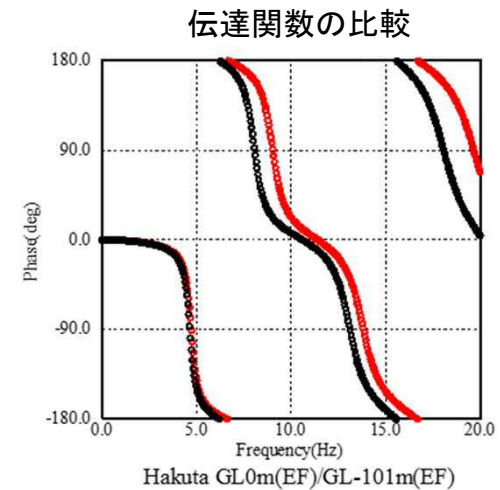
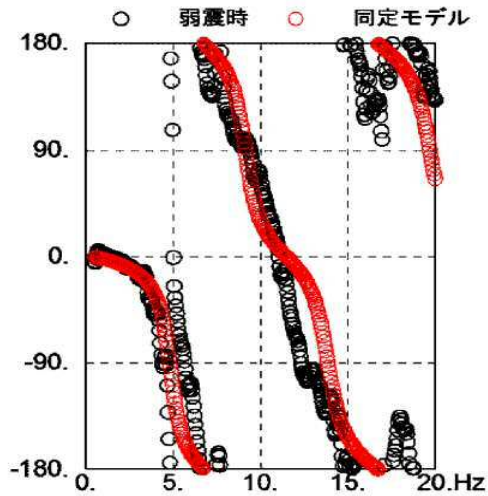
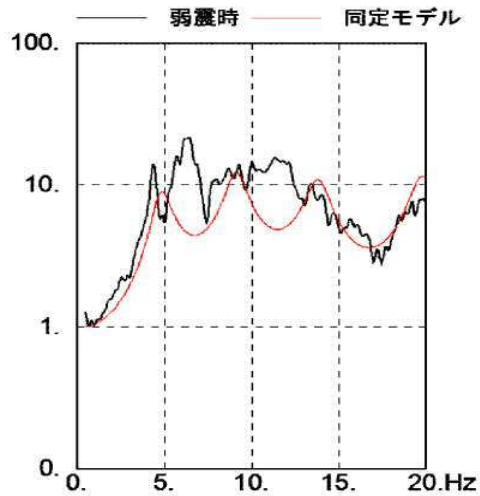
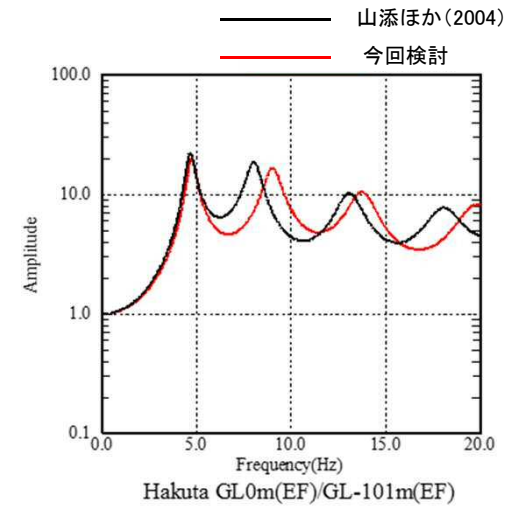
■ SMNH01(伯太)の地盤モデルの同定結果をみると、下層のVsの値が従来よりも若干大きく評価されている。この地盤モデルを用いて基盤地震動の評価を行う。

同定地盤モデル

伯太	density	thickness (m)	山添ほか(2004)	今回検討
			Vs(m/s)	Vs(m/s)
1	1.7	4	245	290
2	1.8	7	302	290
3	2.2	11	622	549
4	2.4	20	1290	1474
5	2.6	12	2012	2334
6	2.6	47	2664	3440
7	2.6		2664	3440

GL-22m → (row 3)

GL-101m (地中地震計) → (row 6)



伝達関数の比較

位相特性の比較

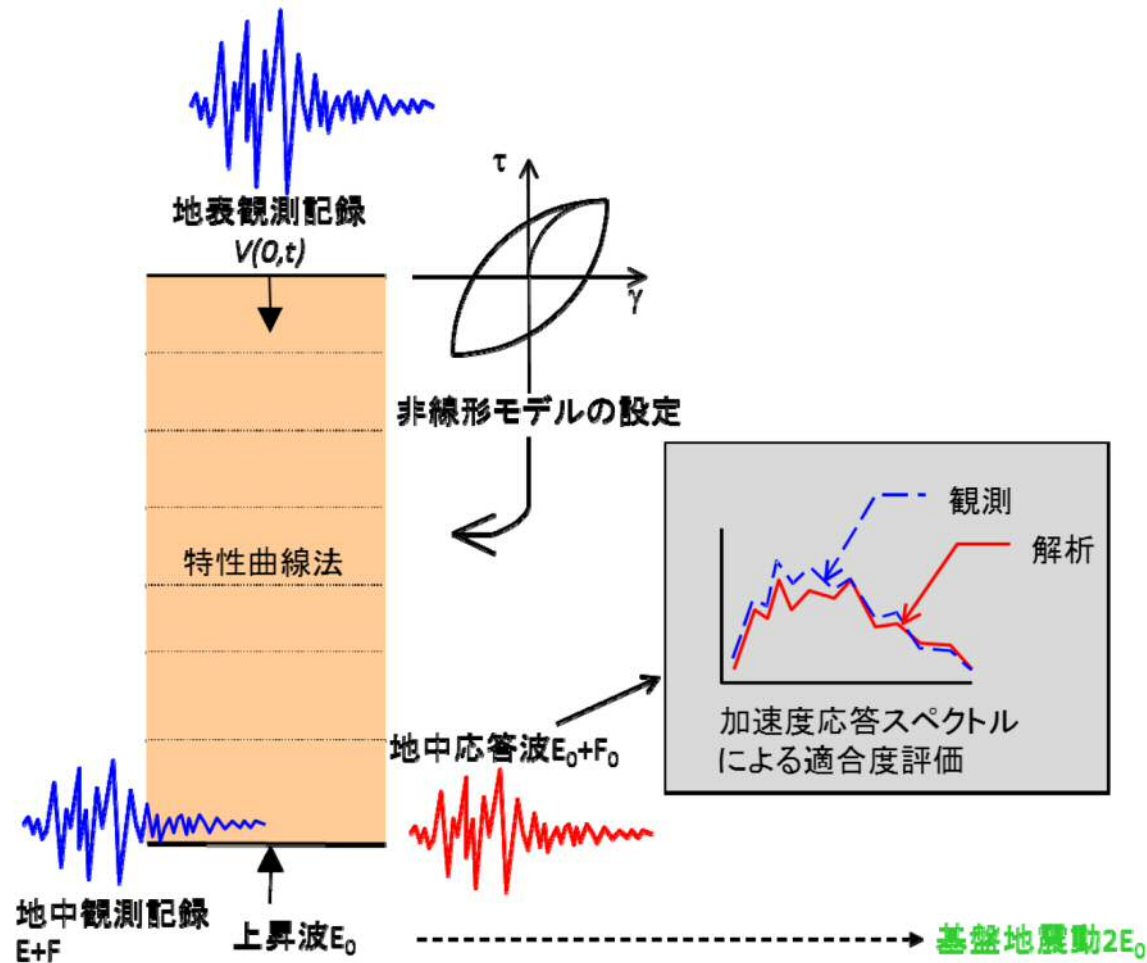
位相特性の比較

今回検討結果

山添ほか(2004)と今回検討結果の比較

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

- 山添ほか(2004)と同様に, 2000年鳥取県西部地震の本震記録を対象として, 特性曲線法を用いて地表記録から基盤地震動を推定した。



基盤地震動の推定方法(イメージ)

■ 特性曲線法の概要

- 特性曲線法とは
 - ✓ 偏微分方程式の一般解法
 - ✓ 方向の異なる二種類の特性曲線から形成される二次元平面上の網目に沿って、偏微分方程式を未知量の増分形に変換して解く手法

• 一次元波動方程式への適用

R点の速度 V_R せん断応力 τ_R は上層P,S点の既知量を用いて表される

$$V_R = \frac{1}{2} \left\{ (V_S + V_P) + \frac{1}{\rho_n C_n} (\tau_S - \tau_P) \right\}$$

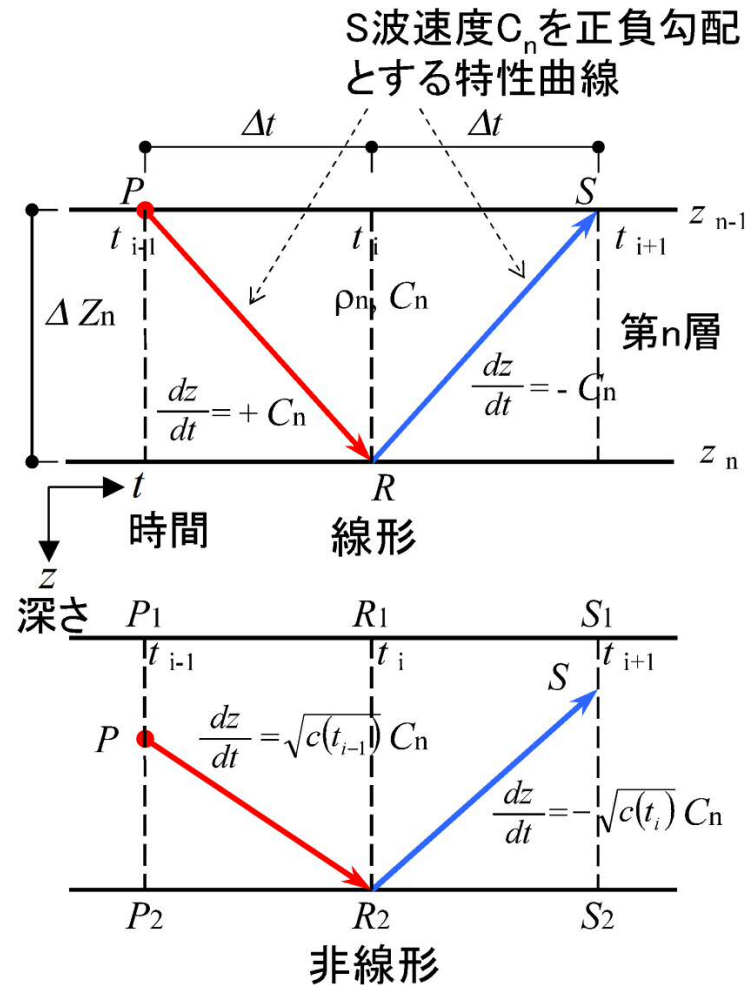
$$\tau_R = \frac{1}{2} \left\{ \rho_n C_n (V_S - V_P) + (\tau_S + \tau_P) \right\}$$



下層に向けて、順次解き進める

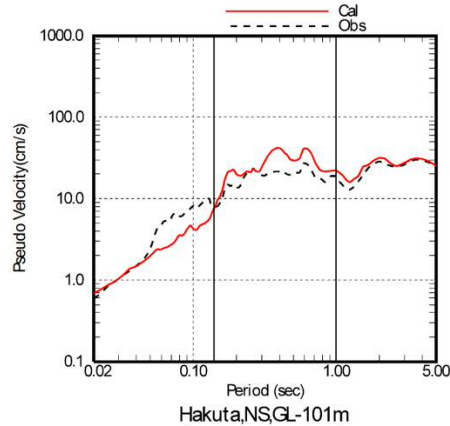


地表記録を用いた時刻歴の逆地震応答解析が可能

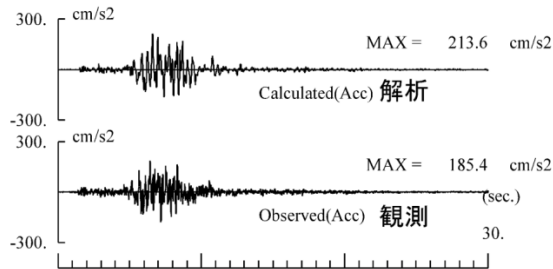


山田有孝、三浦賢治: 特性曲線法を用いた2000年鳥取県西部地震の地盤震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第558号、pp.77-83、2002.8

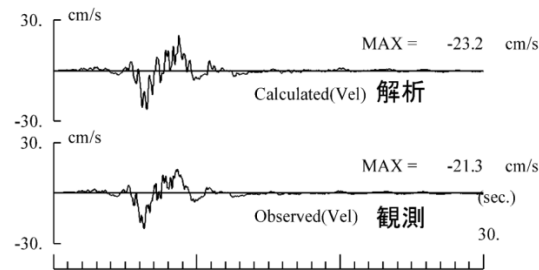
■ 特性曲線法による地中観測記録の再現解析結果



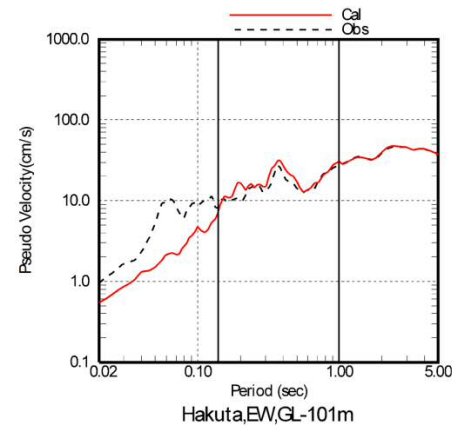
擬似速度応答スペクトル(NS成分)



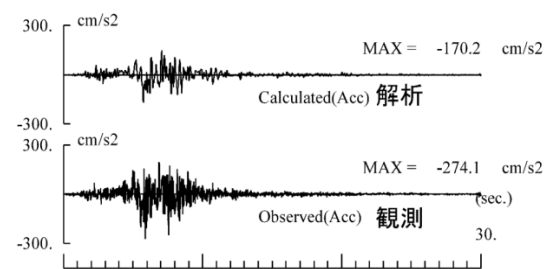
加速度時刻歴波形(NS成分)



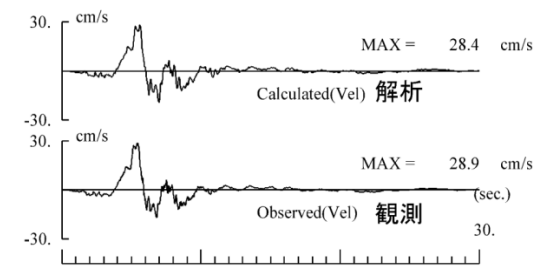
速度時刻歴波形(NS成分)



擬似速度応答スペクトル(EW成分)



加速度時刻歴波形(EW成分)

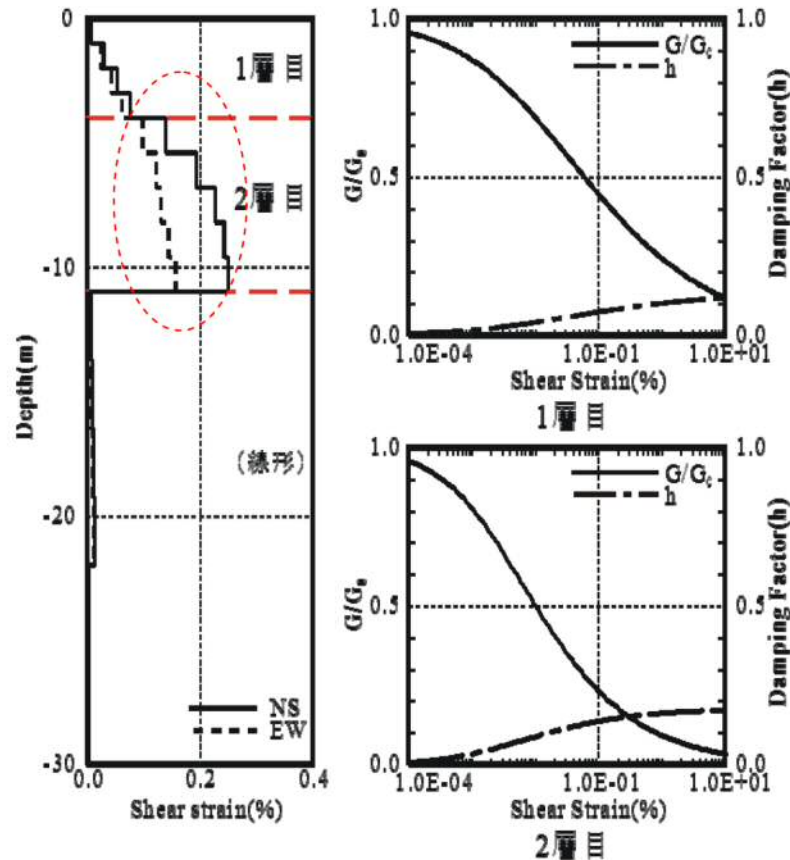


速度時刻歴波形(EW成分)

観測記録と解析結果の比較(上段:擬似速度応答スペクトル, 中段:加速度時刻歴波形, 下段:速度時刻歴波形)

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

■ 本震時の最大せん断ひずみ分布と非線形特性は、山添ほか(2004)による結果と概ね同等となった。

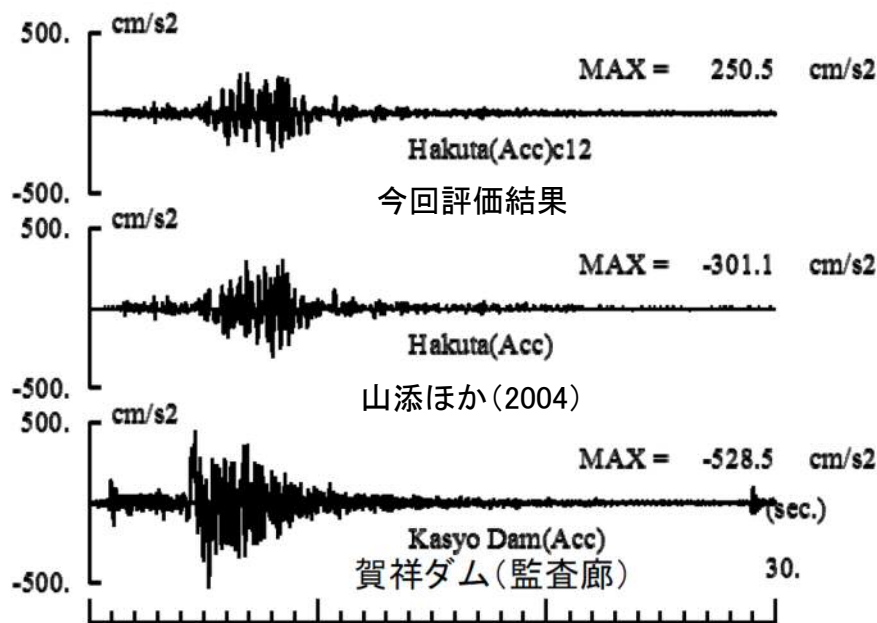


山添ほか(2004)による結果

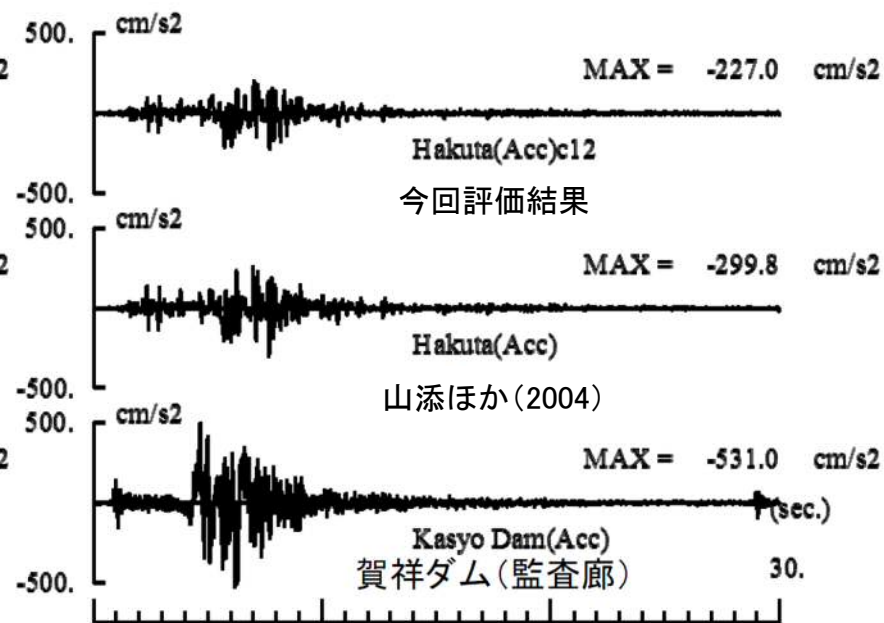
今回の検討結果

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

- 今回評価した基盤地震動(GL-101m)の加速度時刻歴波形と山添ほか(2004)の評価結果を比較すると、最大加速度は今回の方がやや小さく評価された。
- また、今回の評価結果と賀祥ダム(監査廊)の観測記録を比較すると、最大加速度は賀祥ダムの方が大きくなった。



NS成分

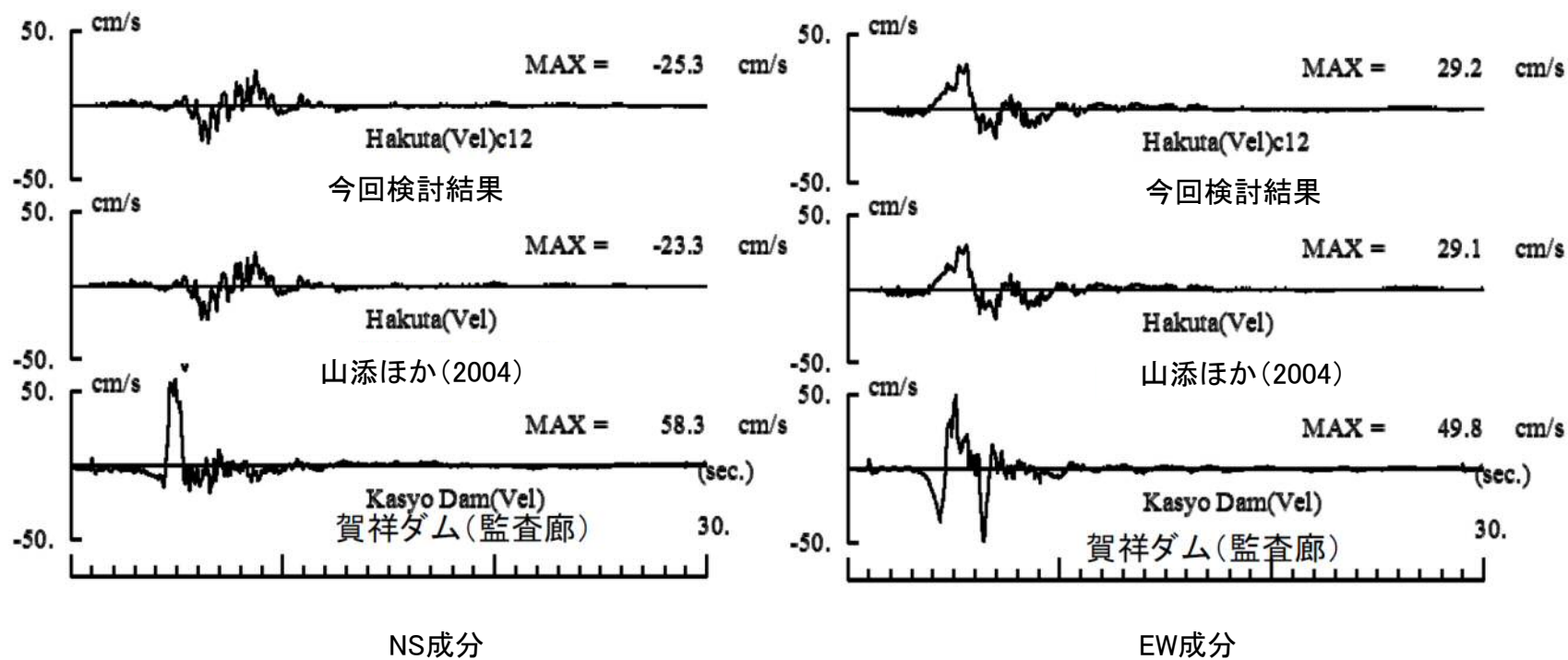


EW成分

加速度時刻歴波形の比較

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

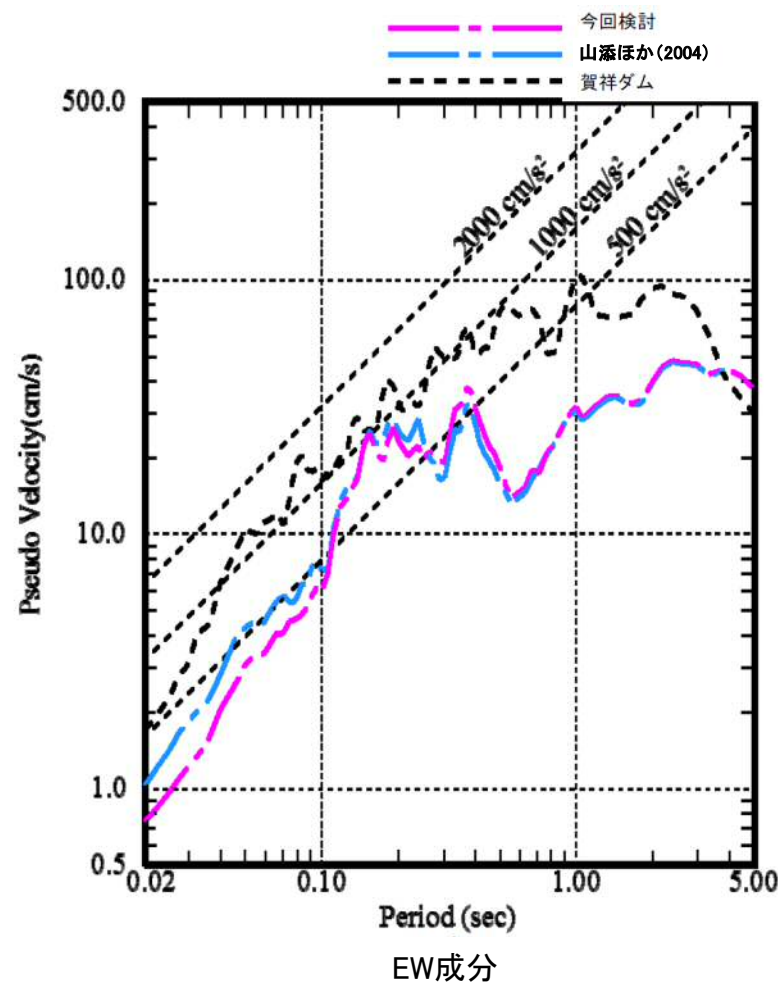
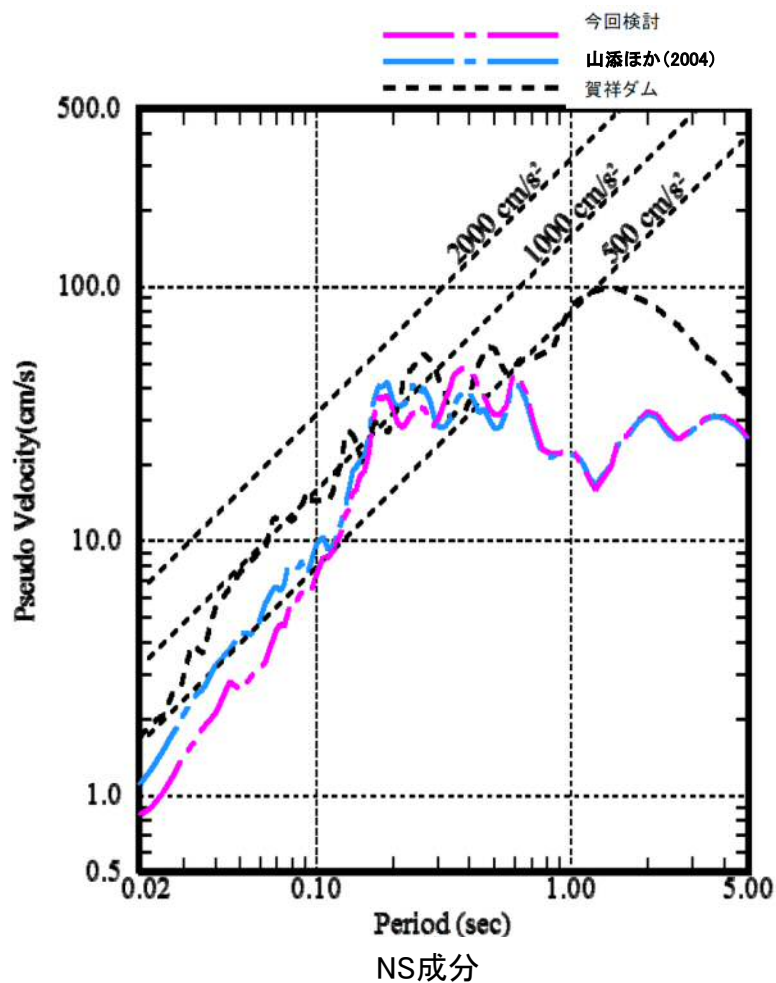
- 今回評価した基盤地震動(GL-101m)の速度時刻歴波形と山添ほか(2004)の評価結果を比較すると、最大速度はほぼ同程度となった。
- また、今回の評価結果と賀祥ダム(監査廊)の観測記録を比較すると、最大速度は賀祥ダムの方が大きくなった。



速度時刻歴波形の比較

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

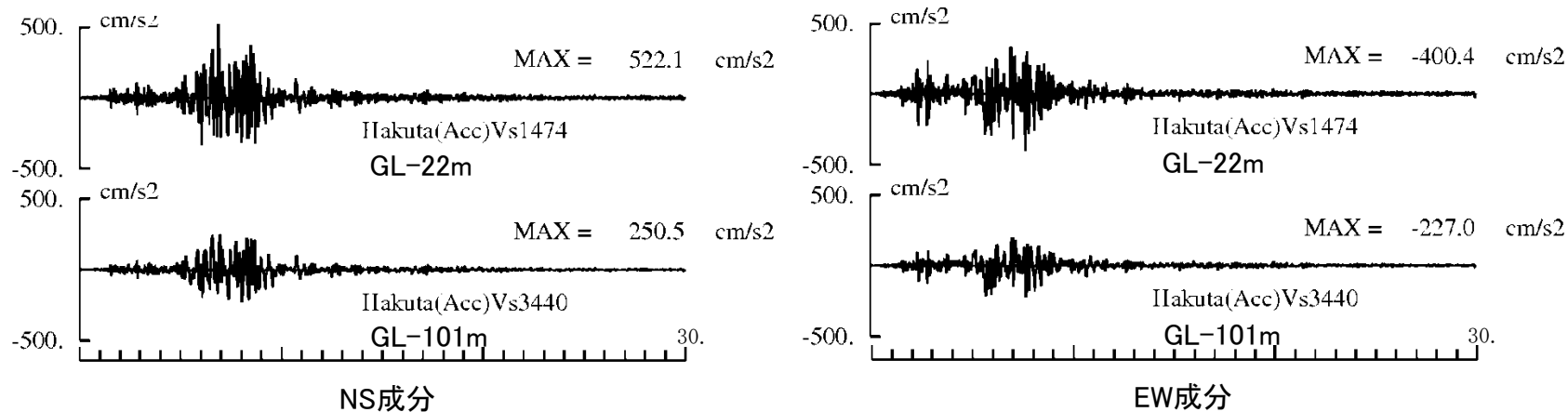
- 今回評価した基盤地震動(GL-101m)の地震動レベルは、山添ほか(2004)の結果と比較すると、特に0.1秒以下の短周期側が小さくなった。
- また、賀祥ダム(監査廊)の観測記録と比較すると、ほとんどの周期帯で賀祥ダムを下回った。



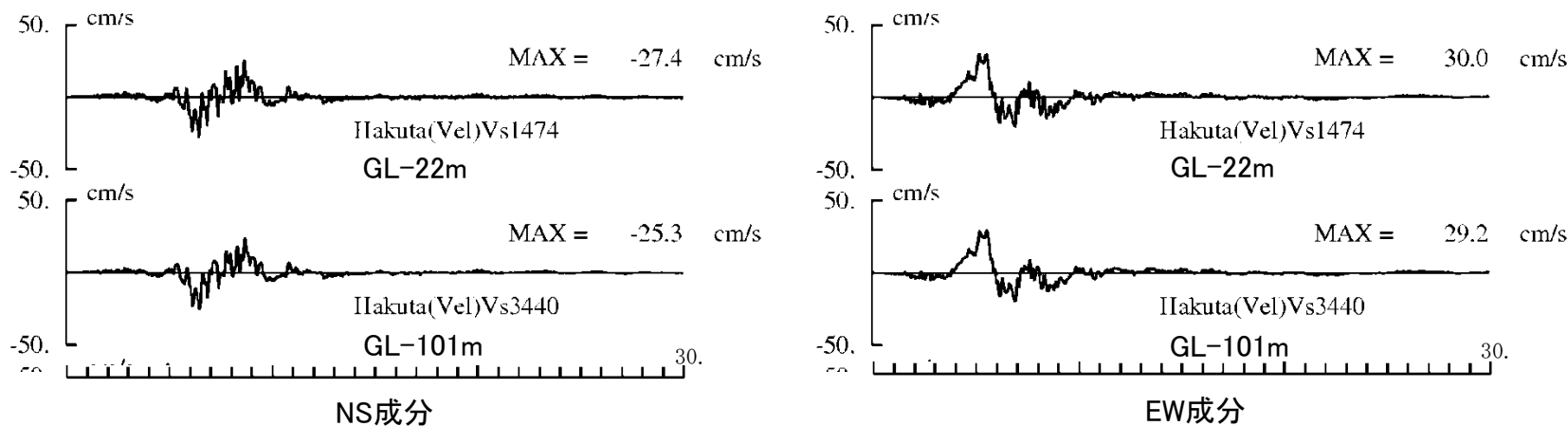
擬似速度応答スペクトルの比較

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

- 島根原子力発電所の解放基盤表面におけるS波速度は1500m/s程度であるため、ほぼ同程度のS波速度となるSMNH01(伯太)のGL-22m(S波速度: 1474m/s)の地震動を評価すると、GL-101mの基盤地震動よりも最大加速度は大きく、最大速度はやや大きめとなった。



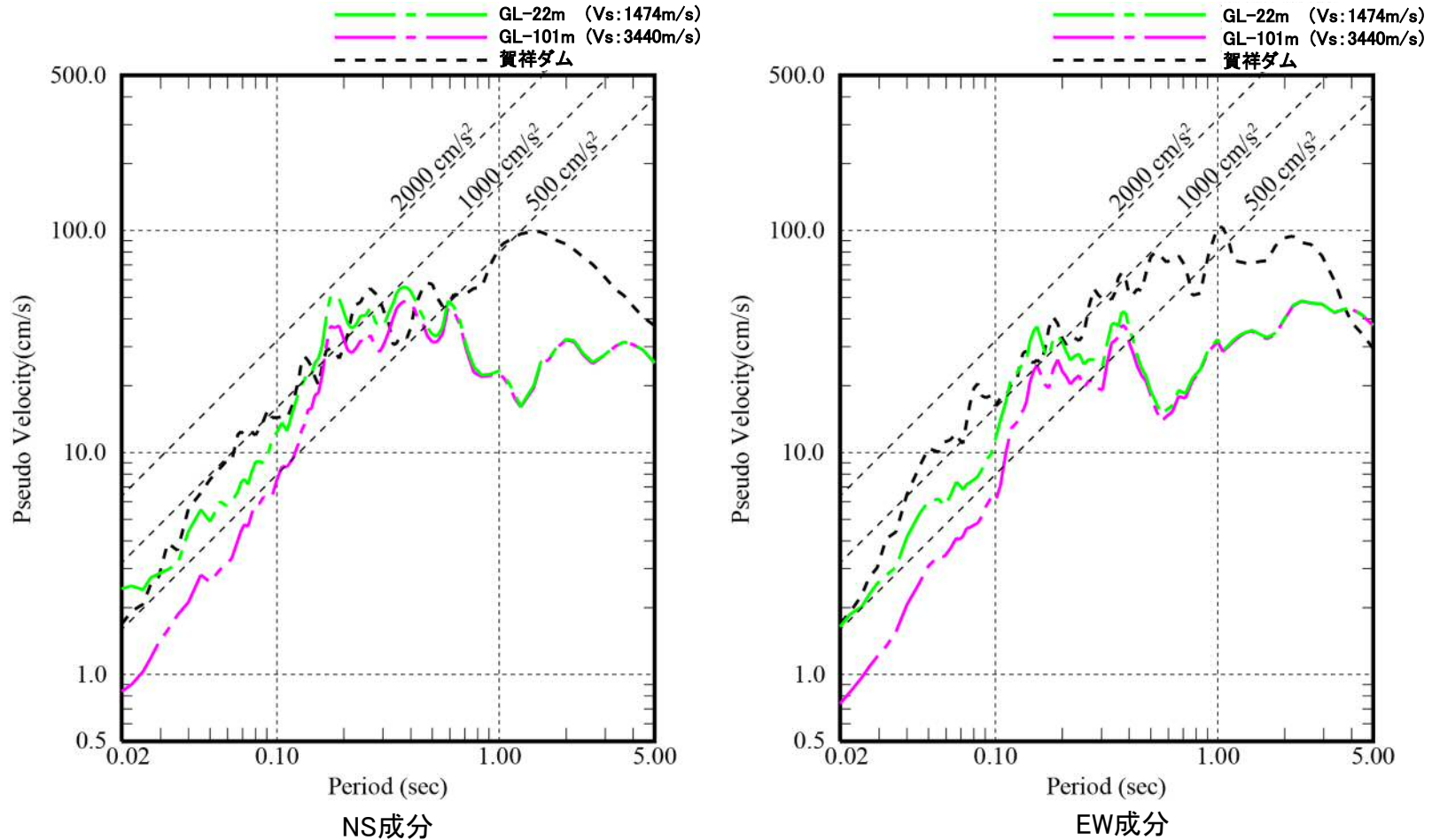
加速度時刻歴波形の比較



速度時刻歴波形の比較

2000年鳥取県西部地震(追加検討: SMNH01(伯太))

- SMNH01(伯太)のGL-22m(S波速度:1474m/s)における地震動レベルは、GL-101mの基盤地震動と比較すると短周期域で大きくなったが、賀祥ダム(監査廊)の観測記録と比較するとほとんどの周期帯で賀祥ダムを下回った。



擬似速度応答スペクトルの比較



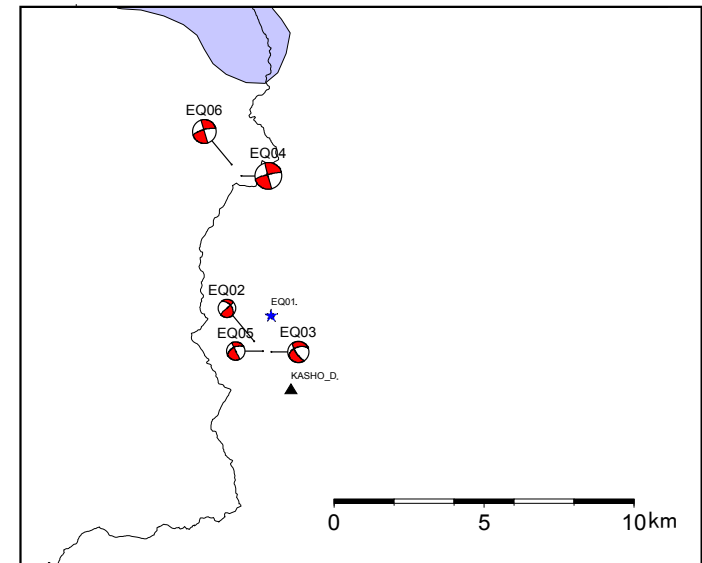
SMNH01(伯太)については、賀祥ダム(監査廊)の観測記録により代表できると考えられる。

2000年鳥取県西部地震(追加検討:賀祥ダム)

- 賀祥ダム(監査廊)の観測記録について、非線形性の影響が見られるか確認するため、2000年鳥取県西部地震の本震と余震における賀祥ダム(監査廊)の観測記録に基づくH/Vスペクトルを比較する。
- 2000年鳥取県西部地震の余震については、以下に示す6地震を検討対象とする。

検討対象地震の諸元

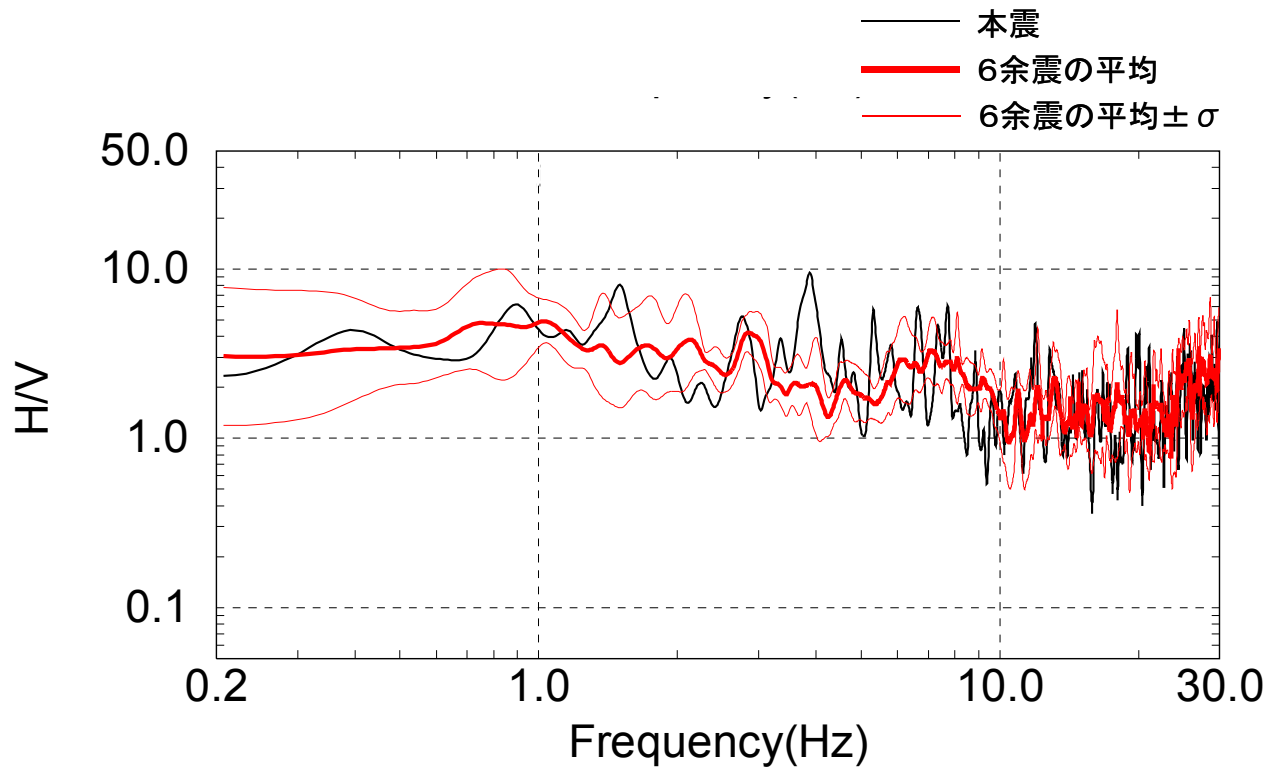
ID	発震年月日・時刻						震央位置				深さ (km)	Mj
	年	月	日	時	分	秒	緯度		経度			
本震	2000	10	6	13	30	17.94	35	16.45	133	20.94	8.96	7.3
01	2000	10	6	21	28	59.89	35	19.56	133	19.30	6.75	3.8
02	2000	10	7	12	14	23.58	35	19.10	133	18.93	6.43	3.3
03	2000	10	7	18	32	11.44	35	18.90	133	19.31	7.53	4.0
04	2000	10	8	20	51	17.10	35	22.13	133	18.64	8.30	5.2
05	2000	10	10	2	26	16.80	35	18.92	133	19.12	5.97	3.3
06	2000	10	10	21	57	59.53	35	22.34	133	18.43	9.86	4.4



検討対象地震の震央分布

2000年鳥取県西部地震(追加検討: 賀祥ダム)

- 2000年鳥取県西部地震の本震と余震における賀祥ダム(監査廊)の観測記録に基づくH/Vスペクトルを比較すると、概ね同様の結果となっていることから、本震の観測記録には非線形性は見られないと考えられる。



H/Vスペクトルの比較(2000年鳥取県西部地震の本震, 余震)



賀祥ダム(監査廊)の観測記録については、非線形化していない岩盤上の記録と考えられる。

2000年鳥取県西部地震(まとめ)

- TTRH02(日野), SMNH01(伯太)及び賀祥ダム(監査廊)の観測記録について詳細に検討した。

TTRH02(日野)

- ◆ 日比野ほか(2003)などの知見より, 観測記録に関する短周期側の問題や, 表層地盤の影響による問題などが指摘されており, 短周期側まで含めた基盤地震動の評価は困難と考えられる。
- ◆ 山添ほか(2004)では, 観測記録に関する短周期側の問題を回避してTTRH02(日野)の基盤地震動を推定した結果, 長周期側では賀祥ダム(監査廊)の観測記録と概ね同程度となっている。一方, 得られた非線形特性が特異な形状となっているため, 1次元波動論では地表記録の説明は困難であるとしている。
- 以上より, TTRH02(日野)については, 短周期側まで含めた精度のよい基盤地震動の推定は困難であると判断し, 対象外とする。

SMNH01(伯太)

- ◆ 山添ほか(2004)では, 観測記録に関する短周期側の問題を回避してSMNH01(伯太)の基盤地震動を推定した結果, 賀祥ダム(監査廊)の観測記録より小さい地震動レベルになるとしている。
- ◆ 更に今回, SMNH01(伯太)を対象に, 地中地震計の共振の影響がない最近の地震観測記録を用いて地盤モデルの同定を行い, 山添ほか(2004)と同様に特性曲線法を用いて基盤地震動を推定したところ, 山添ほか(2004)の結果と概ね同程度となった。
- 以上より, SMNH01(伯太)については, 追加検討の結果, 賀祥ダム(監査廊)の観測記録で代表できると考えられる。

賀祥ダム

- 賀祥ダム(監査廊)の観測記録については, 非線形化していない岩盤上の記録と考えられる。



以上より, 賀祥ダム(監査廊)の観測記録を, 震源を特定せず策定する地震動として考慮する。

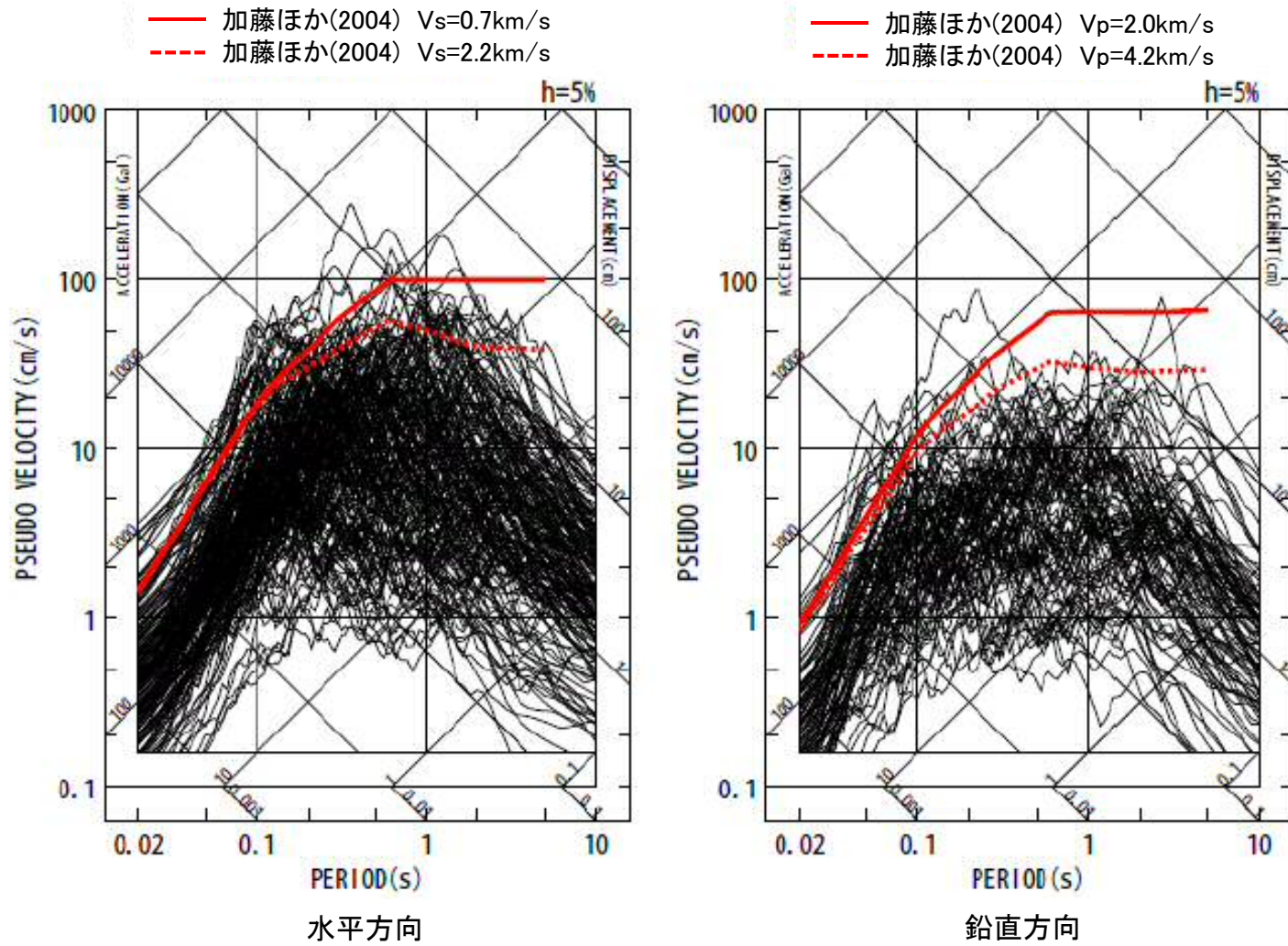
2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

観測記録の収集・整理

- 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」において、震源を特定せず策定する地震動の収集対象とされている16地震のうち、Mw6.5未満の14地震を対象として、震源近傍における観測記録を収集する。
 - 収集対象としては、防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-net観測点の観測記録のうち、以下の条件に適合するものとする。
 - ・ 断層最短距離(断層面が把握できていない地震は震源距離)が30km以内の観測点
 - ・ AVS30(Kanno et al.(2006))が500m/s以上の観測点(地盤条件が不明な観測点は全て収集対象に含める)
- 上記条件の震源近傍における観測記録を収集すると、観測記録は137記録となる。

観測記録の収集・整理

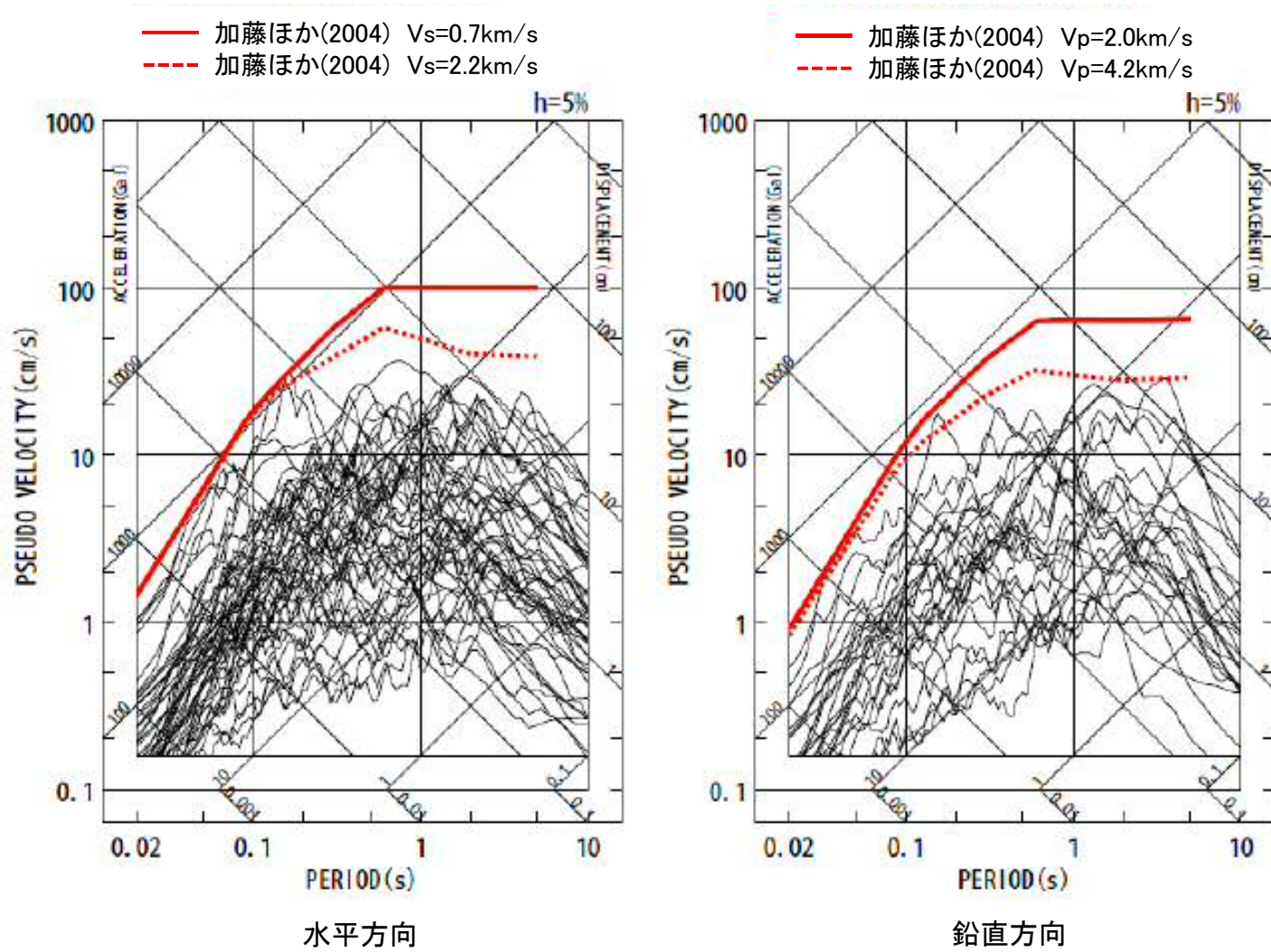
- 14地震の観測記録(地表)の応答スペクトルを重ね書き, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルと比較する。



14地震の観測記録(地表)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトル

観測記録の収集・整理

- 14地震の観測記録(地中)の応答スペクトルを重ね書き, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルと比較する。

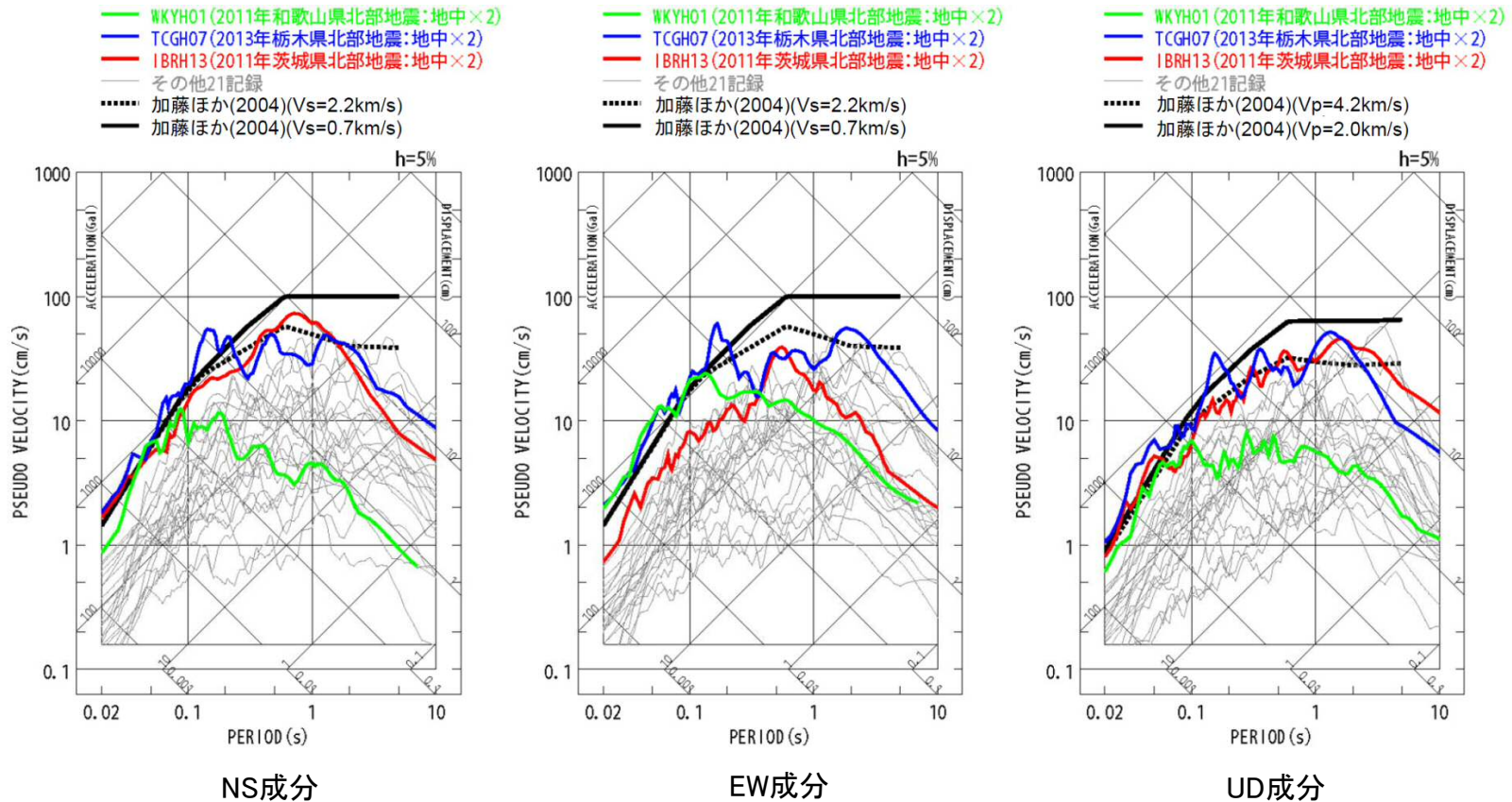


14地震の観測記録(地中)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトル

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

KiK-net観測点における基盤地震動

- 収集した観測記録のうち、敷地に与える影響が大きいと考えられる観測記録を用いて基盤地震動を検討する。
- KiK-net観測点の地中記録の2倍が基盤地震動に相当すると仮定し、加藤ほか(2004)の応答スペクトルと比較すると、2011年和歌山県北部地震・WKYH01(広川), 2013年栃木県北部地震・TCGH07(栗山西), 2011年茨城県北部地震・IBRH13(高萩)の観測記録が、加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回る。



14地震の観測記録(地中×2)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトル

検討対象地震の選定

- KiK-net観測点で基盤地震動が加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回ると想定される3記録(下表の①～③), 及びK-NET観測点の観測記録で特に影響が大きいと考えられる2記録(下表の④, ⑤)を観測した5地震を検討対象地震として選定し, 以降で詳細に検討する。

Mw6.5未満の検討対象地震

No	地震名(日時)	観測点	規模
①	2013年栃木県北部地震 (2013/02/25, 16:23)	TCGH07(栗山西)	Mw5.8
②	2011年茨城県北部地震 (2011/03/19, 18:56)	IBRH13(高萩)	Mw5.8
③	2011年和歌山県北部地震 (2011/07/05, 19:18)	WKYH01(広川)	Mw5.0
④	2004年北海道留萌支庁南部地震 (2004/12/14, 14:56)	HKD020(港町)	Mw5.7
⑤	2011年長野県北部地震 (2011/03/12, 03:59)	NIG023(津南)	Mw6.2

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2004年北海道留萌支庁南部地震(概要)

■ 概要(発生日時, 地震規模等)

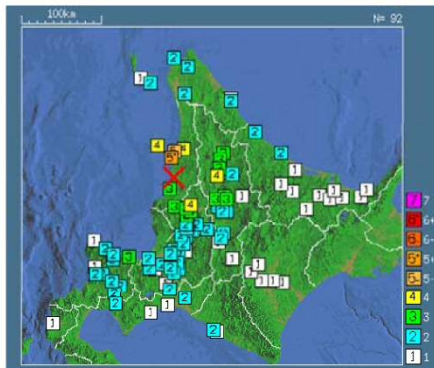
1. 地震発生日時 (気象庁他)
 - ・発生日時: 平成16年12月14日 14時56分頃
 - ・地震規模: Mj6.1 (Mw5.7)
 - ・震源深さ: 約9km
 - ・震源位置: 北緯44.077°、東経141.7°
2. 各地の震度及び被害状況

各地の震度(気象庁)は以下のとおり。

 - ・震度5強: 苫前町
 - ・震度5弱: 羽幌町
 - ・震度4: 初山別村、剣淵町、秩父別町
 - ・地震による津波の発生はなし

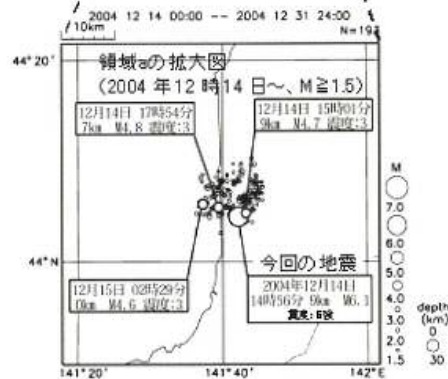
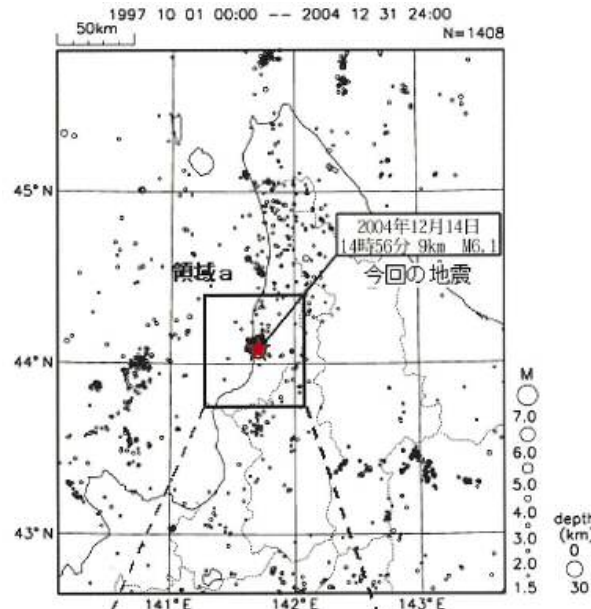
被害状況(消防庁)は以下のとおり。

 - ・住宅全壊・半壊: 0棟
 - ・住宅一部損壊: 165棟
(内訳: 小平町 121棟, 苫前町 17棟, 羽幌町 27棟)
 - ・負傷者8名(家具の下敷き, 転倒による打撲等)
 - ・コンビナート関係等異常なし
3. 地震発生メカニズム(気象庁)
 - ・発震機構解より、東南東-西北西方向に圧力軸を持つ逆断層型の地震。
 - ・本震位置より60km南方で1995年に発生したM5.9の地震の発震機構解は東西圧縮の逆断層型であり、この地域の東西圧縮の応力場と調和的である。
 - ・北海道内陸西部では、やや規模の大きな地震は、歪み集中帯で発生するようである。



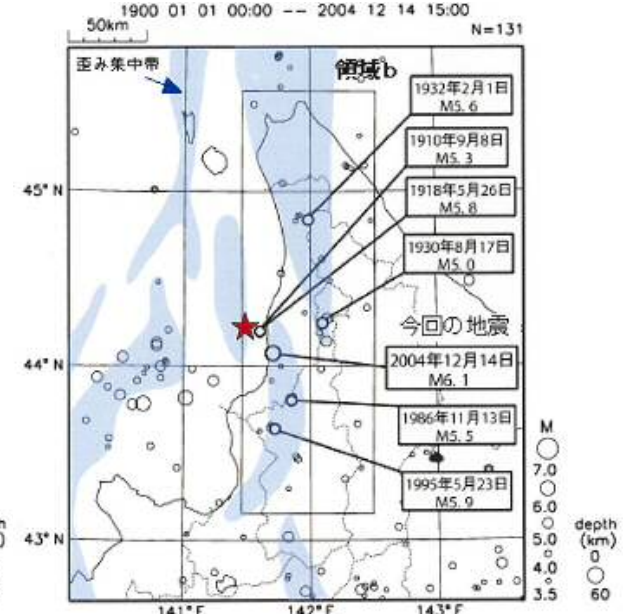
気象庁 震度データベースによる震度分布

震央分布図(1997年10月~, M≥1.5)

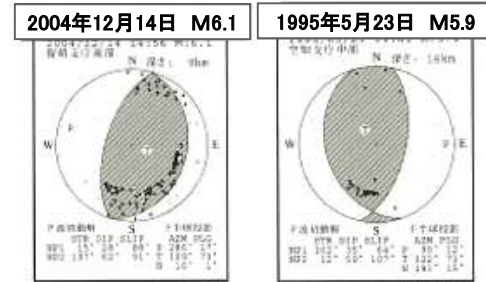


2004年北海道留萌支庁南部地震及び
周辺で発生した主な地震

震央分布図(1900年~, M≥3.5)



※ 震央分布図に表記した歪み集中帯のデータは、「日本海東縁の活断層と地震テクトニクス」(東京大学出版会,2002)を使用した。



地震調査研究推進本部 地震調査委員会

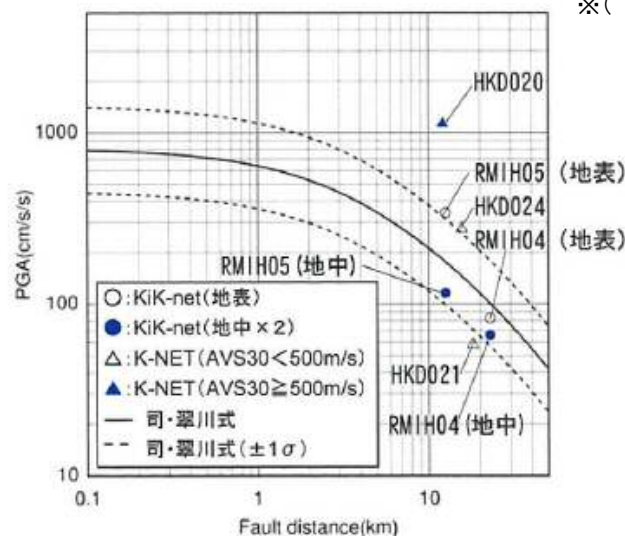
2004年北海道留萌支庁南部地震(観測記録)

- 震源距離が30km以内の観測記録としては下表の5記録となる。
- このうち、震源近傍に位置するHKD020(港町)においては、最大加速度 1127.2cm/s^2 が観測されており、司・翠川(1999)の距離減衰式の $+1\sigma$ を上回る。

断層最短距離が30km以内の観測記録

観測点			震源距離 (km)	AVS30 (m/s)	最大加速度 (Gal) ※		
					水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)
K-NET (地表)	HKD020	港町	12.1	562.7	535.7	1127.2	368.4
	HKD024	達布	15.6	337.2	184.9	274.0	73.5
	HKD021	留萌	18.1	302.0	57.5	44.6	20.0
KiK-net (地表・地中)	RMIH05	小平西	12.5	218.1	340.4 (57.8)	236.1 (36.8)	66.2 (27.4)
	RMIH04	小平東	22.8	543.3	83.0 (23.8)	81.8 (32.7)	36.5 (25.9)

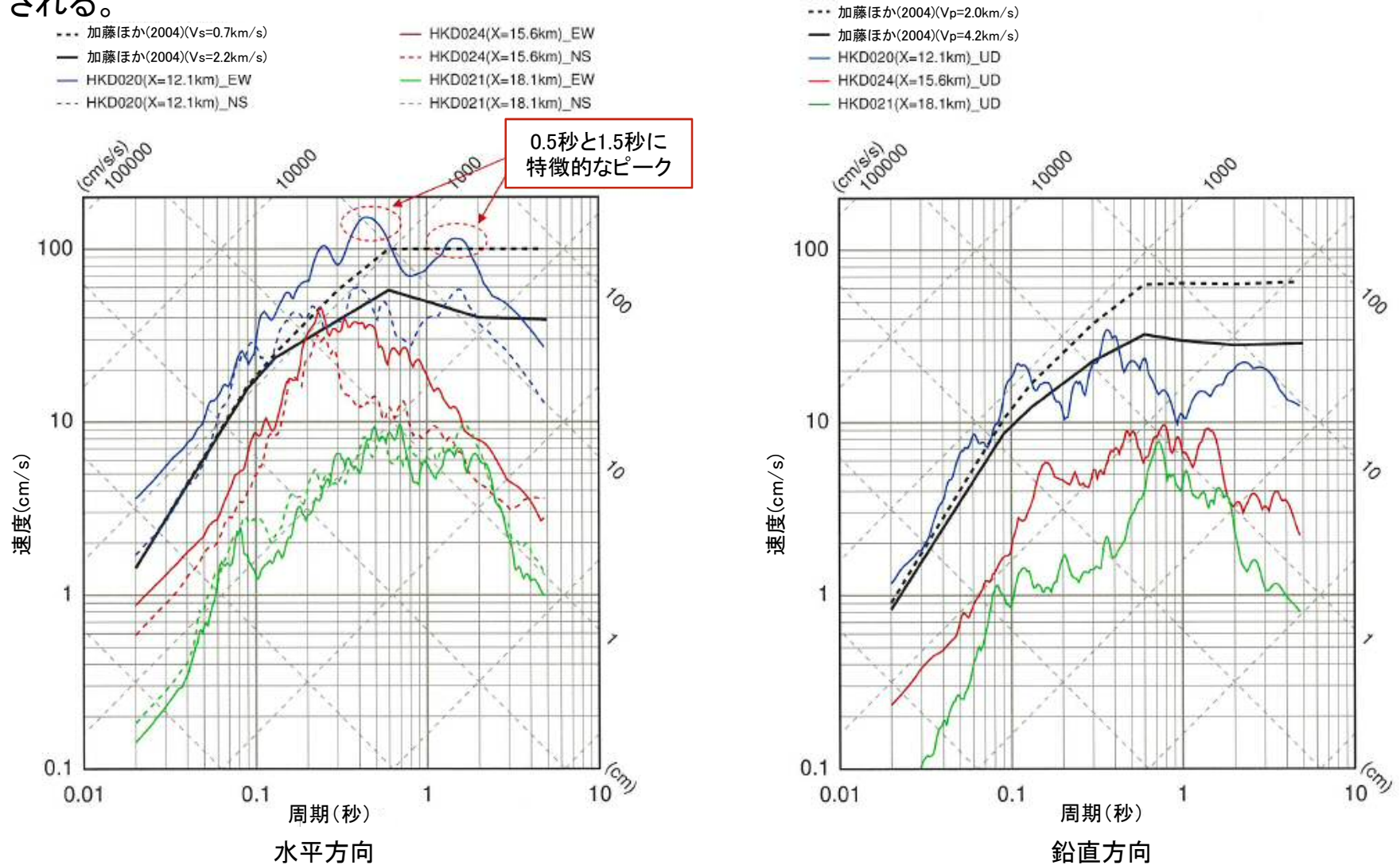
※()の数値は地中記録を示す



司・翠川(1999)の距離減衰式との関係

2004年北海道留萌支庁南部地震(観測記録)

■ K-NET観測点の観測記録のうち, HKD020(港町)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを大きく上回る。また, HKD024(達布)の観測記録は, HKD020(港町)のEW成分の観測記録に包絡される。

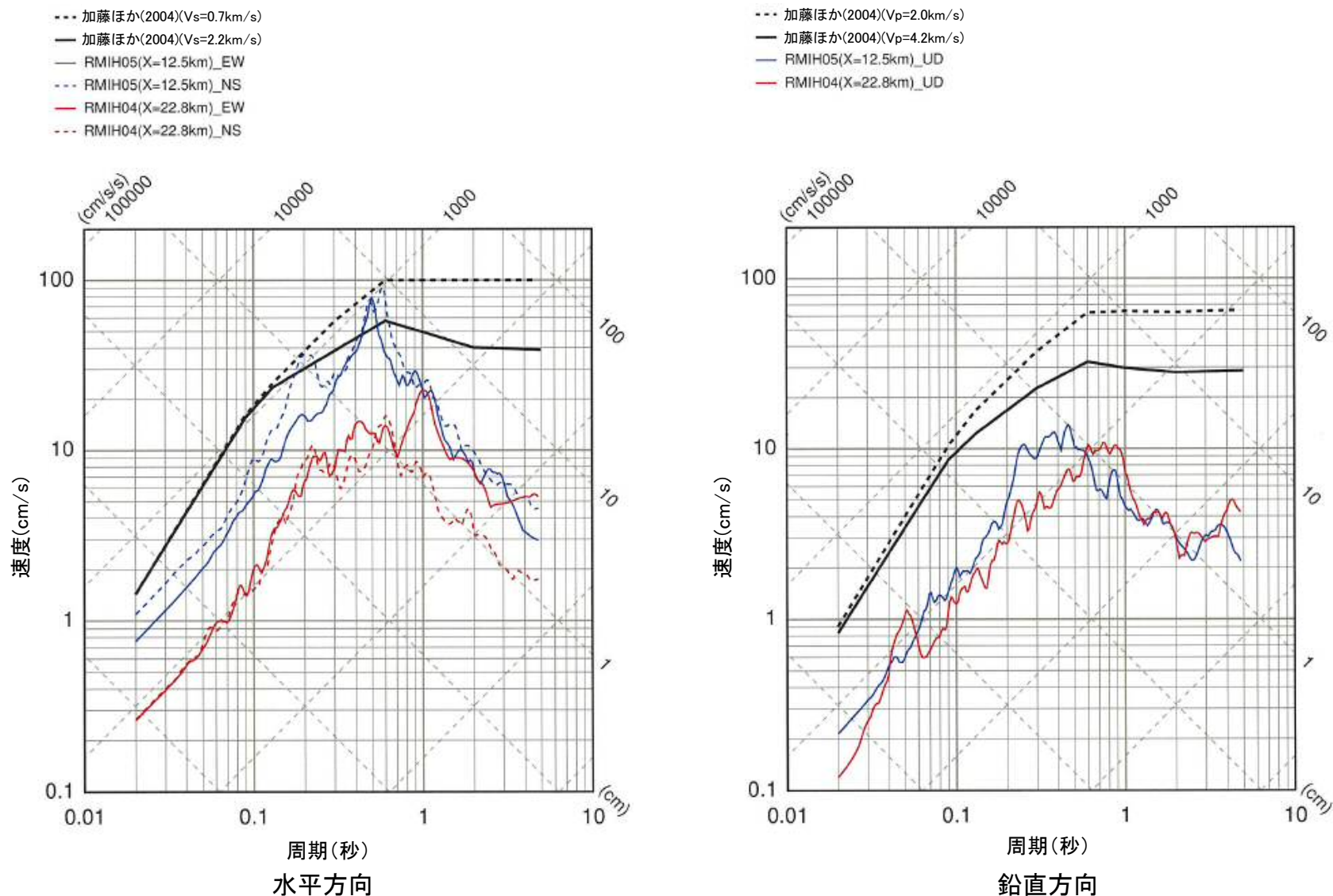


K-NET各観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2004年北海道留萌支庁南部地震(観測記録)

■ KiK-net観測点の地表観測記録は、すべて加藤ほか(2004)の応答スペクトルに包絡される。



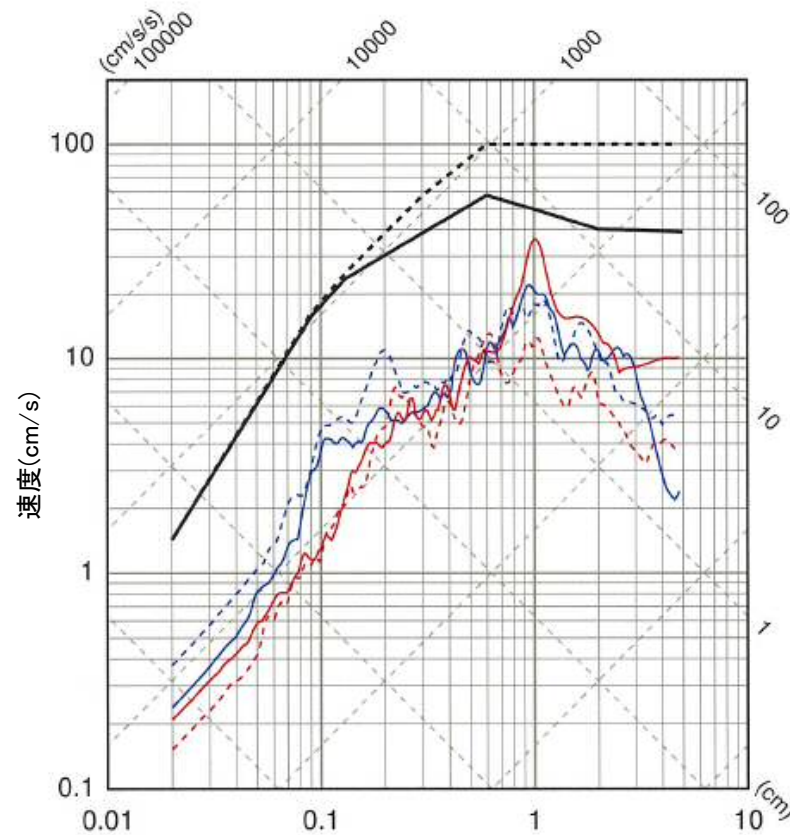
KiK-net各観測記録(地表)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(観測記録)

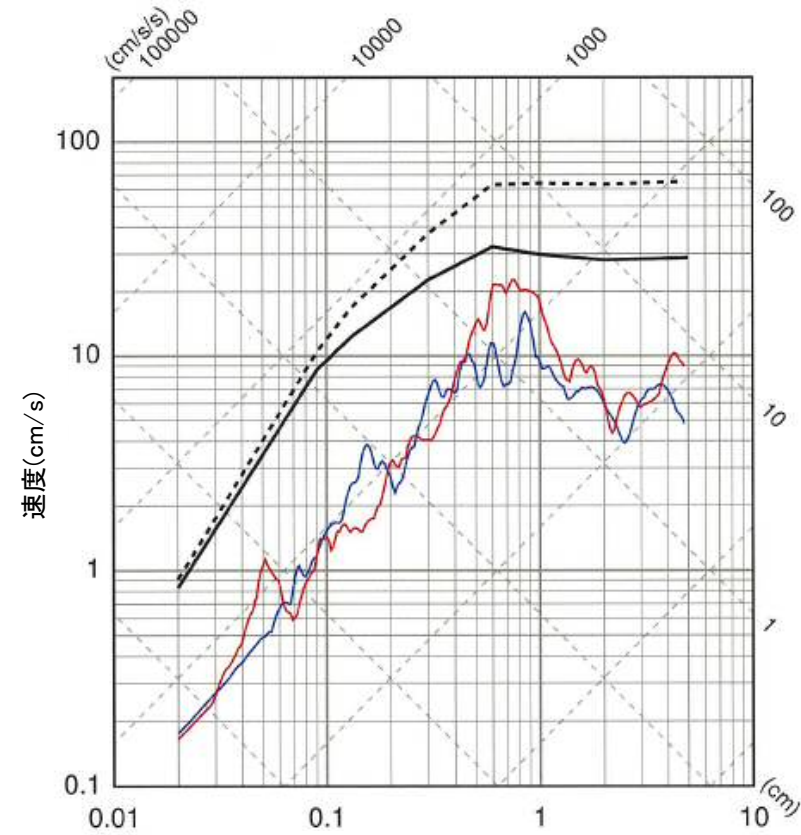
■ KiK-net観測点の地中観測記録(地中×2)は、すべて加藤ほか(2004)の応答スペクトルに包絡される。

- 加藤ほか(2004)(Vs=0.7km/s)
- 加藤ほか(2004)(Vs=2.2km/s)
- RMIH05(X=12.5km)_EW
- RMIH05(X=12.5km)_NS
- RMIH04(X=22.8km)_EW
- RMIH04(X=22.8km)_NS

- 加藤ほか(2004)(Vp=2.0km/s)
- 加藤ほか(2004)(Vp=4.2km/s)
- RMIH05(X=12.5km)_UD
- RMIH04(X=22.8km)_UD



周期(秒)
水平方向



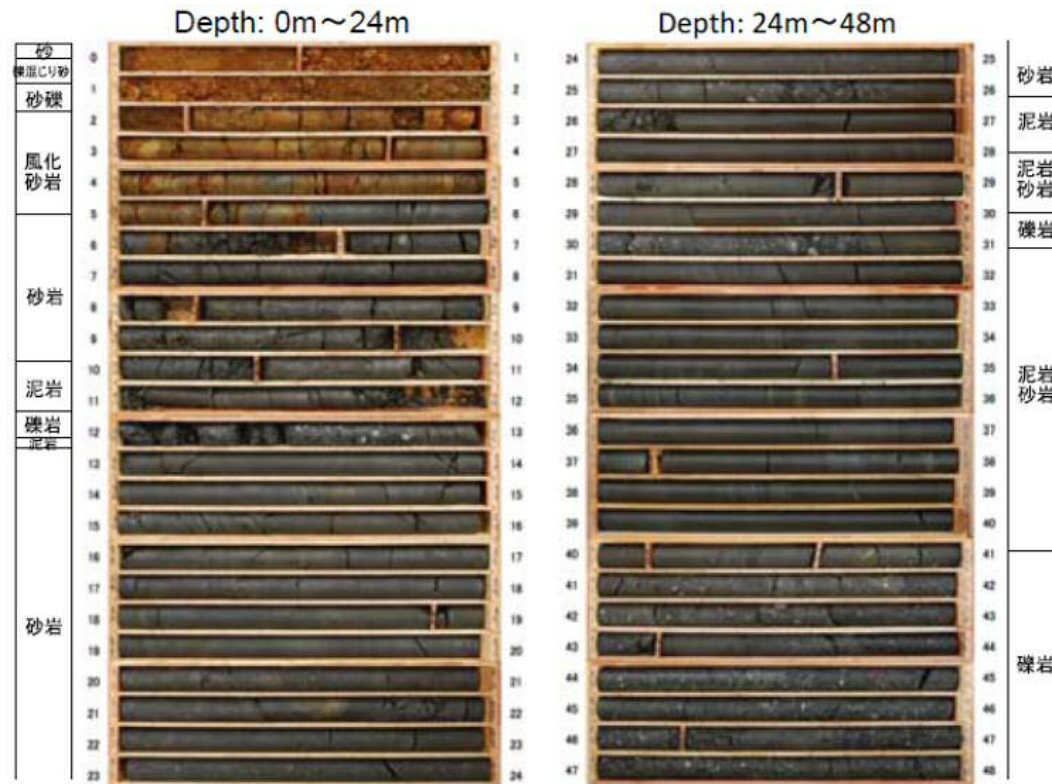
周期(秒)
鉛直方向

KiK-net各観測記録(地中×2)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(佐藤ほか(2013))

■ 佐藤ほか(2013): GL-6mまで非線形性考慮

- HKD020(港町)の地質構造・速度構造の把握を目的として、地震計設置地点の北西約5mの同一標高位置で、深さ300m(GL-300m)までのボーリング掘削をオールコア採取で実施している。
- GL-13m付近までの岩盤は亀裂が多く、岩盤が脆いことを示唆している。また、それ以深の岩盤層については、泥岩・砂岩の互層が主体で、そのうちGL-30m付近、さらにGL-41m以深に礫岩層が存在する構成となっている。

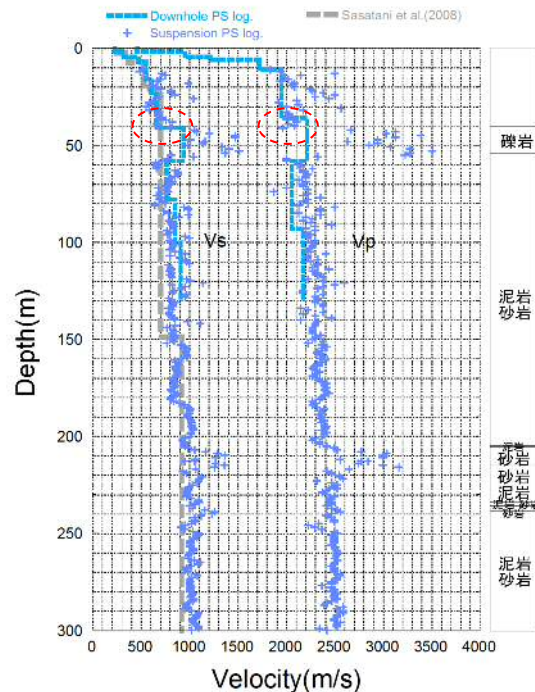


HKD020(港町)におけるボーリングコア写真
(左:深さ0m~24m, 右:深さ24m~48m)

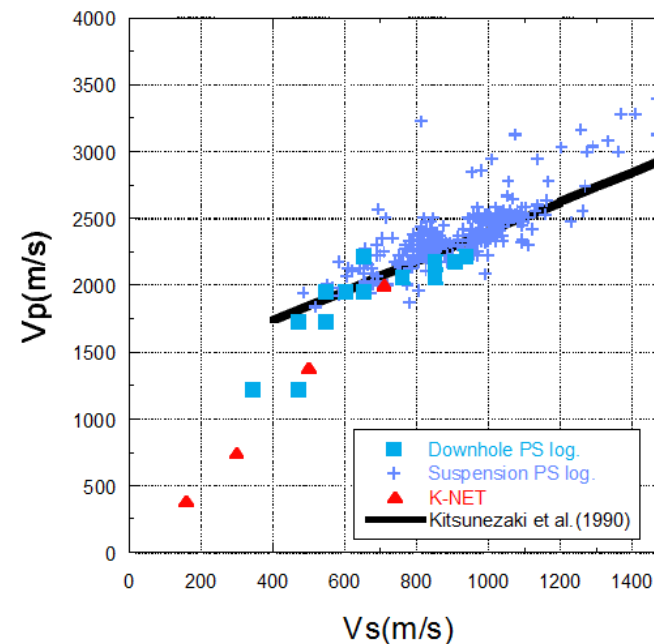
2004年北海道留萌支庁南部地震(佐藤ほか(2013))

■ 佐藤ほか(2013): GL-6mまで非線形性考慮

- ボーリング孔を用いて, GL-150mまではダウンホール法とサスペンション法, GL-300mまではサスペンション法によるPS検層を実施している。
- GL-50m付近までは, 笹谷ほか(2008)の微動アレイ探査に基づくS波速度構造と今回の調査によるS波速度構造は十分に対応していない。しかし, GL-58m以深の泥岩・砂岩互層が続く部分のS波速度構造については, 大局的にサスペンション法によるS波速度構造とほぼ対応している。
- PS検層によるS波速度構造から, 基盤層をVsが938m/sとなるGL-41mに設定している。また, その深さのVpが2215m/sであるため, Vpの観点からみても基盤層の深さは妥当としている。
- 狐崎ほか(1990)による既往の経験式より, Vsが700m/s以上では, Vpが2000m/sを超えている。



HKD020(港町)におけるPS検層結果と既往の研究によるS波速度構造モデル

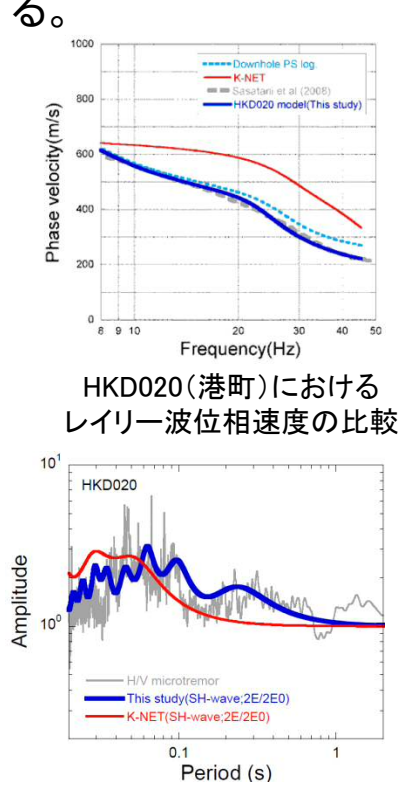


HKD020(港町)のPS検層結果によるVp-Vs関係と既往の経験式の比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(佐藤ほか(2013))

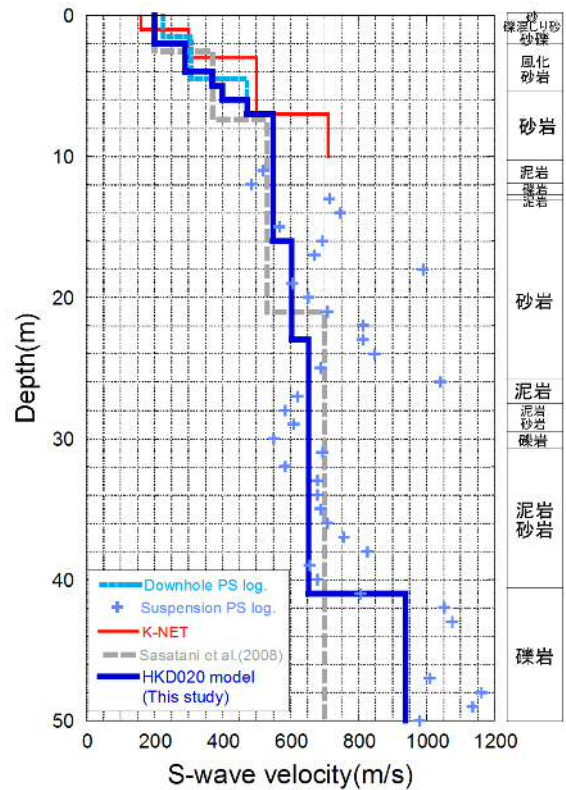
■ 佐藤ほか(2013): GL-6mまで非線形性考慮

- ダウンホール法によるPS検層結果のVsが500m/s以下のGL-6mまでのS波速度を, 笹谷ほか(2008)による位相速度を説明できるように若干修正し, HKD020(港町)の地盤モデルを作成している。
- HKD020(港町)の地盤モデルによるSH波の理論増幅特性の卓越周期は, 微動H/Vスペクトルの卓越周期と周期0.02秒程度のごく短周期までよく対応している。K-NET地盤情報によるSH波の理論増幅特性は, 微動H/Vスペクトルの卓越を説明できない。
- 以上から, 本研究によるHKD020(港町)の地盤モデルは, より妥当なモデルであると結論付けている。



HKD020(港町)におけるレイリー波位相速度の比較

HKD020(港町)における微動H/Vスペクトルと地盤モデルに基づくSH波の理論増幅特性の比較



HKD020(港町)における地盤速度構造(S波速度構造)の比較

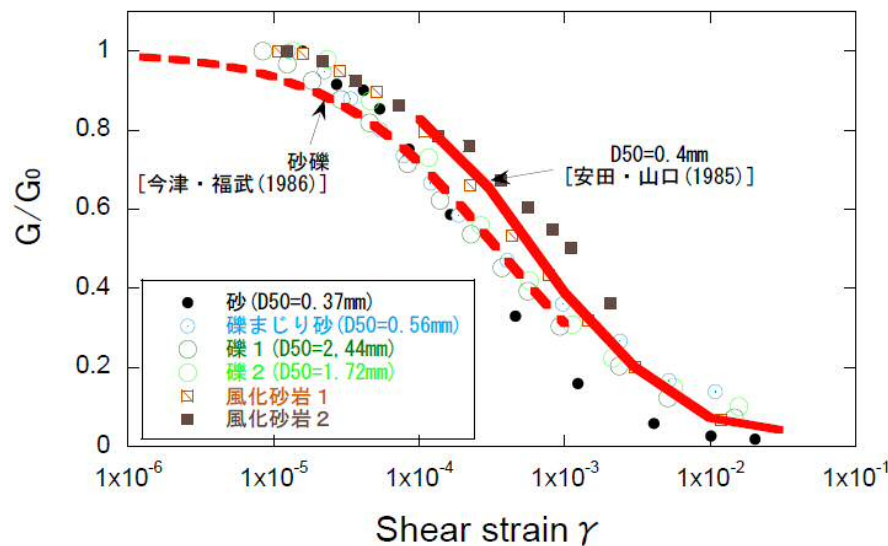
HKD020(港町)における地震動評価モデル

上面深度(m)	P波速度 Vp(m/s)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10 ³ kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0	457	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5		200	2.00	0.5	0.03	礫混じり砂
1	952	200	2.00	1.0	0.02	礫1
1.5		290	2.00	1.0	0.01	礫2
2			2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
3			2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
4	400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2	
5		473	2.00	1.0	0.01	—
6			2.00	9.0	0.01	—
7	1722	549	2.00	7.0	0.01	—
16		604	2.06	18.0	0.01	—
23		653	2.06	—	0.01	—
38	2215	938	2.13	—	0.01	—
41		—	—	—	—	—

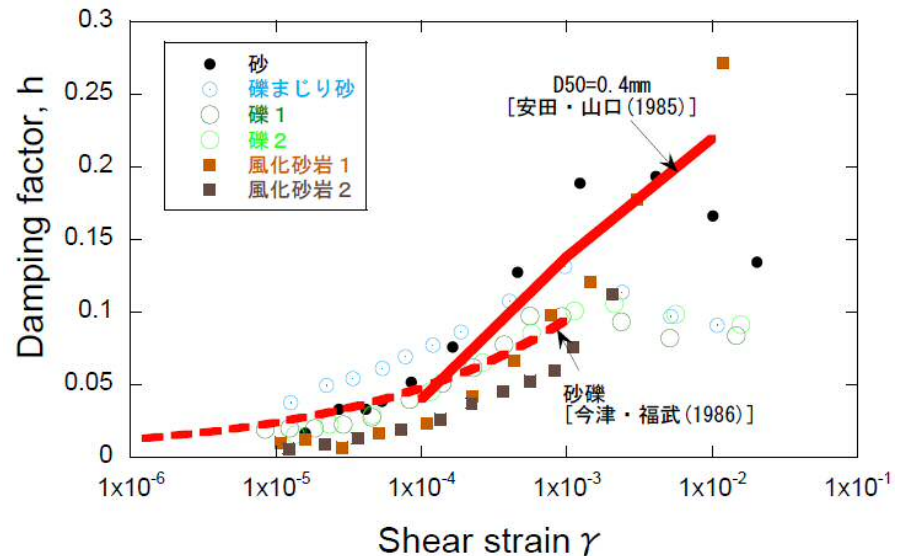
2004年北海道留萌支庁南部地震(佐藤ほか(2013))

■ 佐藤ほか(2013): GL-6mまで非線形性考慮

- GL-6mまでの土質地盤の6点について, GPサンプリングにより試料採取し, 0.2Hzの正弦波による繰り返し三軸試験によって地盤の剛性G及び減衰hのひずみ γ 依存性を取得している。
- ひずみレベルが 10^{-4} オーダーで G/G_0 が0.6程度, すなわち初期の剛性から4割程度低下している。
- 既往の経験的な G/G_0 のひずみ依存性に関する既往の経験式との対応が良い。
- 室内試験を実施した砂, 礫混じり砂, 礫, 風化砂岩に対応するGL-6m程度までの地盤は, 強震時に非線形性を生じやすい特性であるとしている。



HKD020(港町)における表層地盤の G/G_0 のひずみ依存性と既往の経験式の比較

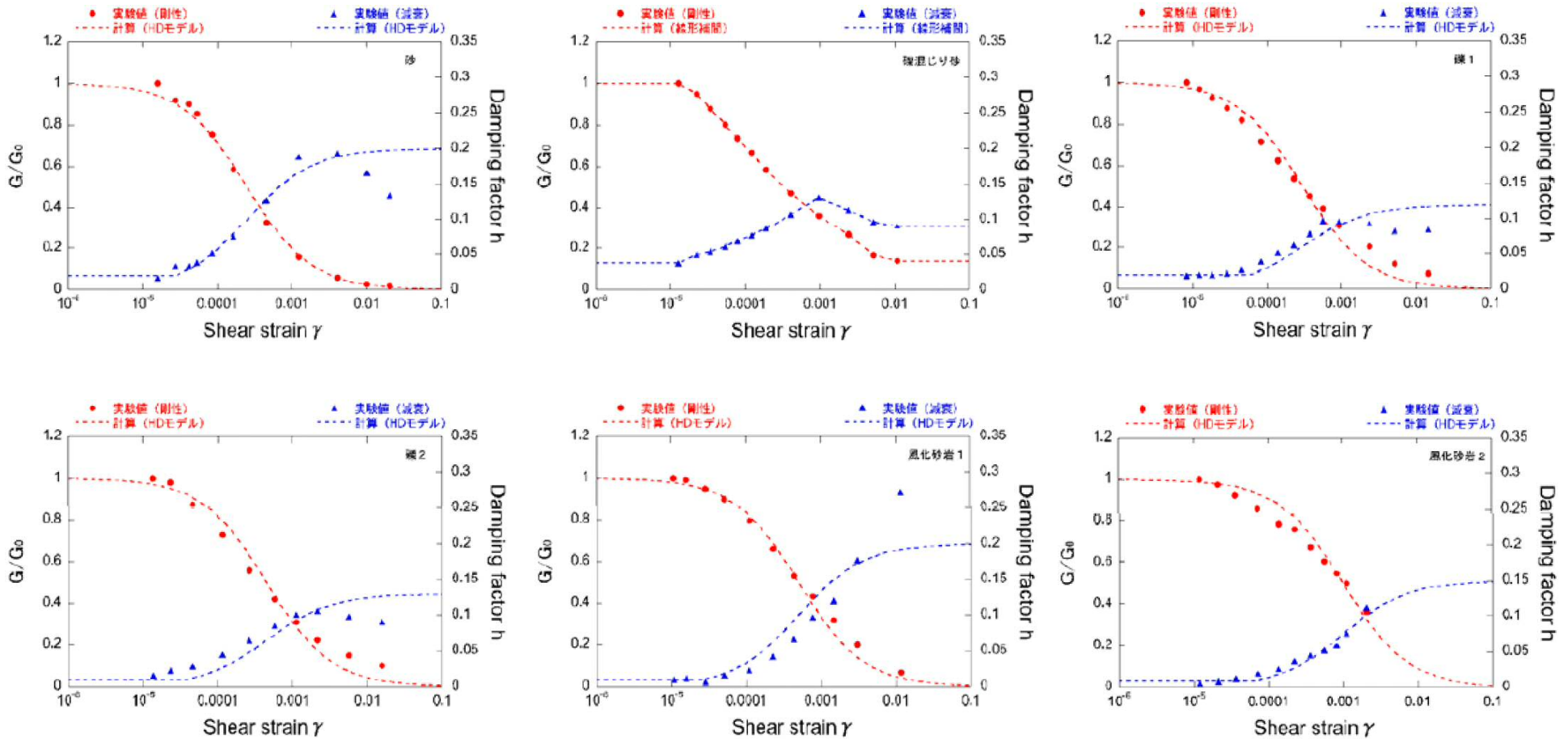


HKD020(港町)における表層地盤の減衰定数hのひずみ依存性と既往の経験式の比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(佐藤ほか(2013))

■ 佐藤ほか(2013): GL-6mまで非線形性考慮

GL-6mまでの層については, 室内試験結果を用いてHDモデルにより非線形特性($G/G_0 - \gamma$, $h - \gamma$)を設定している。

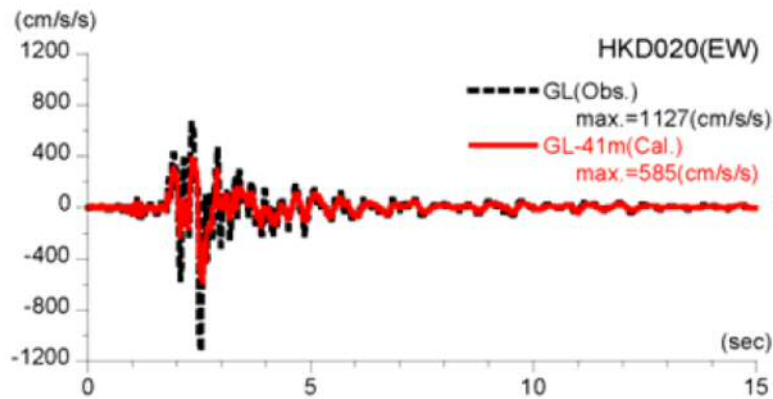


等価線形解析において設定した地盤の非線形特性

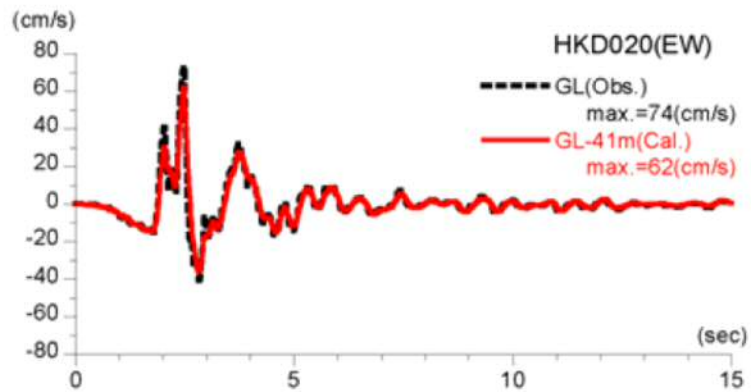
2004年北海道留萌支庁南部地震(佐藤ほか(2013))

■ 佐藤ほか(2013): GL-6mまで非線形性考慮

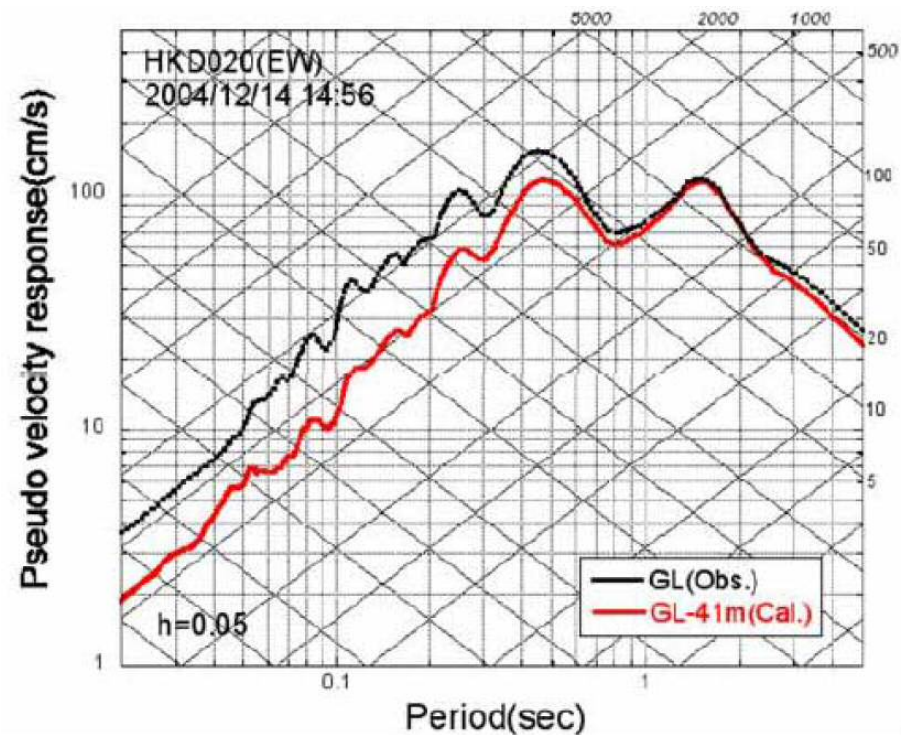
- 等価線形解析により, 地表観測記録(EW成分)からGL-41mの基盤地震動を評価している。
- はぎとり結果の最大加速度は 585cm/s^2 で, 地表観測記録の約1/2となっている。



推計された基盤地震動と地表観測記録の比較



速度に変換した基盤地震動と地表観測記録の比較

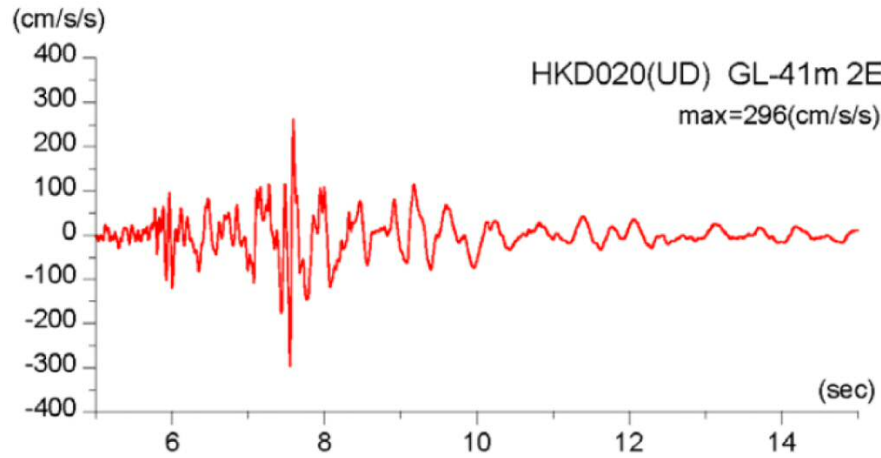


擬似速度応答スペクトルの比較

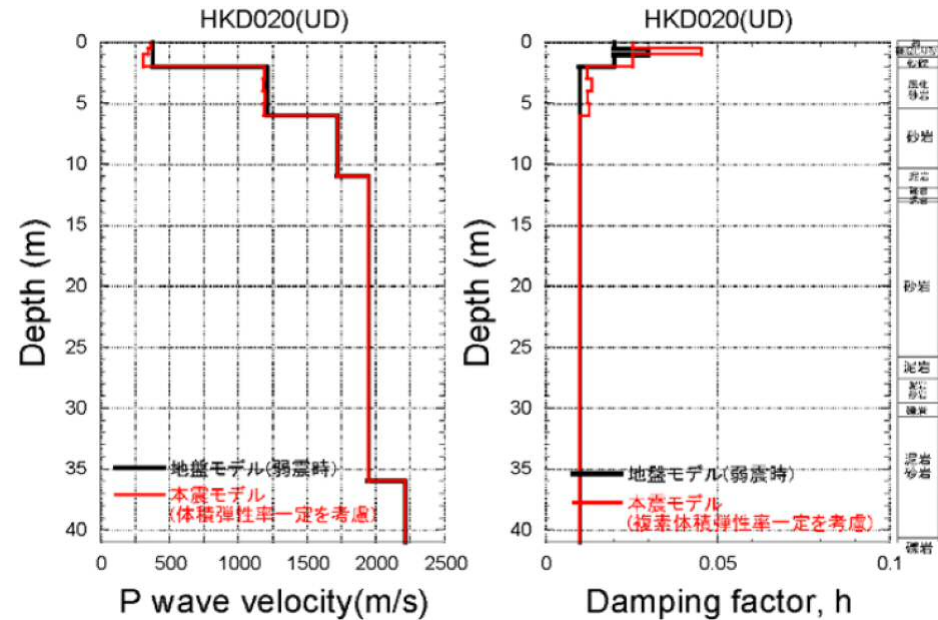
2004年北海道留萌支庁南部地震(佐藤ほか(2013))

■ 佐藤ほか(2013): GL-6mまで非線形性考慮

- 体積弾性率一定を仮定した1次元波動論による線形解析により、地表観測記録(UD成分)からGL-41mの基盤地震動を評価している。
- はざとり結果の最大加速度は 296cm/s^2 となっている。



鉛直方向の基盤地震動の推計結果



2004年留萌地震時のP波速度と減衰定数

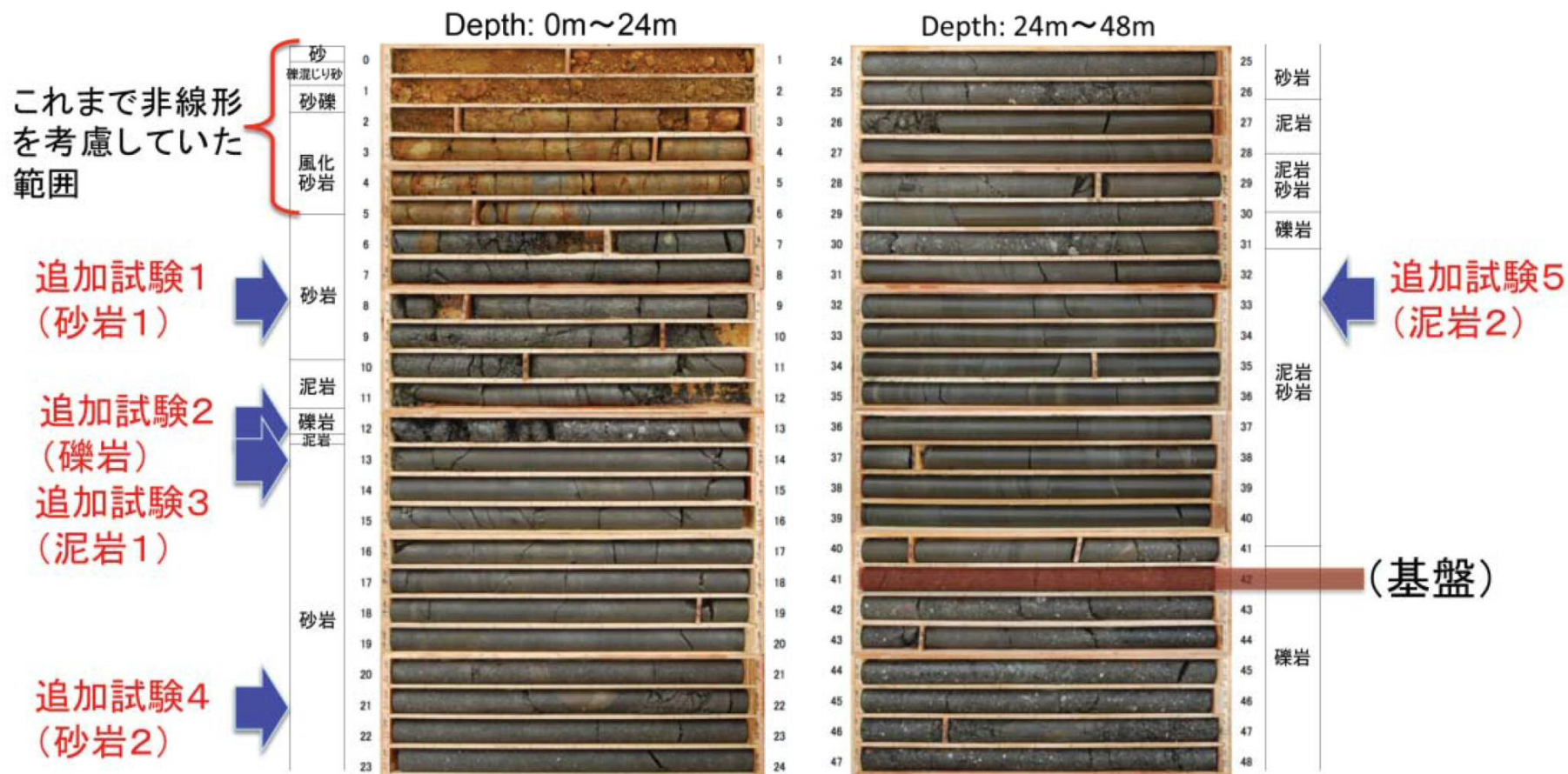
2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討)

- 佐藤ほか(2013)では, K-NET観測点のHKD020(港町)について, GL-6mまでの室内試験結果を考慮した非線形解析を行い, GL-41mの基盤面における基盤地震動を評価している(GL-6m以深は線形解析を仮定, 減衰定数は1%に設定)。
- 上記の基盤地震動の評価結果について妥当性を確認するため, 以下の追加検討を実施する。
 - ① 佐藤ほか(2013)の報告時点以降に, GL-6mからGL-41mまでの室内試験結果が得られたことから, その結果を用い, GL-41mまで非線形性を考慮して基盤地震動(水平方向)を評価。
 - ② 不確かさを考慮した基盤地震動の評価として, GL-6mまで非線形, GL-6m以深は減衰定数を3%として基盤地震動(水平方向)を評価。
 - ③ 佐藤ほか(2013)の報告時点以降に, PS検層の再測定結果が得られたことから, その結果を用い, 地盤モデルを変更して基盤地震動(鉛直方向)を評価(解析方法は佐藤ほか(2013)と同様)。
 - ④ HKD020(港町)における地下水位の状況を踏まえ, GL-6mまではポアソン比一定, GL-6m以深は体積弾性率一定として基盤地震動(鉛直方向)を評価。

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

GL-6mからGL-41mまでの5か所において、室内試験を追加実施した。

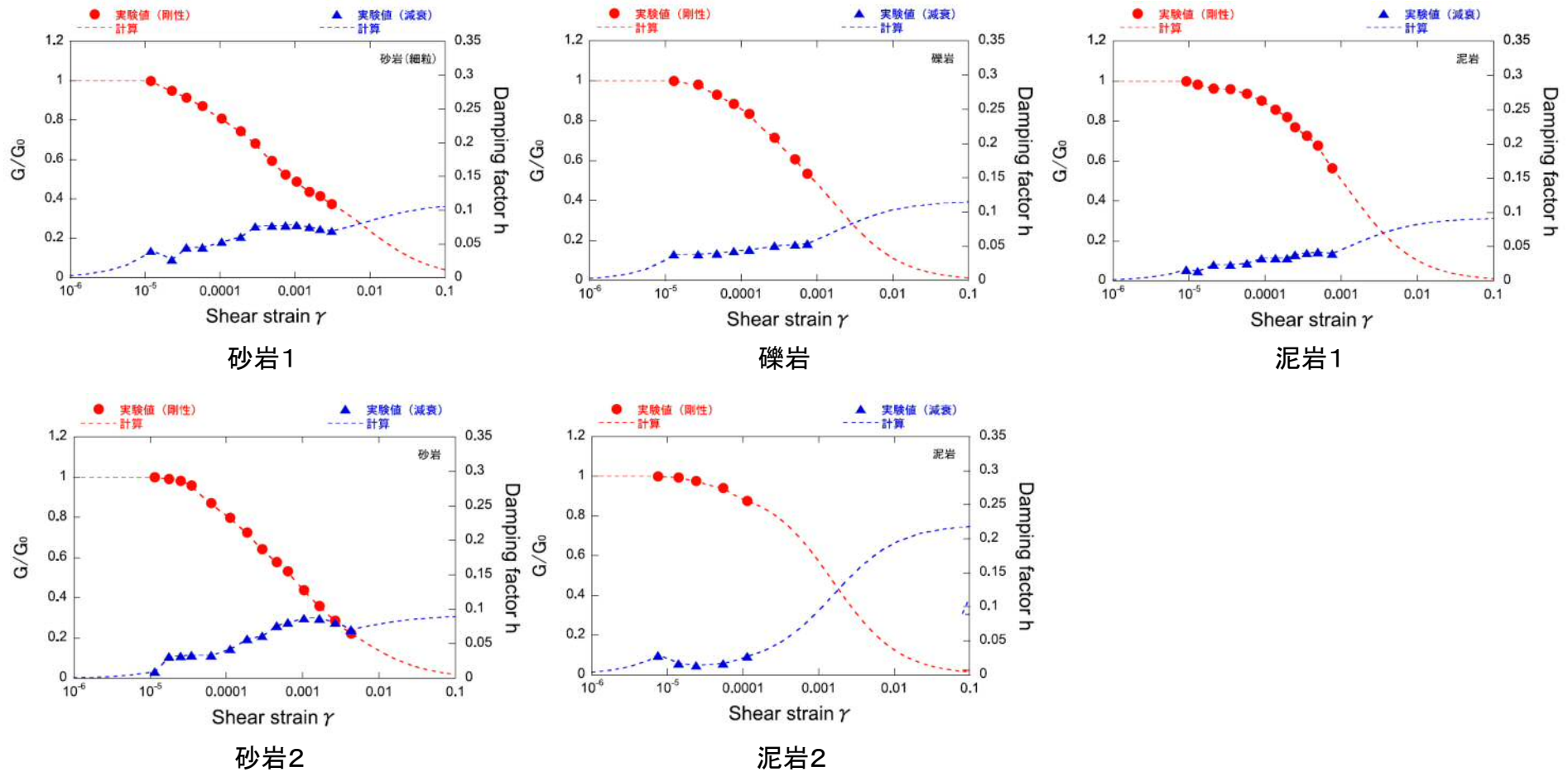


追加の室内試験の実施位置

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

追加の室内試験結果により非線形性を設定した。

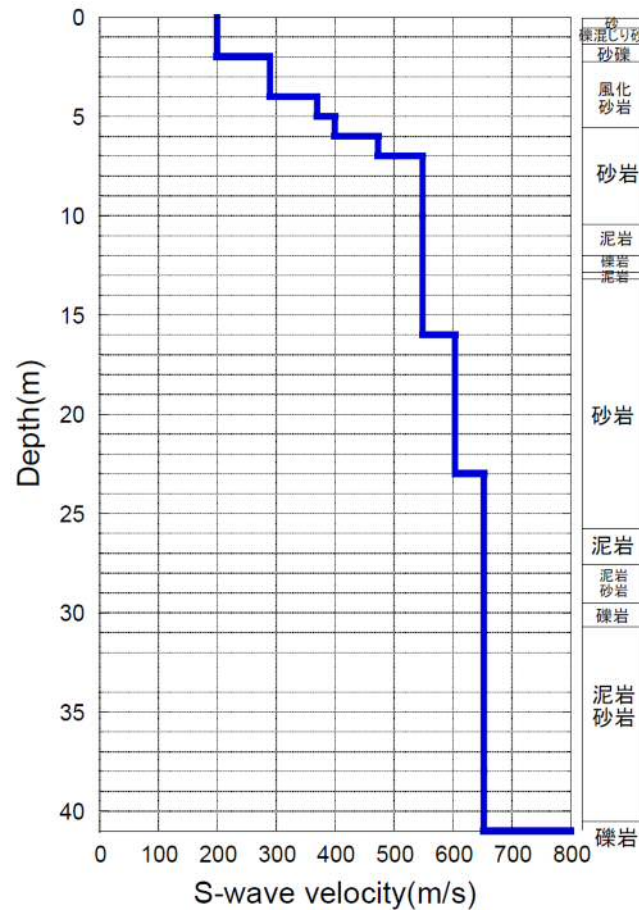


追加の室内試験による地盤の非線形特性

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

GL-6mからGL-41mの地盤の非線形特性と減衰定数を変動させて、等価線形解析により深さ41mでの基盤地震動を評価した。



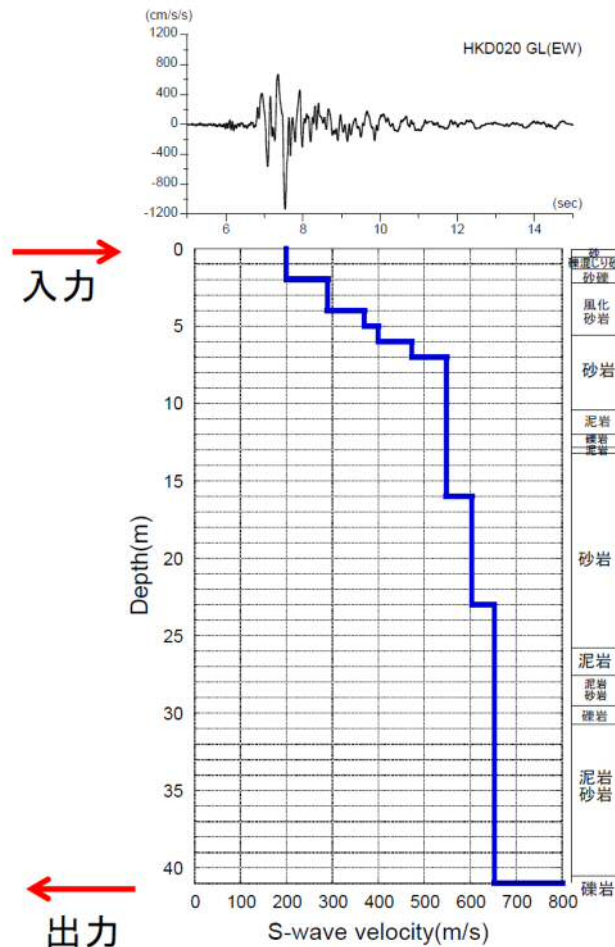
S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (1000kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数h (初期値)	非線形特性
200	1.9	0.5	0.02	砂
200	2.0	0.5	0.03	礫混じり砂
200	2.0	1	0.02	礫1
290	2.0	1	0.01	礫2
290	2.0	1	0.01	風化砂岩1
370	2.0	1	0.01	風化砂岩2
400	2.0	1	0.02	砂岩1
473	2.0	1	0.02	砂岩1
549	2.0	3	0.02	砂岩1
549	2.0	2	0.01	泥岩1
549	2.0	1	0.03	礫岩
549	2.0	0.5	0.01	泥岩1
549	2.0	2.5	0.01	砂岩2
604	2.06	7	0.01	砂岩2
653	2.06	18	0.015	泥岩2
938	2.13	17	0.01	—

等価線形解析に用いる地盤モデル

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

地表観測記録を入力として, GL-41mまで非線形性を考慮した等価線形解析から, GL-41m ($V_s=938\text{m/s}$)における基盤地震動を評価した。



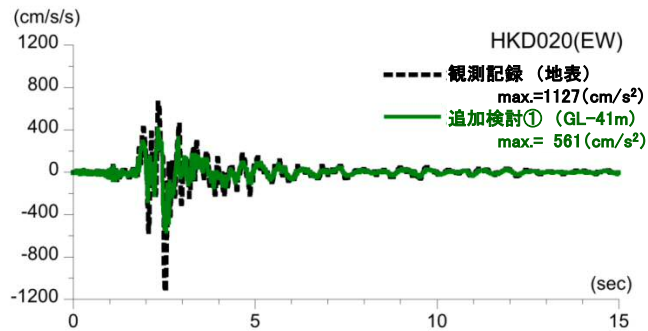
等価線形解析の条件

- ✓ 有効ひずみ $\gamma_{\text{eff}} = 0.65 \gamma_{\text{max}}$
- ✓ 収束判定値(前のモデルとの差異): 1%以内
- ✓ 最大繰り返し計算回数: 30回

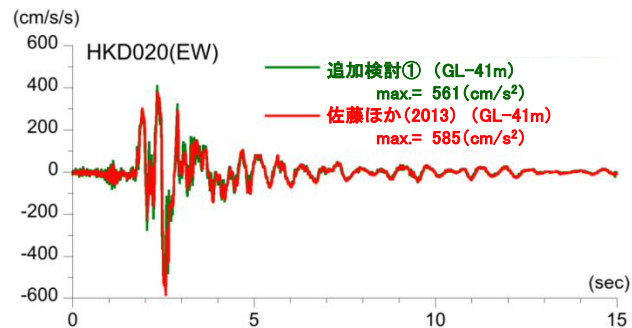
2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

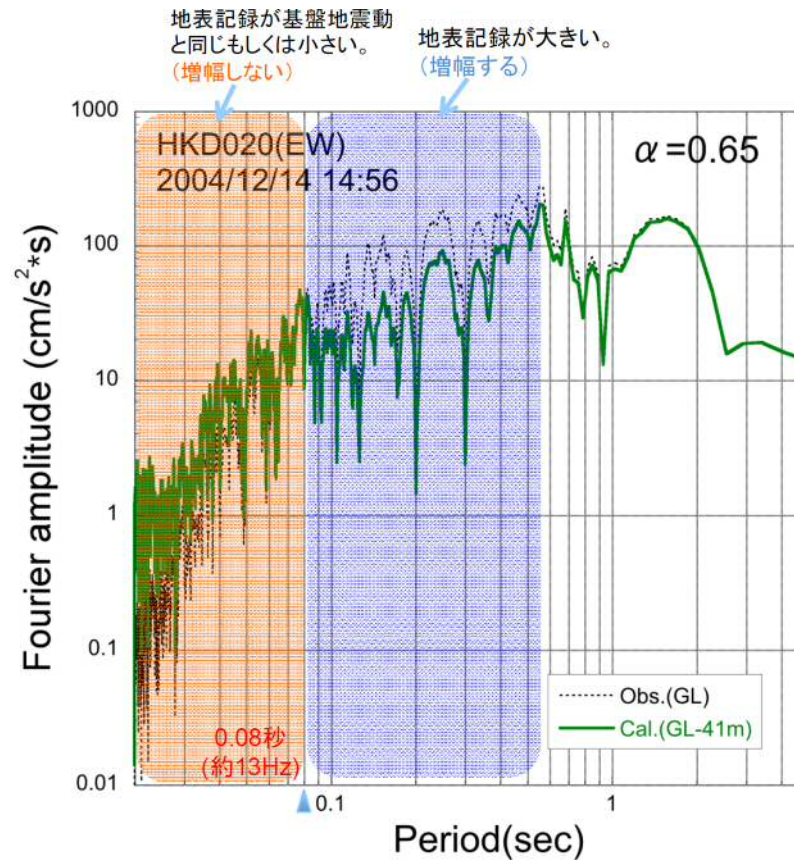
GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動の最大加速度は 561cm/s^2 となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較すると、やや小さく評価された。



地表観測記録と基盤地震動の比較



非線形性を考慮した検討と佐藤ほか(2013)の比較

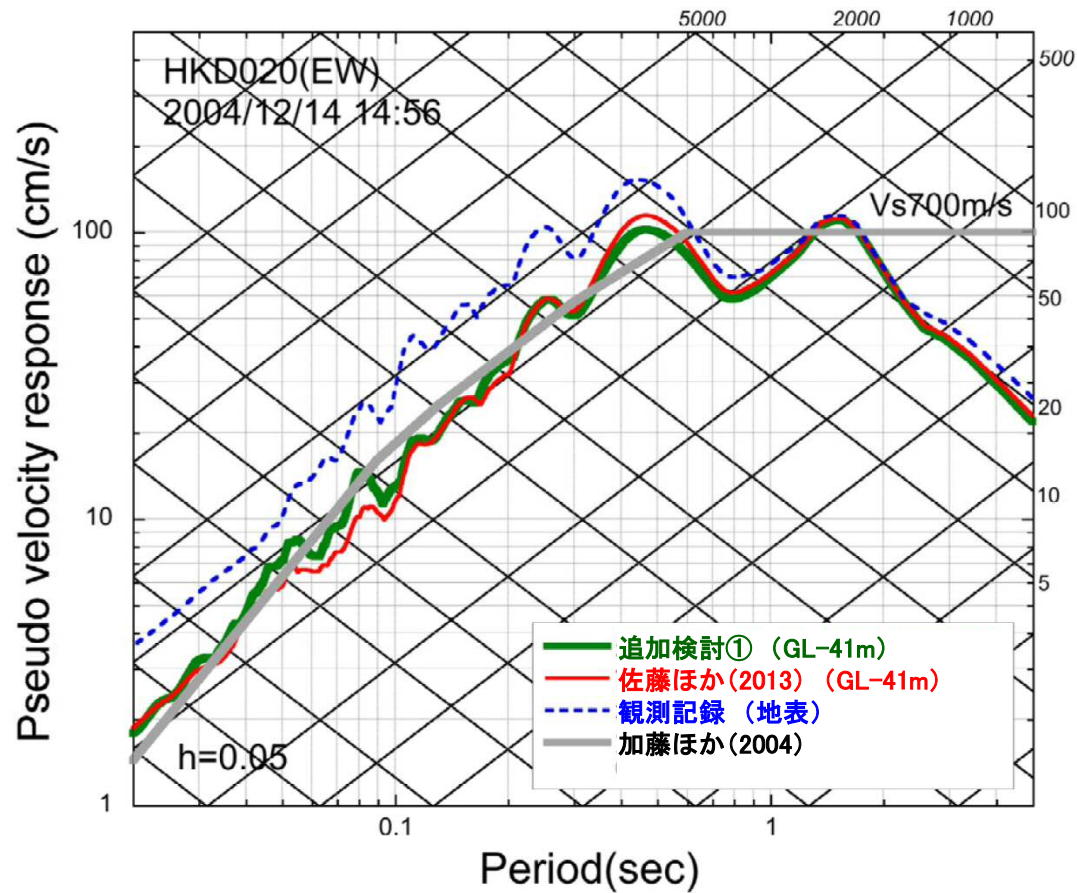


基盤地震動と地表観測記録の加速度フーリエスペクトルの比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動の応答スペクトルは、佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同程度となっている。

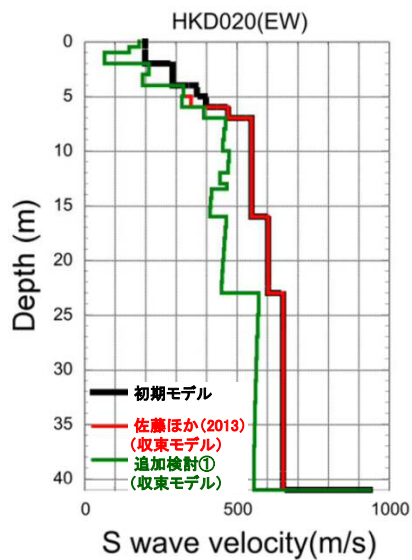


擬似速度応答スペクトルの比較

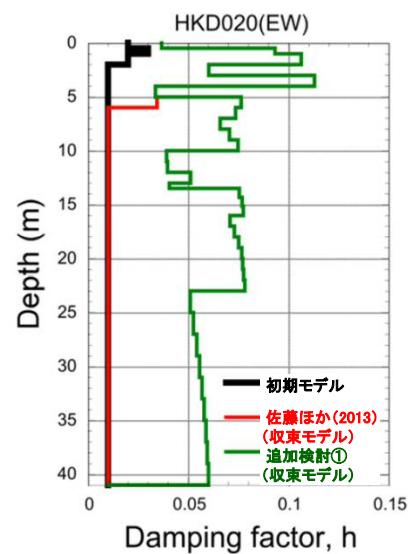
2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

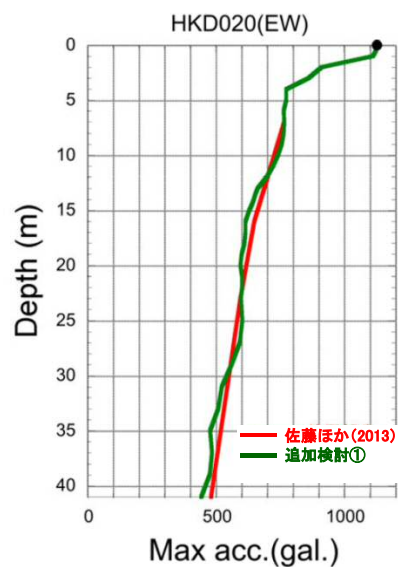
収束物性値の深さ分布によると, GL-6m以深における減衰定数の収束物性値は, 概ね5%程度となっている。



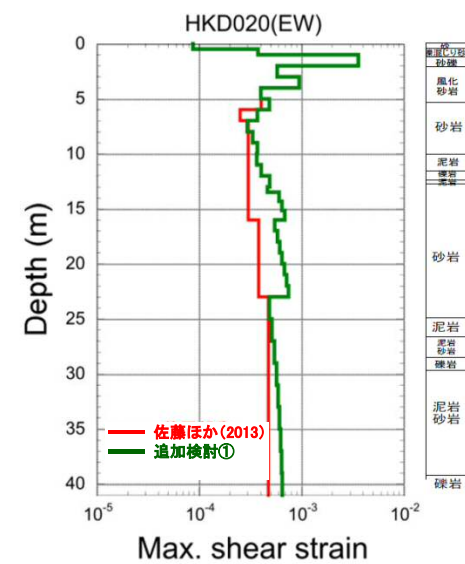
S波速度



減衰定数



最大加速度



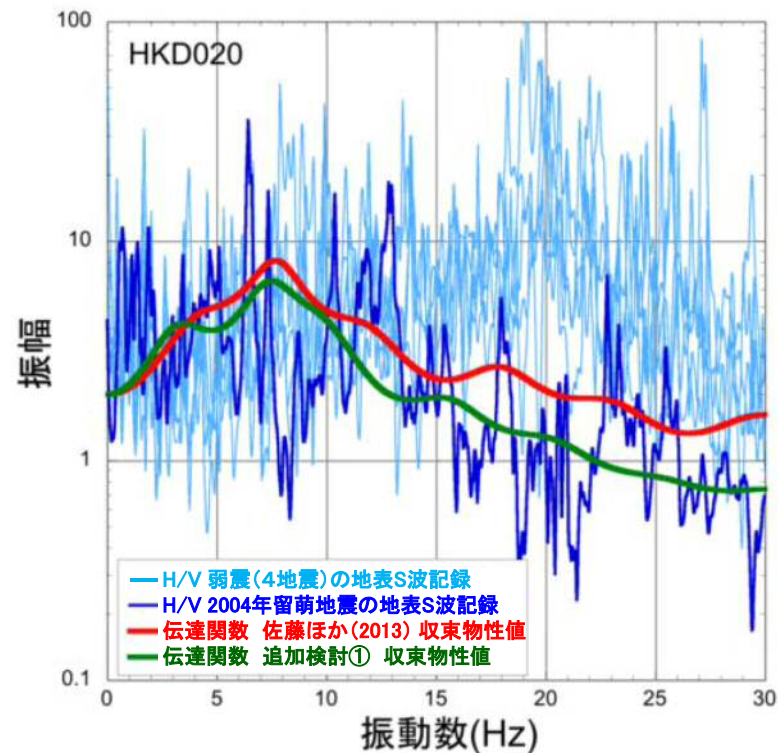
最大ひずみ

収束物性値, 最大加速度及び最大ひずみの深さ分布

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①: GL-41mまで非線形性考慮

GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価に用いた収束物性値による伝達関数は、佐藤ほか(2013)の物性値による伝達関数と比較して、深部の減衰定数が1%から5%程度になったことにより、10Hzより高振動数側で小さくなっている。



収束物性値による伝達関数とH/Vスペクトルの比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討①)

■ 追加検討①のまとめ

- 2004年北海道留萌支庁南部地震におけるHKD020(港町)の観測記録について、追加の室内試験結果を用い、GL-41mまで非線形性を考慮して基盤地震動を評価した。
- 基盤地震動の最大加速度は 561cm/s^2 となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較してやや小さく評価されている。また、基盤地震動の応答スペクトルは、佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同程度となっている。

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討②)

■ 追加検討②: 減衰定数の不確かさ考慮

佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき、GL-6mまで非線形、GL-6m以深を減衰定数3%として基盤地震動を評価し、佐藤ほか(2013)の評価結果と比較する。

等価線形解析に用いる地盤モデル

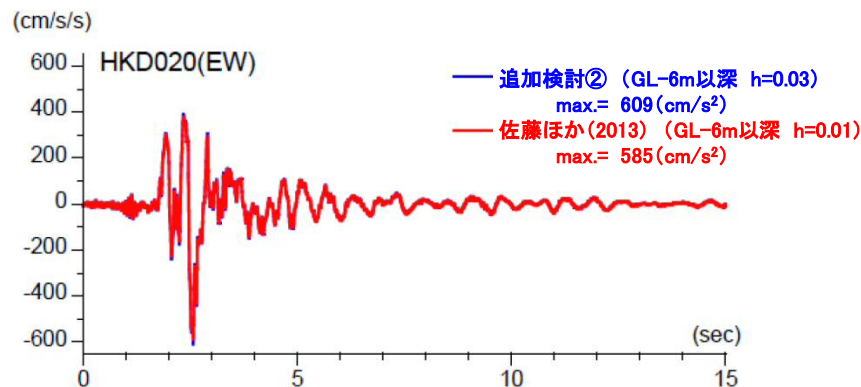
S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (1000kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数h (初期値)	非線形特性
200	1.9	0.5	0.02	砂
200	2.0	0.5	0.03	礫混じり砂
200	2.0	1	0.02	礫1
290	2.0	1	0.01	礫2
290	2.0	1	0.01	風化砂岩1
370	2.0	1	0.01	風化砂岩2
400	2.0	1	0.01	風化砂岩2
473	2.0	1	0.03	—
549	2.0	3	0.03	—
549	2.0	2	0.03	—
549	2.0	1	0.03	—
549	2.0	0.5	0.03	—
549	2.0	2.5	0.03	—
604	2.06	7	0.03	—
653	2.06	18	0.03	—
938	2.13	17	0.03	—

減衰定数3%として評価する。

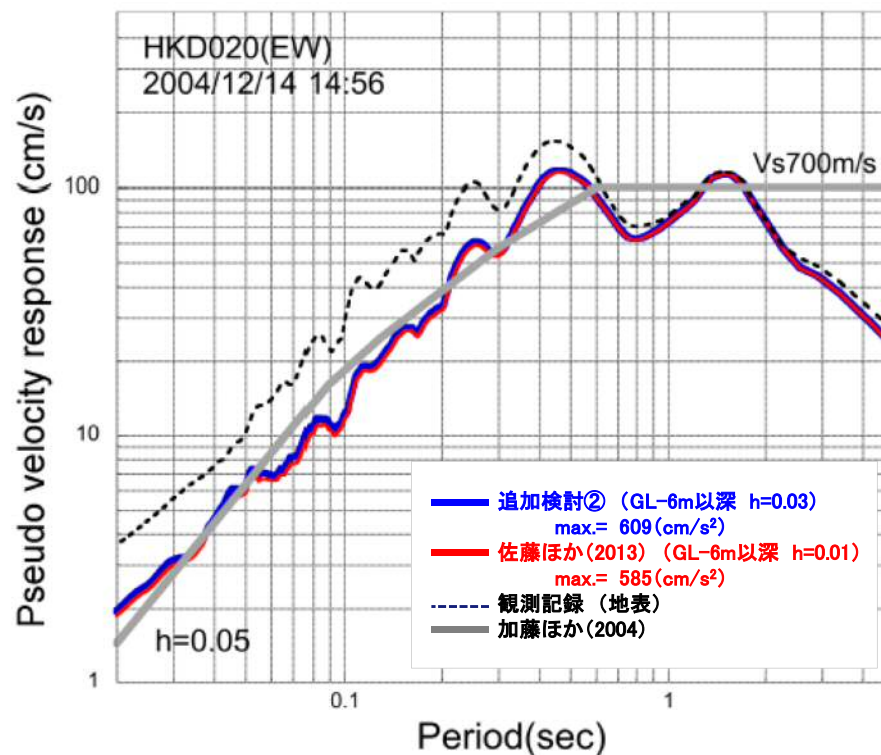
2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討②)

■ 追加検討②: 減衰定数の不確かさ考慮

佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき、GL-6m以深を減衰定数3%とした基盤地震動の最大加速度は609cm/s²となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s²)と比較すると、やや大きく評価されている。また、その応答スペクトルは、佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同程度となっている。



加速度時刻歴波形の比較

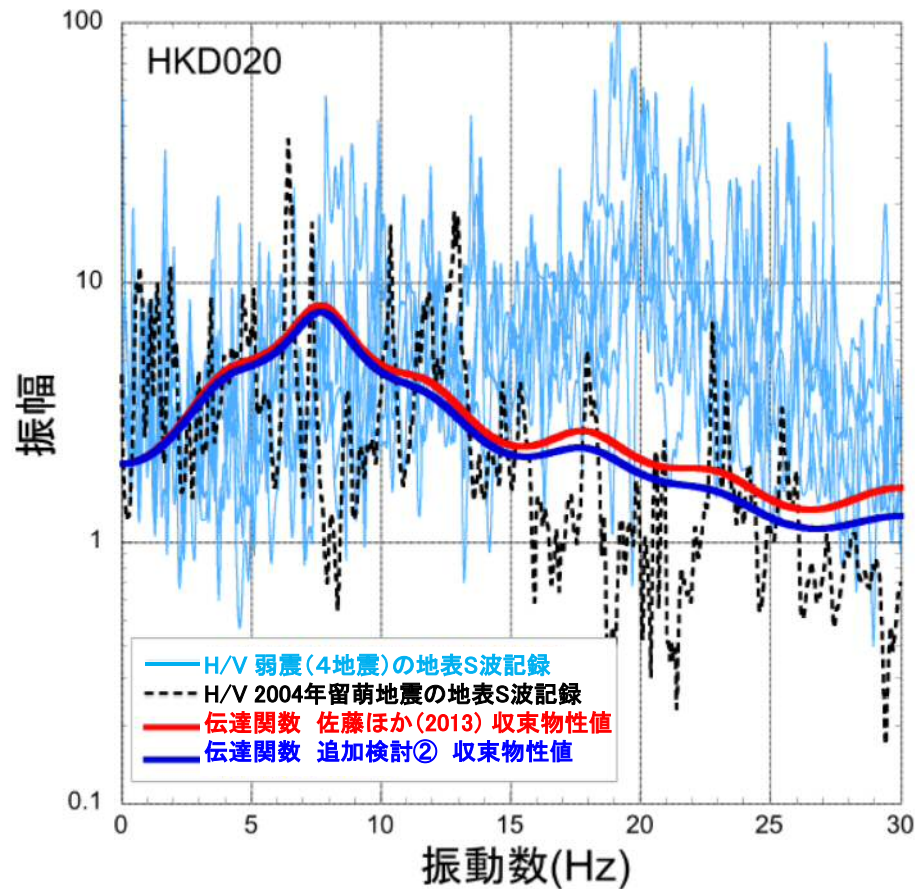


擬似速度応答スペクトルの比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討②)

■ 追加検討②: 減衰定数の不確かさ考慮

収束物性値による伝達関数は、佐藤ほか(2013)の物性値による伝達関数と同様に、本震時のH/Vスペクトルの特徴をよく再現していると考えられる。



収束物性値による伝達関数とH/Vスペクトルの比較

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討②)

■ 追加検討②のまとめ

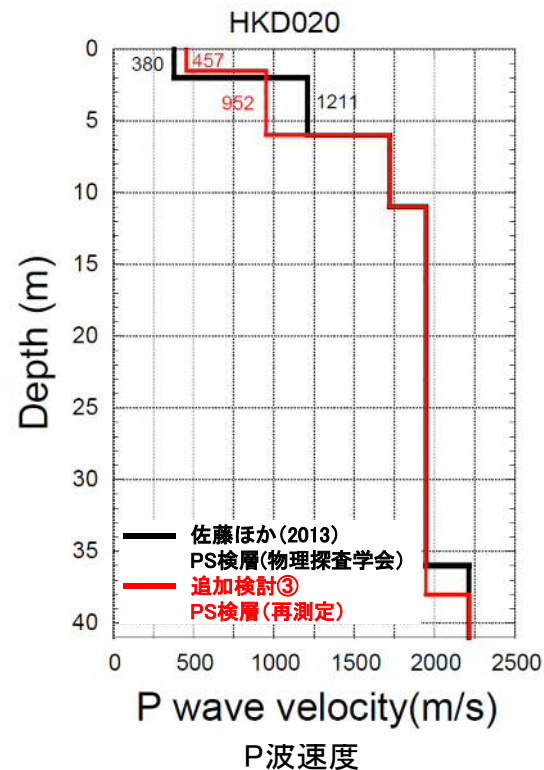
- 2004年北海道留萌支庁南部地震におけるHKD020(港町)の観測記録について、佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき、GL-6mまで非線形、GL-6m以深を減衰定数3%として基盤地震動を評価した。
- 基盤地震動の最大加速度は 609cm/s^2 となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較してやや大きく評価されている。また、基盤地震動の応答スペクトルは、佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同程度となっている。
- 収束物性値による伝達関数は、佐藤ほか(2013)の物性値による伝達関数と同様に、本震時のH/Vスペクトルの特徴をよく再現する結果となっている。

2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討③)

■ 追加検討③: 地盤モデル変更による基盤地震動(鉛直方向)評価

- 佐藤ほか(2013)における鉛直方向の基盤地震動の評価結果は、物理探査学会(2013.10)時点での地盤モデルに基づいていたが、笹谷ほか(2008)による位相速度を説明できないことから、佐藤ほか(2013)の報告時点以降に、表層部分のPS検層を再測定した。
- 再測定結果によるGL-6mまでのP波速度は、佐藤ほか(2013)の地盤モデルと異なるため、再測定結果を反映した地盤モデルにより、鉛直方向の基盤地震動を再評価した。

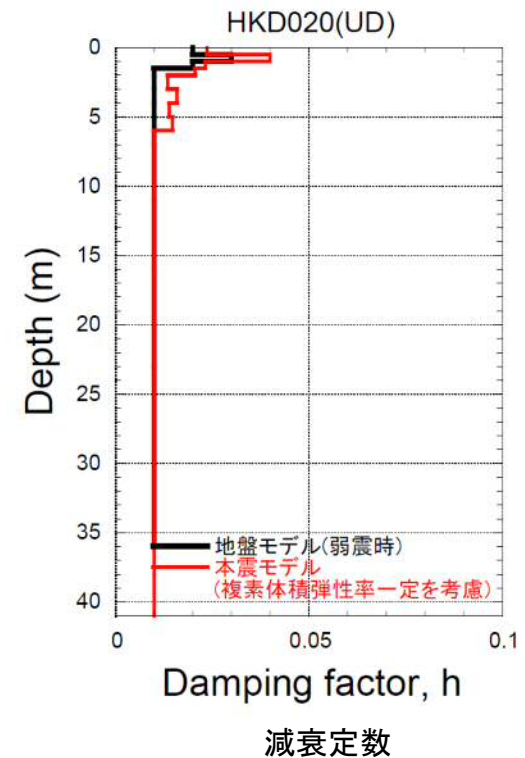
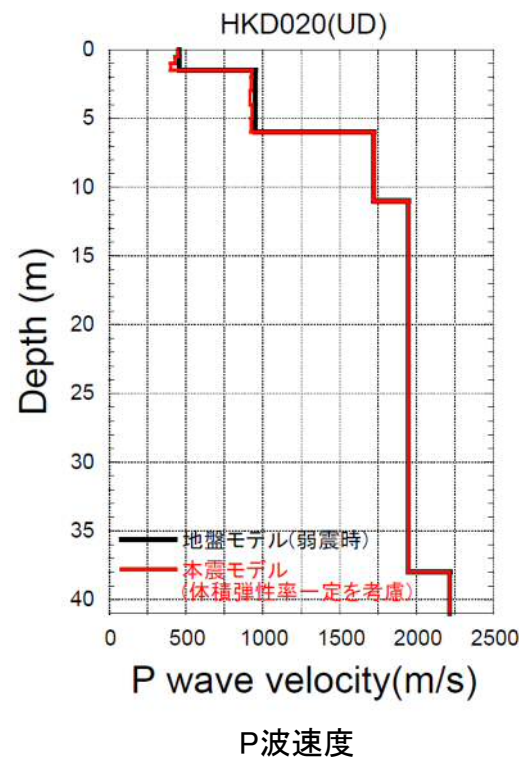
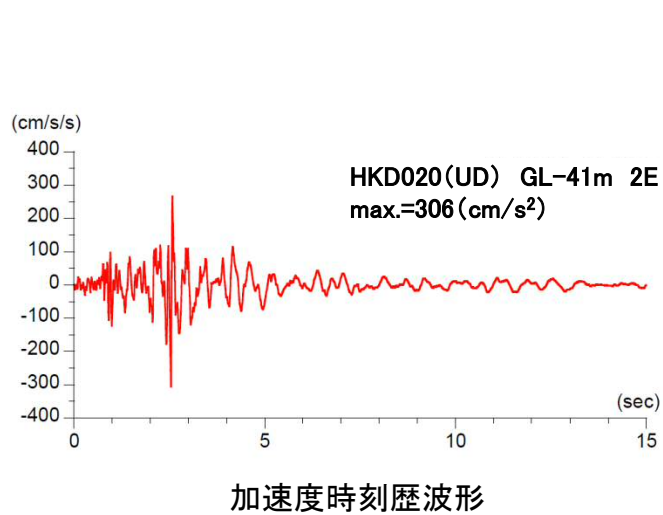
※再測定結果によるS波速度は、佐藤ほか(2013)の地盤モデルとほぼ同様のため変更していない。



2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討③)

■ 追加検討③: 地盤モデル変更による基盤地震動(鉛直方向)評価

PS検層の再測定結果を反映した地盤モデルを用い、体積弾性率一定としてGL-41mの鉛直方向の基盤地震動を評価した結果、その最大加速度は306cm/s²となり、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(296cm/s²)と比較すると、やや大きく評価された。



2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討③)

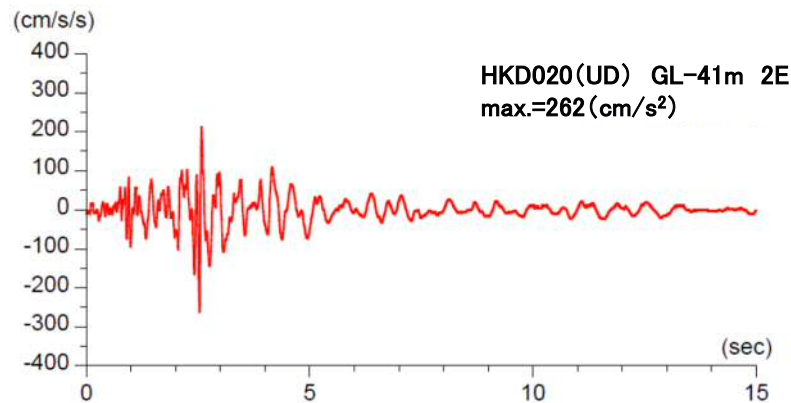
■ 追加検討③のまとめ

- 佐藤ほか(2013)のHKD020(港町)のP波速度モデルは、笹谷ほか(2008)による位相速度を説明できないことから、表層部分のPS検層を再測定し、再測定結果を反映した地盤モデルを設定した。
- 上記地盤モデルを用い、体積弾性率一定としてGL-41mの鉛直方向の基盤地震動を評価した結果、その最大加速度は 306cm/s^2 となり、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(296cm/s^2)と比較すると、やや大きく評価された。

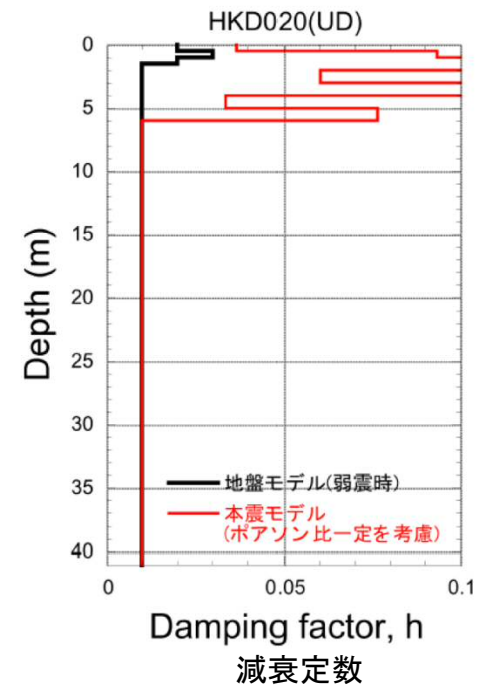
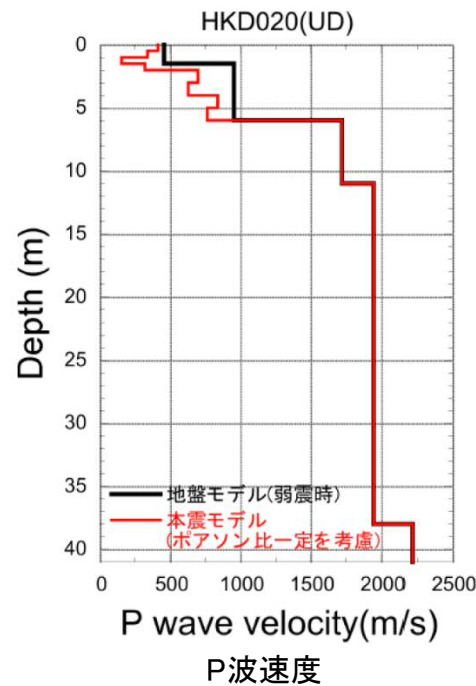
2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討④)

■ 追加検討④: GL-6mまでポアソン比一定とした基盤地震動(鉛直方向)評価

- 佐藤ほか(2013)及び追加検討③における鉛直方向の基盤地震動は、体積弾性率一定として評価しているが、地下水位の状況を踏まえ、GL-6mまでポアソン比一定、GL-6m以深を体積弾性率一定とした場合の鉛直方向の基盤地震動を評価した。
- 体積弾性率一定とした場合と比較して、ポアソン比一定とした場合、S波速度の低下に伴ってP波速度も低下するため、最大加速度は小さくなっている。
- その結果、最大加速度は 262cm/s^2 となり、体積弾性率一定と仮定した結果(306cm/s^2)は保守的な結果となっている。



加速度時刻歴波形



2004年北海道留萌支庁南部地震(追加検討④)

■ 追加検討④のまとめ

- 地下水位の状況を踏まえ、GL-6mまでポアソン比一定、GL-6m以深を体積弾性率一定とした場合の鉛直方向の基盤地震動を評価した。
- GL-41mの基盤地震動を評価した結果、その最大加速度は 262cm/s^2 となり、体積弾性率一定と仮定した結果(306cm/s^2)は保守的な結果となっている。

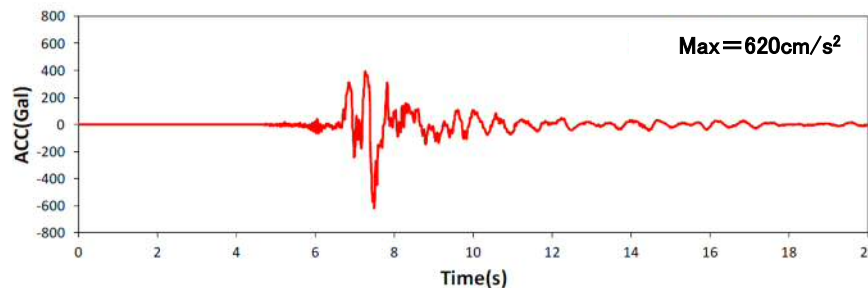
2004年北海道留萌支庁南部地震(まとめ)

■ 佐藤ほか(2013)による2004年北海道留萌支庁南部地震におけるHKD020(港町)の基盤地震動評価について、以下の追加検討を行った。

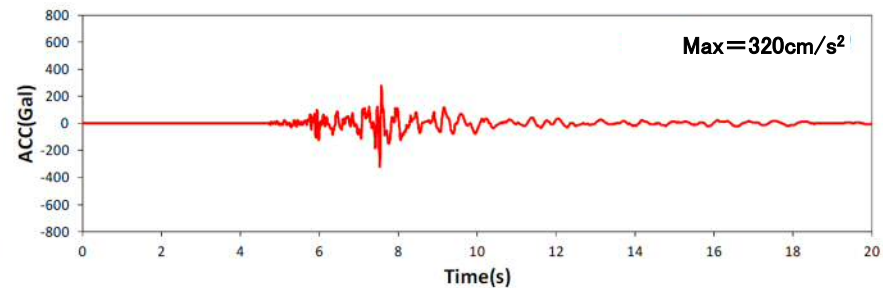
- ①GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向)
- ②GL-6mからGL-41mまで減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向)
- ③再測定されたPS検層結果を踏まえた基盤地震動評価(鉛直方向)
- ④地下水位の状況を踏まえGL-6mまでポアソン比一定とした基盤地震動評価(鉛直方向)

➤ 以上の検討結果より、基盤地震動の最大加速度は、水平方向についてはケース②(609cm/s^2)、鉛直方向についてはケース③(306cm/s^2)が最も大きくなった。

➤ 上記の基盤地震動について、原子力発電所の耐震性に求められる保守性を勘案して、加速度時刻歴波形を水平方向 620cm/s^2 、鉛直方向 320cm/s^2 に基準化(位相特性を変えずに振幅特性のみ変更)し、その地震動を震源を特定せず策定する地震動として考慮する。



水平方向



鉛直方向

加速度時刻歴波形

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討 2013年栃木県北部地震(概要)

■ 概要(発生日時, 地震規模等)

1. 地震発生日時 (気象庁他)

- ・発生日時: 平成25年2月25日 16時23分頃
- ・地震規模: Mj6.3 (Mw5.8)
- ・震源深さ: 約3km
- ・震源位置: 北緯36.873°、東経139.412°

2. 各地の震度及び被害状況

各地の震度(気象庁)は以下のとおり。

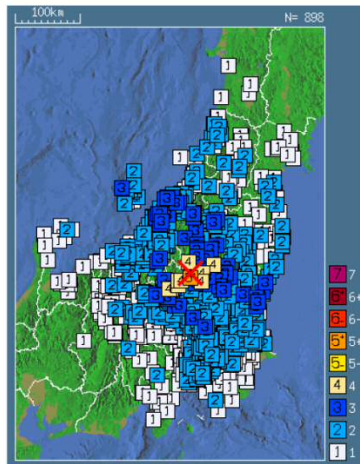
- ・震度5強: 栃木県 日光市
- ・地震による津波の発生はなし

被害状況(消防庁)は以下のとおり。

- ・住家被害: 被害なし
- ・人的被害: 被害なし
- ・その他被害: 被害なし

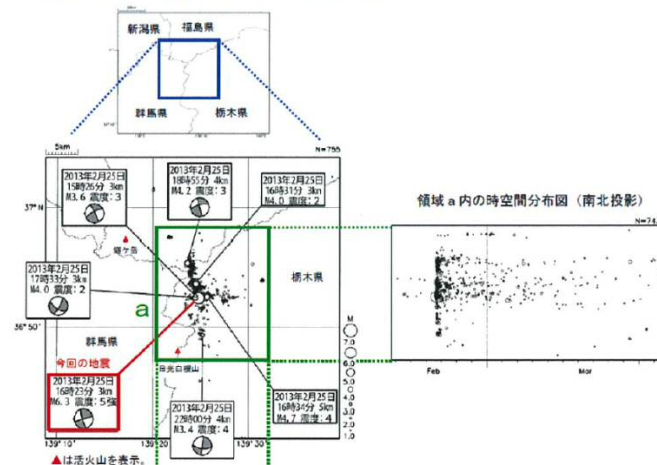
3. 地震発生メカニズム(気象庁)

- ・発震機構解より、西北西-東南東方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型の地震。
- ・震央付近(領域a)では、2月23日頃から地震活動が見られており、約1時間前の2月25日15時26分にもM3.6の地震(最大震度3)が発生。今回の地震の発生後、活発な余震活動が見られ、同日16時34分にM4.7の地震(最大震度4)が発生。

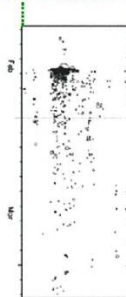


気象庁 震度データベース
による震度分布

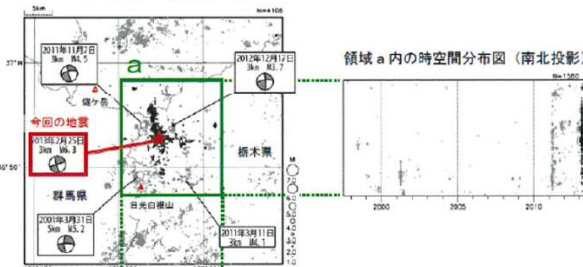
震央分布図
(2013年2月23日～2013年3月12日、深さ0～20km、M≥1.0)



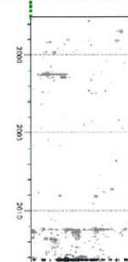
領域a内の時空間分布図(東西投影)



震央分布図
(1997年10月1日～2013年3月12日、
深さ0～20km、M≥1.0)
2013年2月以降の地震を濃く表示



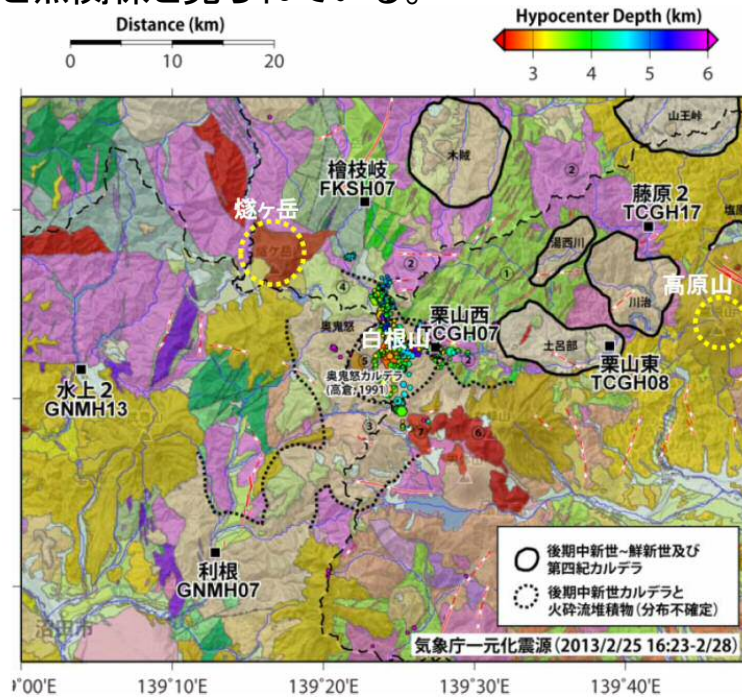
領域a内の時空間分布図(東西投影)



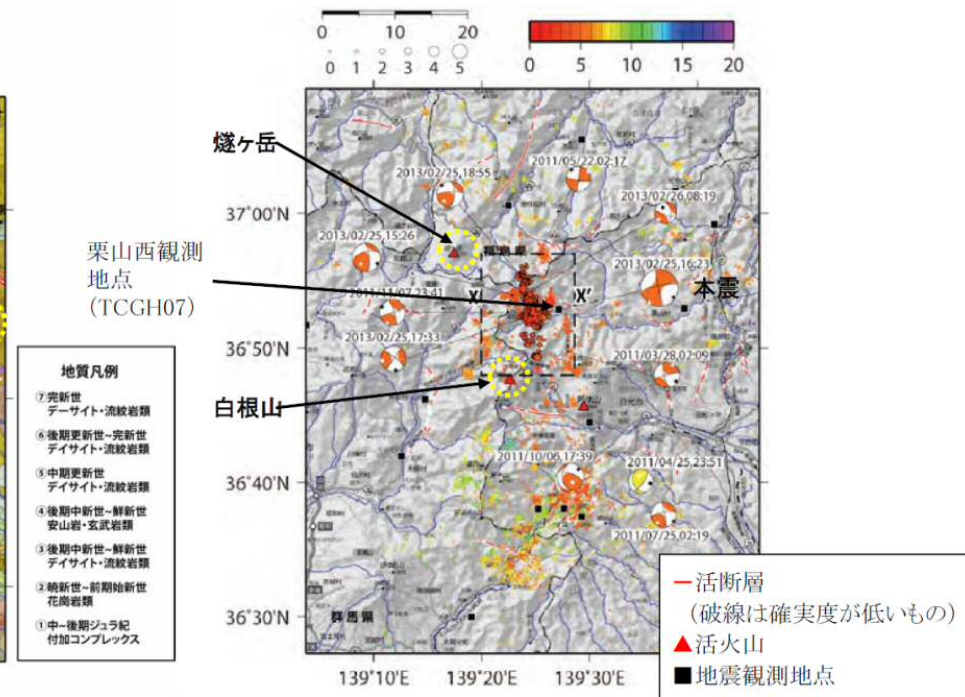
2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2013年栃木県北部地震(震源周辺の地質構造)

- 栃木県北部地震の震源域には、後期中新世の奥鬼怒カルデラ並びに同噴出物が分布する。
- 震源域周辺には、後期中新世～鮮新世に活動したカルデラ火山群があり、これらの近傍には前期～後期更新世に活動した第四紀火山が分布する。このうち、高原山・白根山・燧ヶ岳(尾瀬)は、完新世に活動実績を持つ活火山であることから、この地域では火山活動が継続し、地殻浅部～深部の地質構造に様々な制約を与えていると想定される。
- 栃木県北部地震は、西北西－東南東方向に圧縮軸を持つ、横ずれ断層型である。余震分布は、南北方向からやや反時計回りに並んでおり、震源断層は南北系と想定される。
- 震源域周辺には、確実度が低い活断層が分布しているが、東西系の走向に近いことから、震源断層は活断層と無関係と見られている。



地質・カルデラと震央の分布図



栃木県北部地震とその周辺の地震活動
(2011.3.11～2013.2.25の地震活動)

(地震速報)2013年2月15日栃木県北部の地震(電力中央研究所提供, 2013)に加筆

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2013年栃木県北部地震(観測記録)

- 震源距離が30km以内の観測記録としては下表の10記録となる。
- このうち、震源近傍に位置するTCGH07(栗山西)においては、地表で最大加速度1224.3cm/s²が観測されており、司・翠川(1999)の距離減衰式の+1σを上回る。

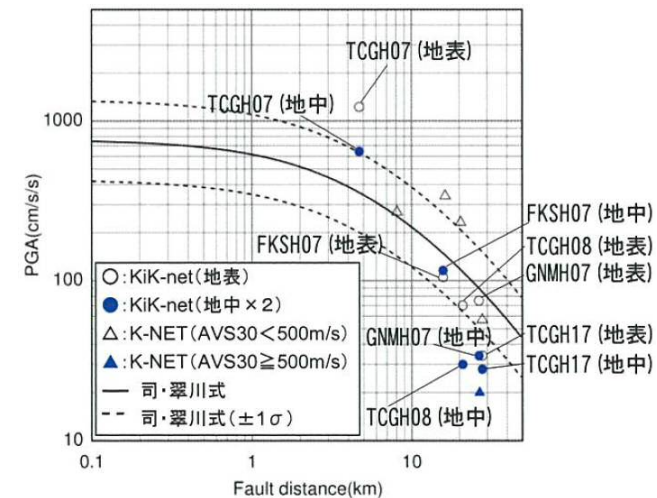
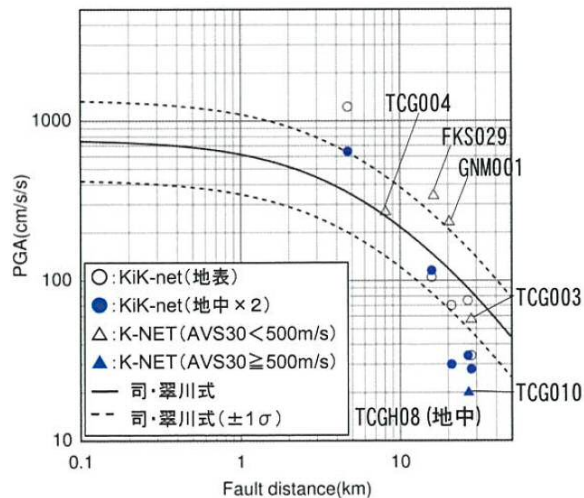
断層最短距離が30km以内の観測記録(K-NET)

観測点	震源距離(km)	AVS30(m/s)	最大加速度(cm/s ²)			
			水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)	
TCG004	湯元	8.1	421.0	196.8	269.5	283.2
FKS029	桧枝岐	16.3	492.2	199.8	339.2	146.0
GNM001	片品	20.4	462.1	168.2	231.5	100.9
TCG010	足尾	26.8	516.8	12.2	20.0	12.9
TCG003	藤原	27.9	345.5	56.9	55.4	28.8

断層最短距離が30km以内の観測記録(KiK-net)

観測点	震源距離(km)	AVS30(m/s)	最大加速度(cm/s ²)※		
			水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)
TCGH07	栗山西	4.7	1224.3 (296.2)	835.0 (322.3)	736.5 (168.2)
FKSH07	桧枝岐	15.8	91.7 (28.9)	105.3 (58.5)	74.1 (33.9)
TCGH08	栗山東	21.0	69.8 (15.1)	62.2 (14.4)	42.8 (14.9)
GNMH07	利根	26.6	74.6 (17.4)	69.0 (16.3)	54.2 (12.7)
TCGH17	藤原2	27.9	34.2 (13.5)	30.3 (10.3)	17.4 (6.4)

※()の数値は地中記録を示す



司・翠川(1999)の距離減衰式との関係

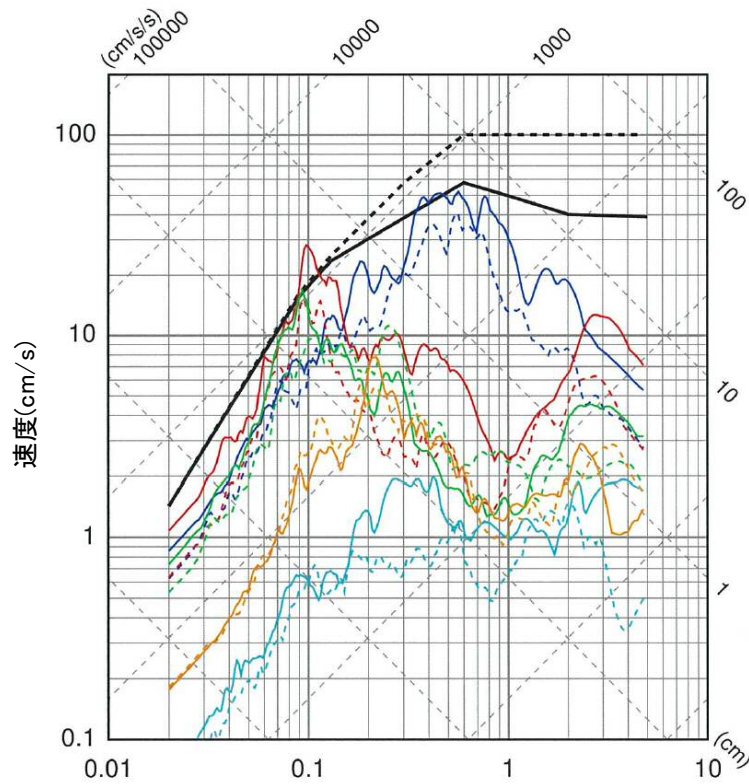
2013年栃木県北部地震(観測記録)

■ K-NET観測点の観測記録のうち、FKS029(松枝岐)及びTCG004(湯元)の観測記録は、加藤ほか(2004)の応答スペクトルを一部の周期で上回る。

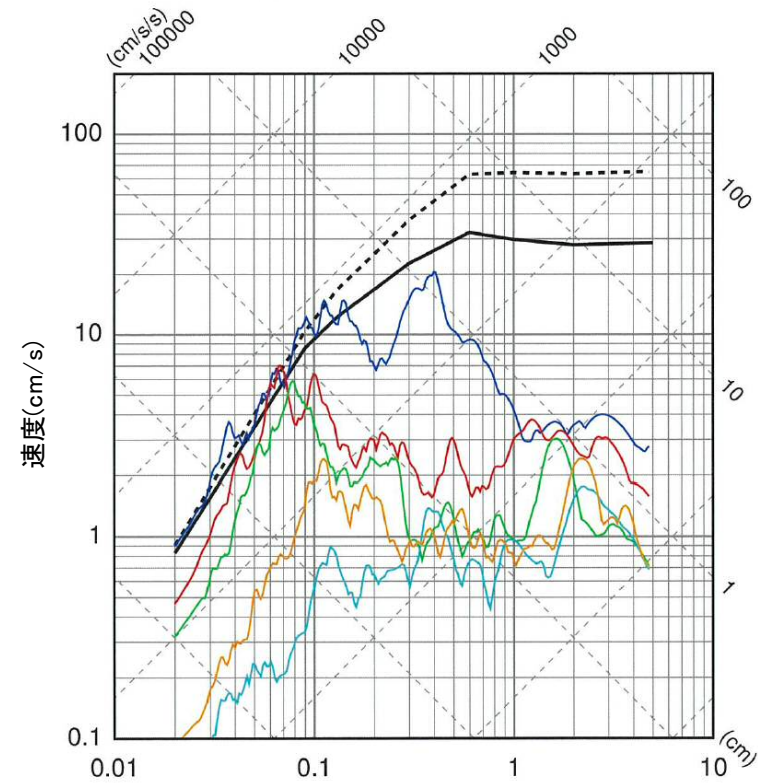
- 加藤ほか(2004)($V_s=0.7\text{km/s}$)
- 加藤ほか(2004)($V_s=2.2\text{km/s}$)
- TCG004(X=8.1km)_EW
- TCG004(X=8.1km)_NS
- FKS029(X=16.3km)_EW
- FKS029(X=16.3km)_NS

- GNM001(X=20.4km)_EW
- GNM001(X=20.4km)_NS
- TCG010(X=26.8km)_EW
- TCG010(X=26.8km)_NS
- TCG003(X=27.9km)_EW
- TCG003(X=27.9km)_NS

- 加藤ほか(2004)($V_p=2.0\text{km/s}$)
- 加藤ほか(2004)($V_p=4.2\text{km/s}$)
- TCG004(X=8.1km)_UD
- FKS029(X=16.3km)_UD
- GNM001(X=20.4km)_UD
- TCG010(X=26.8km)_UD
- TCG003(X=27.9km)_UD



周期(秒)
水平方向

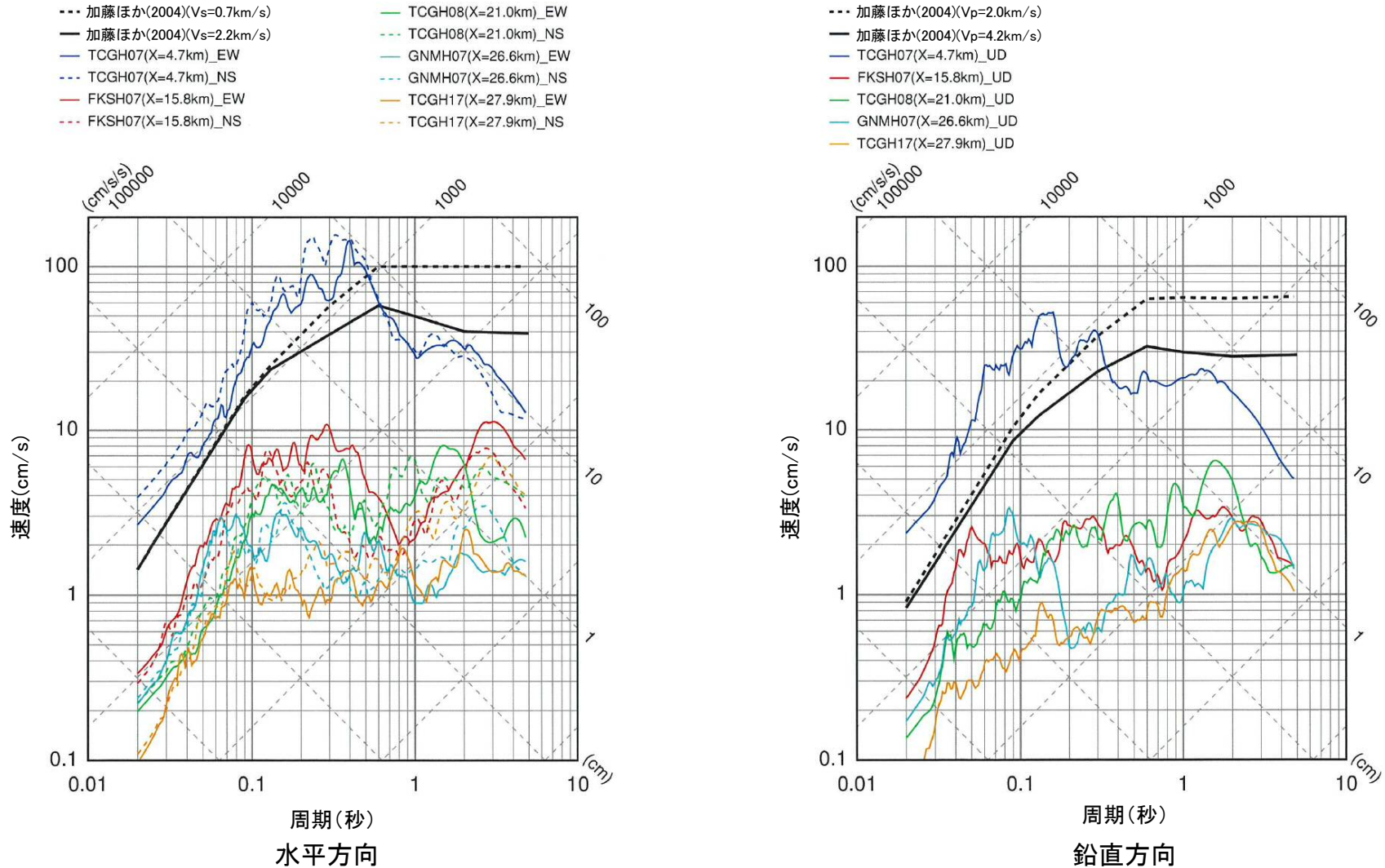


周期(秒)
鉛直方向

K-NET各観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2013年栃木県北部地震(観測記録)

■ KiK-net観測点の地表観測記録のうち, TCGH07(栗山西)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回る。

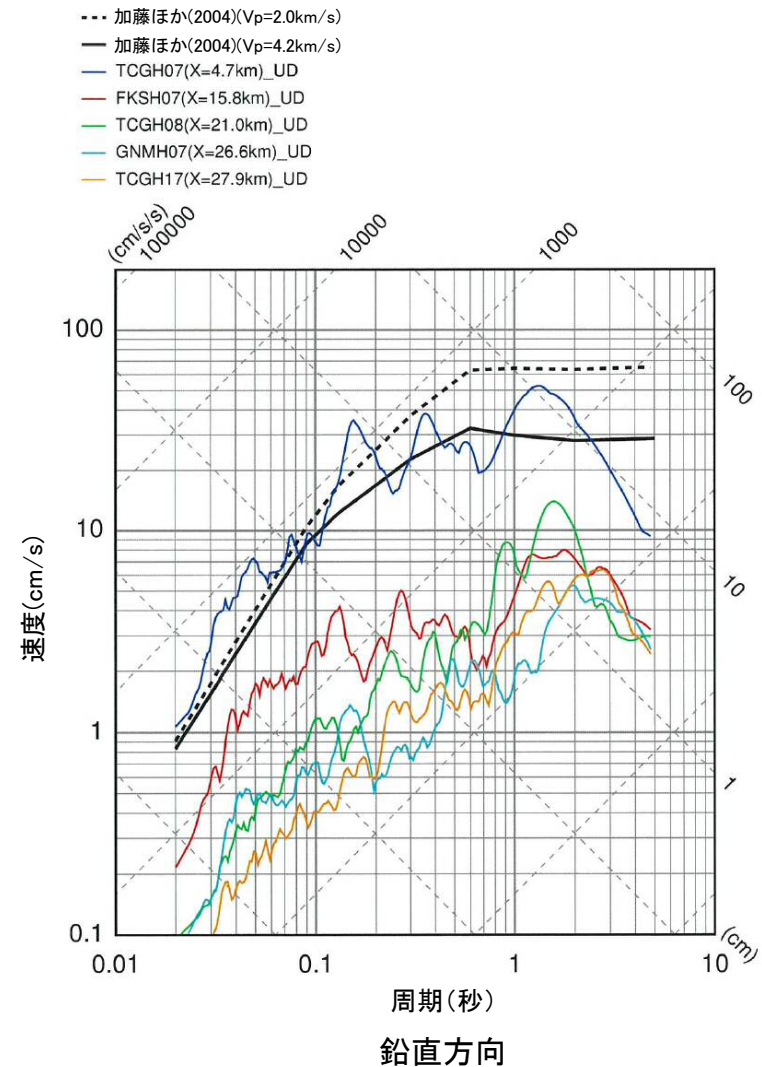
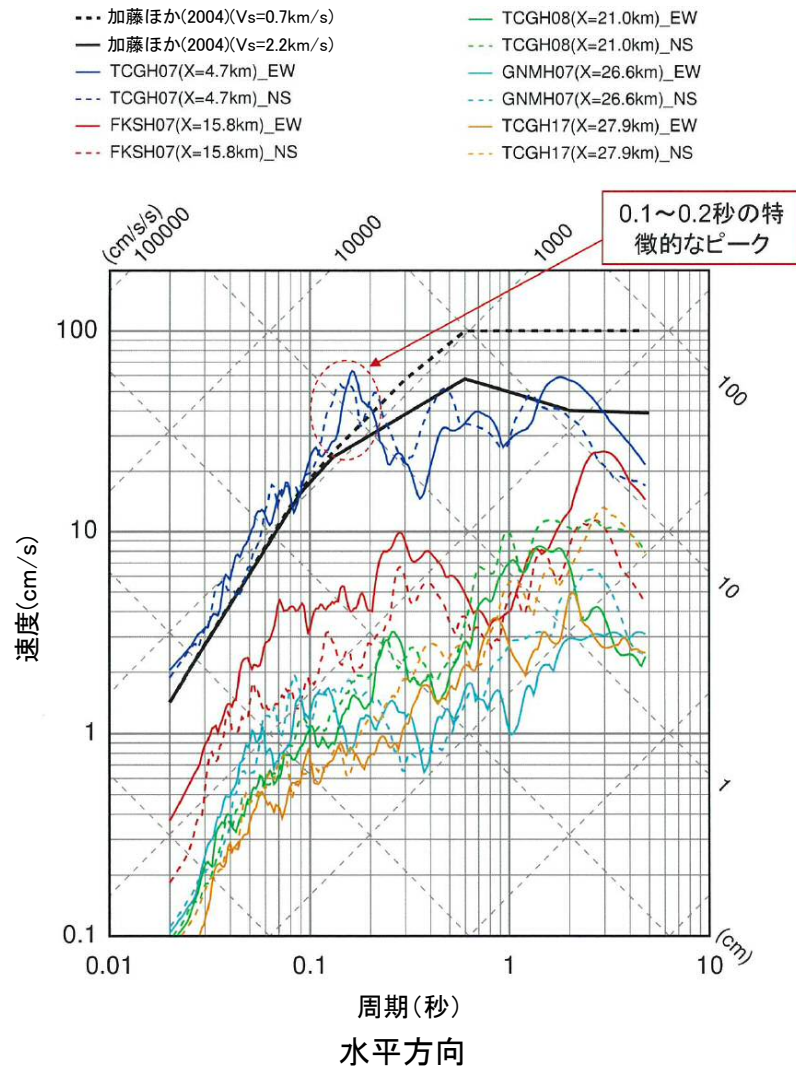


KiK-net各観測記録(地表)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2013年栃木県北部地震(観測記録)

■ KiK-net観測点の地中観測記録(地中×2)のうち, TCGH07(栗山西)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回る。

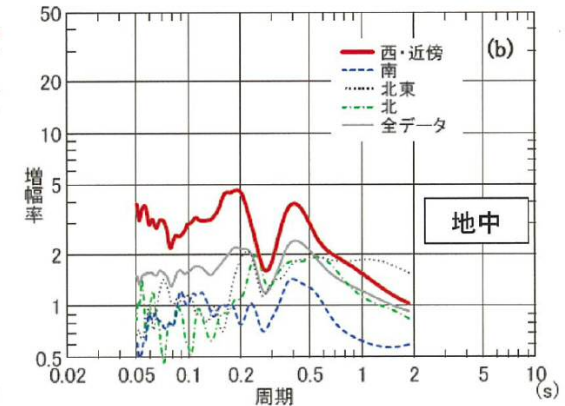
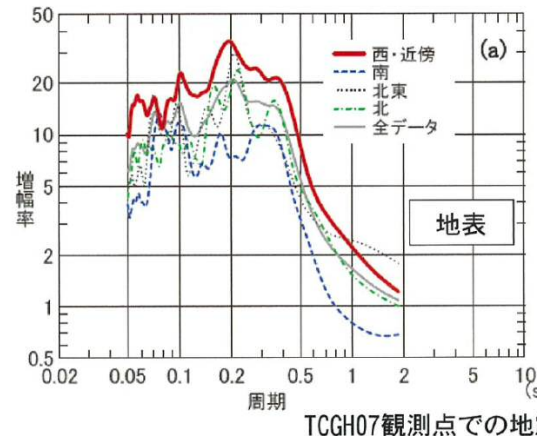
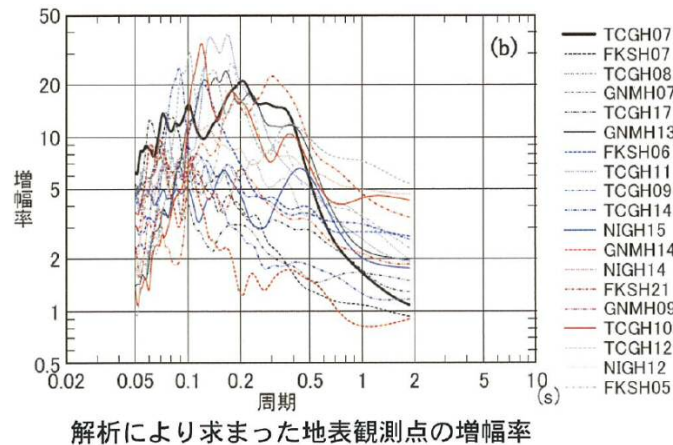
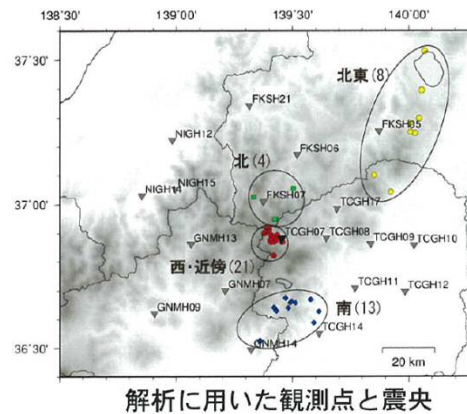
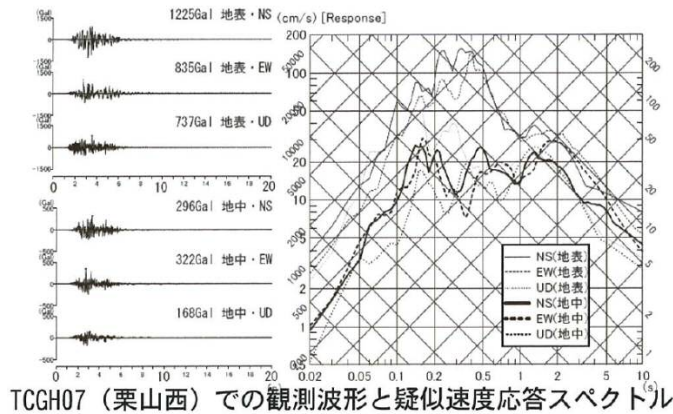


KiK-net各観測記録(地中×2)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2013年栃木県北部地震(引間(2013))

■ 引間(2013)

2013年栃木県北部地震のスペクトルインバージョンにより、TCGH07(栗山西)の観測記録を分析しており、その地中記録は周期0.2, 0.4秒付近で卓越するとしている。また、増幅特性の要因が震源～観測点の伝播特性にあるのか、TCGH07(栗山西)の地盤特性にあるのかを分離することは難しいとしている。



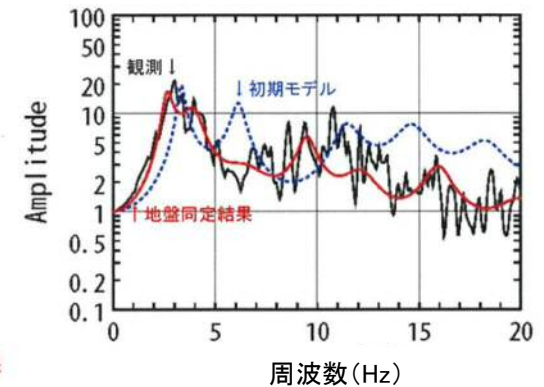
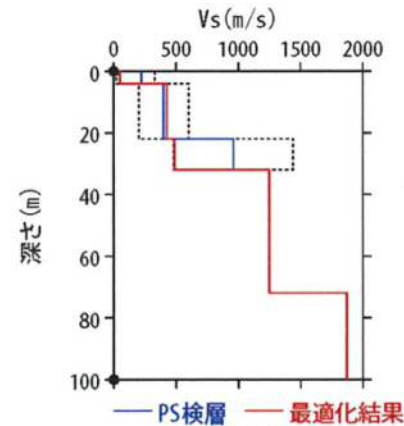
2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2013年栃木県北部地震(はぎとり解析)

- TCGH07(栗山西)について, KiK-netボーリングデータを初期値とし, 観測記録の伝達関数を再現できるように地盤同定を実施。
- 得られた地盤モデルは, PS検層結果から大きく乖離しているため, 1次元波動論によるはぎとり解析の適用が困難と考えられる。

地盤同定結果(水平方向)

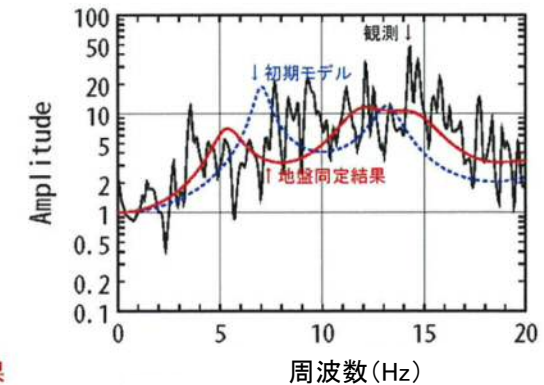
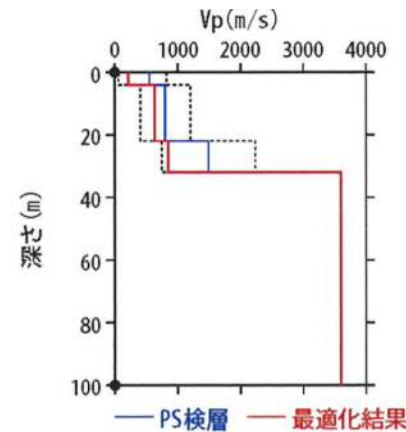
No	THK (m)	DEP (m)	Den (g/cm ³)	S波速度(m/s)					減衰定数	
				Initial	Lower	Upper	Optimized	Opt./Ini.	ho	α
1	4	0	1.64	220	22	330	51	0.23		
2	18	4	1.64	400	200	600	428	1.07	0.081	0.312
3	10	22	1.64	960	480	1440	487	0.51		
4	40	32	2.33	1250	1250	1250	1250	1.00		
5	28	72	2.33	1870	1870	1870	1870	1.00	0.266	0.000
6	—	100	2.33	1870	1870	1870	1870	1.00		



伝達関数の比較(水平方向)

地盤同定結果(鉛直方向)

No	THK (m)	DEP (m)	Den (g/cm ³)	P波速度(m/s)					減衰定数	
				Initial	Lower	Upper	Optimized	Opt./Ini.	ho	α
1	4	0	1.64	550	55	825	216	0.39		
2	18	4	1.64	800	400	1200	630	0.79		
3	10	22	1.64	1490	745	2235	844	0.57		
4	40	32	2.33	3600	3600	3600	3600	1.00	0.232	0.350
5	28	72	2.33	3600	3600	3600	3600	1.00		
6	—	100	2.33	3600	3600	3600	3600	1.00		



伝達関数の比較(鉛直方向)

※電力共通研究「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震動評価手法の高度化に関する研究」にて検討を実施

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2011年茨城県北部地震(概要)

■ 概要(発生日時, 地震規模等)

1. 地震発生日時 (気象庁他)
 - ・発生日時: 平成23年3月19日 18時56分頃
 - ・地震規模: $M_j 6.1$ ($M_w 5.8$)
 - ・震源深さ: 約5km
 - ・震源位置: 北緯 36.783° 、東経 140.57°

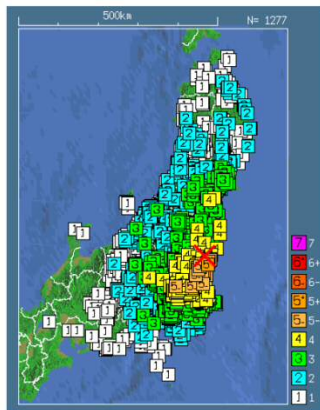
2. 各地の震度及び被害状況

各地の震度(気象庁)は以下のとおり。

 - ・震度5強: 茨城県 日立市
 - ・震度5弱: 茨城県 常陸太田市、高萩市、笠間市、ひたちなか市、常陸大宮市、那珂市、城里町、土浦市、五霞町
 - ・地震による津波の発生はなし

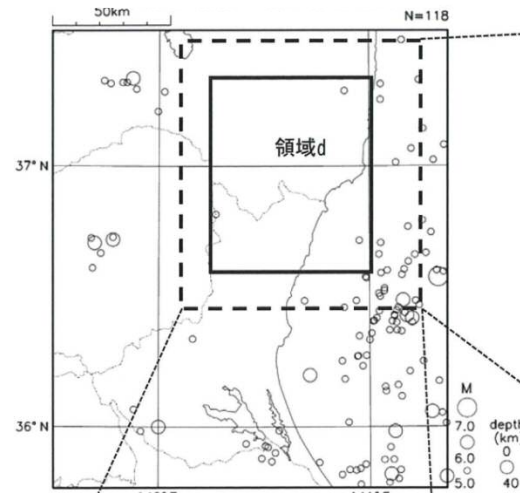
被害状況についての資料なし。
 ・消防庁資料なし
 ・気象庁資料なし

3. 地震発生メカニズム (気象庁)
 - ・発震機構解より、北東-南西方向に張力軸を持つ正断層型の地震。
 - ・1923年8月以降の活動を見ると、今回の地震の震源付近(領域d)では、「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」が発生する前までの間、 $M 5.0$ 以上の浅い地震はほとんど観測されていない。

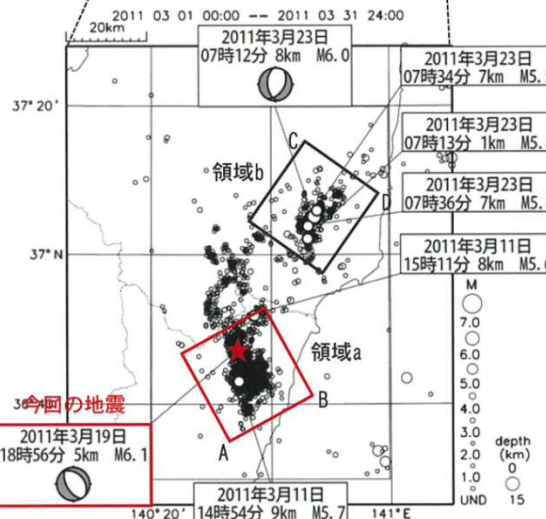
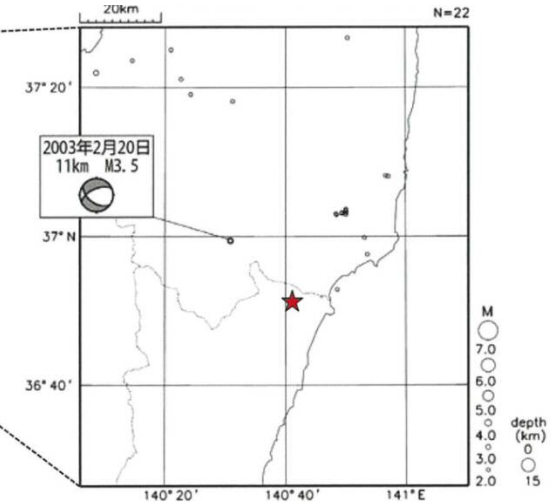


気象庁 震度データベースによる震度分布

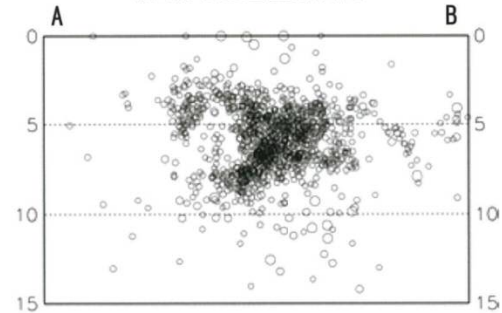
震央分布図
 (1923年8月1日~2011年3月11日
 14時45分, 深さ0~40km, $M \geq 5.0$)



震央分布図
 (1997年10月1日~2011年3月11日
 14時45分, 深さ0~15km, $M \geq 2.0$)



領域aのAB垂直断面図※

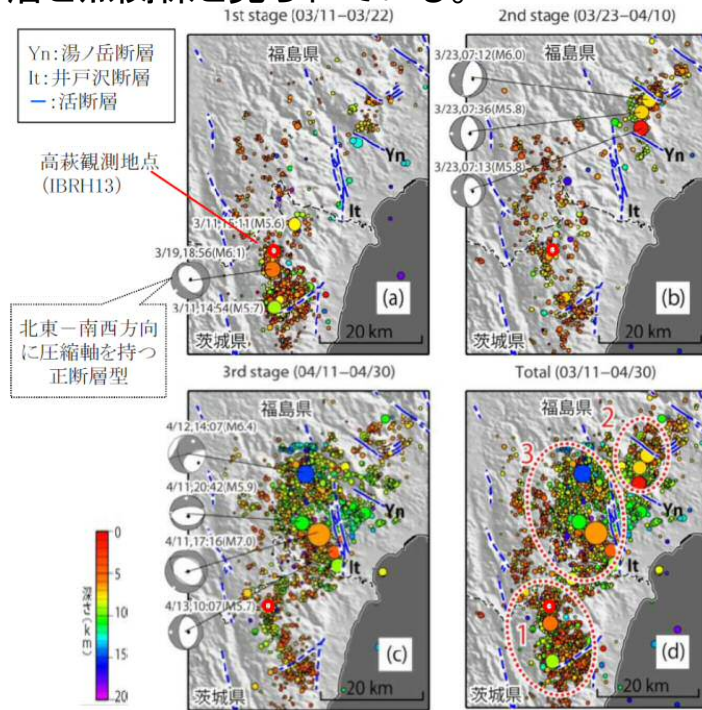


震央分布図※
 (2011年3月1日~3月31日, 深さ0~15km, M全て)
 ※2011年3月11日以降は未処理のデータがある

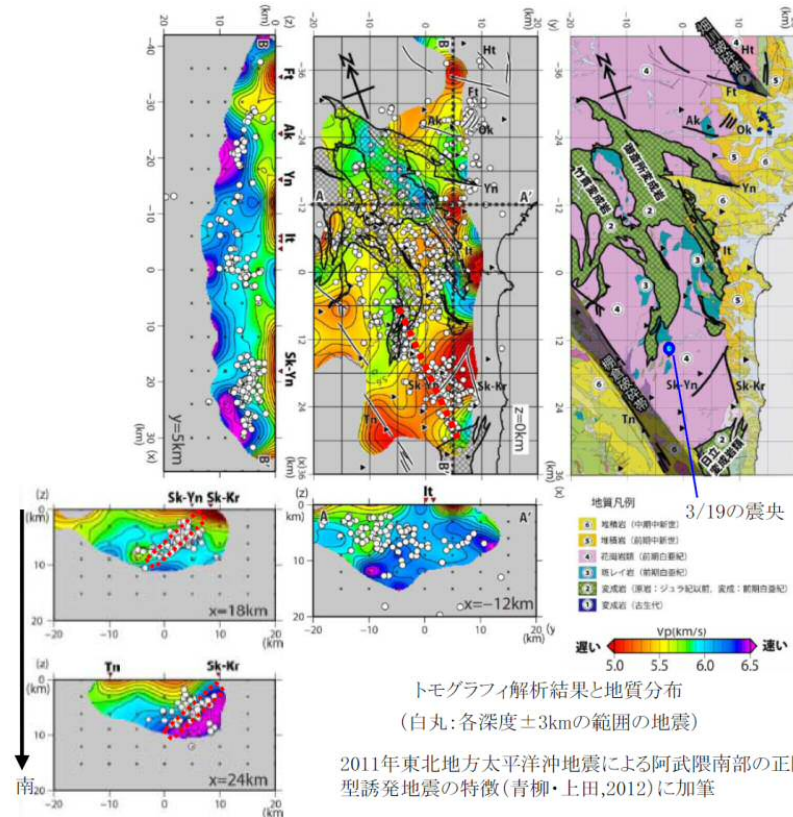
2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2011年茨城県北部地震(震源周辺の地質構造)

- 茨城県北部地震は、東北地方太平洋沖地震の誘発地震と考えられており、3.11直後から、3つのステージで震源域が拡大。
- 阿武隈南部には、変成岩(原岩:ジュラ紀以前, 変成:前期白亜紀), 花崗岩(前期白亜紀)が広く分布するが、地震後の稠密余震観測等の結果、高速度域は変成岩, 低速度域は花崗岩に対応し誘発地震は地質構造に規制されていると考えられている。
- 茨城県北部地震を含むエリアには関口-米平リニアメント(Sk-Yn)が、外周部には関口-黒磯リニアメント(Sk-Kr)・棚倉破碎帯西縁断層(Tn)が分布する。地震活動は、竹貫及び日立変成岩に挟まれた花崗岩分布域に対応して北北西-南南東方向に延び、南西傾斜を示している。
- 地震活動が関口-米平リニアメントを横断し、関口-黒磯リニアメントと走向が異なることから、北部地震は、両断層と無関係と見られている。



活動場の変遷(2011/3/11~4/30)



トモグラフィ解析結果と地質分布
(白丸:各深度±3kmの範囲の地震)

2011年東北地方太平洋沖地震による阿武隈南部の正断層型誘発地震の特徴(青柳・上田,2012)に加筆

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2011年茨城県北部地震(観測記録)

- 震源距離が30km以内の観測記録としては下表の11記録となる。
- このうち、震源近傍に位置するIBRH13(高萩)においては、地表で最大加速度1026.5cm/s²が観測されており、司・翠川(1999)の距離減衰式の+1σを上回る。

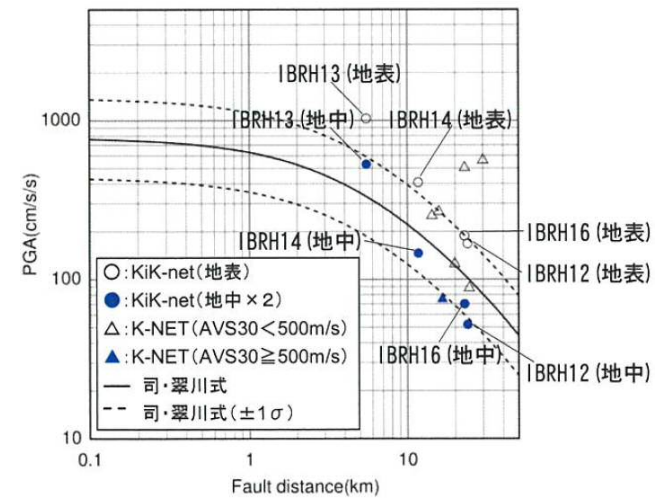
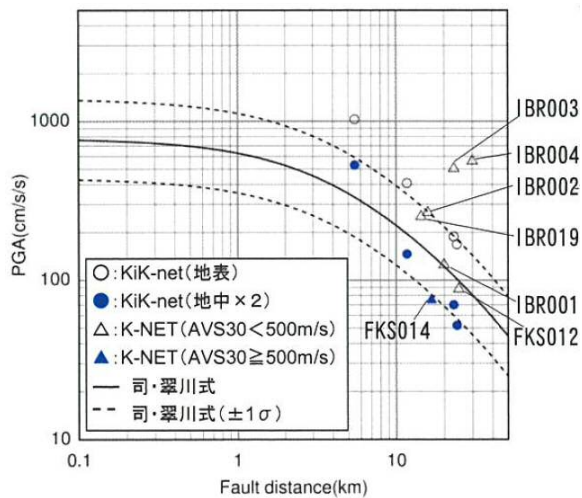
断層最短距離が30km以内の観測記録(K-NET)

観測点	震源距離(km)	AVS30(m/s)	最大加速度(cm/s ²)			
			水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)	
K-NET (地表)	IBR019 北茨城	14.3	—	221.0	251.1	122.4
	IBR002 高萩	15.8	344.8	266.1	239.2	113.8
	FKS014 矢祭	16.6	506.1	48.1	75.5	40.9
	IBR001 大子	19.9	208.4	124.7	96.1	72.8
	IBR003 日立	23.0	292.2	486.7	502.7	278.9
	FKS012 勿来	24.6	202.8	64.8	88.2	51.5
	IBR004 大宮	30.0	325.0	357.7	560.1	169.7

断層最短距離が30km以内の観測記録(KiK-net)

観測点	震源距離(km)	AVS30(m/s)	最大加速度(cm/s ²)※			
			水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)	
KiK-net (地表・地中)	IBRH13 高萩	5.5	335.4	1026.5 (264.8)	526.1 (116.7)	733.1 (128.1)
	IBRH14 十王	11.7	829.1	407.2 (73.1)	382.6 (64.2)	404.7 (62.7)
	IBRH16 山方	22.9	626.1	187.7 (25.3)	184.1 (35.0)	123.0 (20.8)
	IBRH12 大子	24.0	485.7	145.2 (22.1)	168.5 (26.0)	74.9 (14.3)

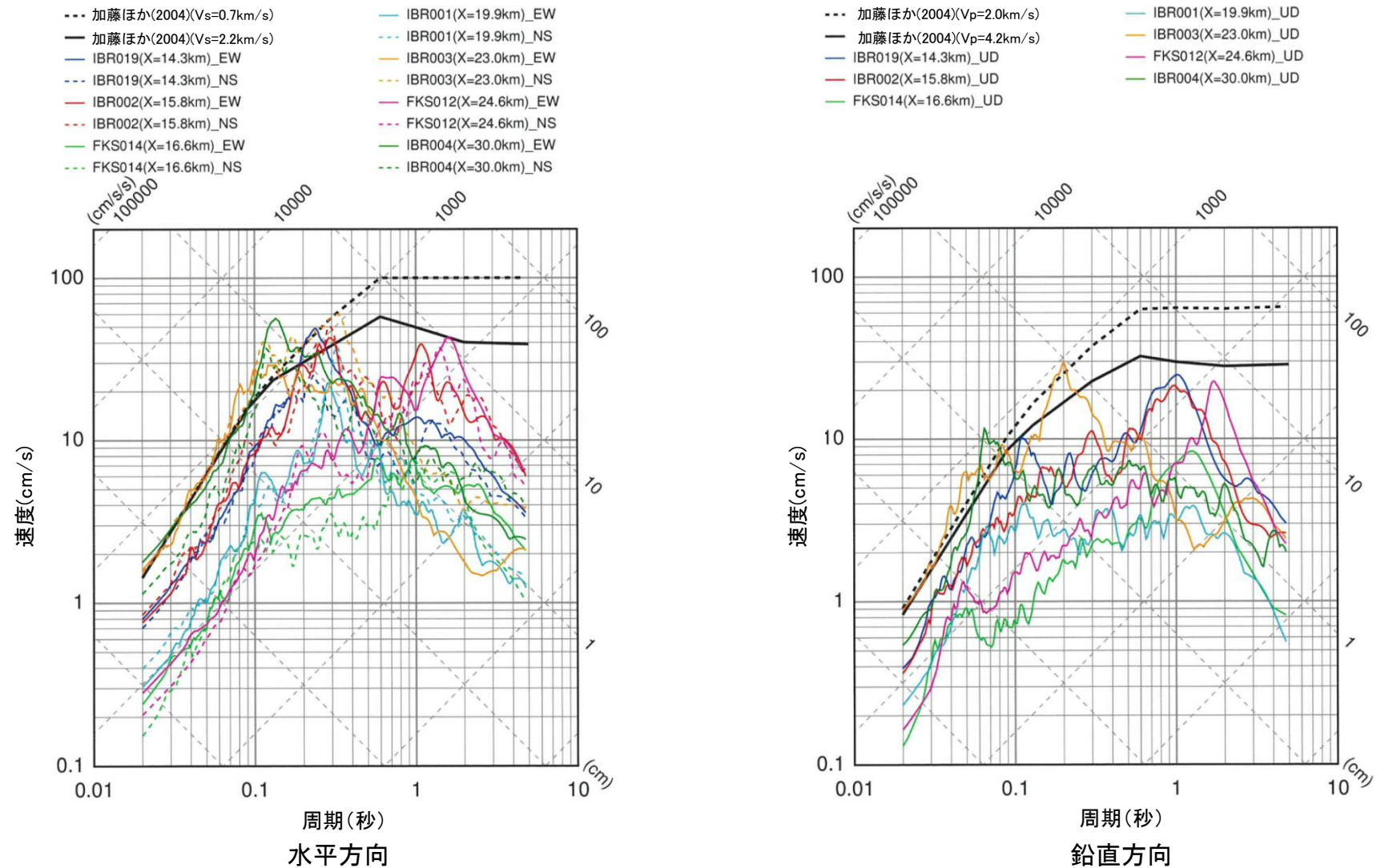
※()の数値は地中記録を示す



司・翠川(1999)の距離減衰式との関係

2011年茨城県北部地震(観測記録)

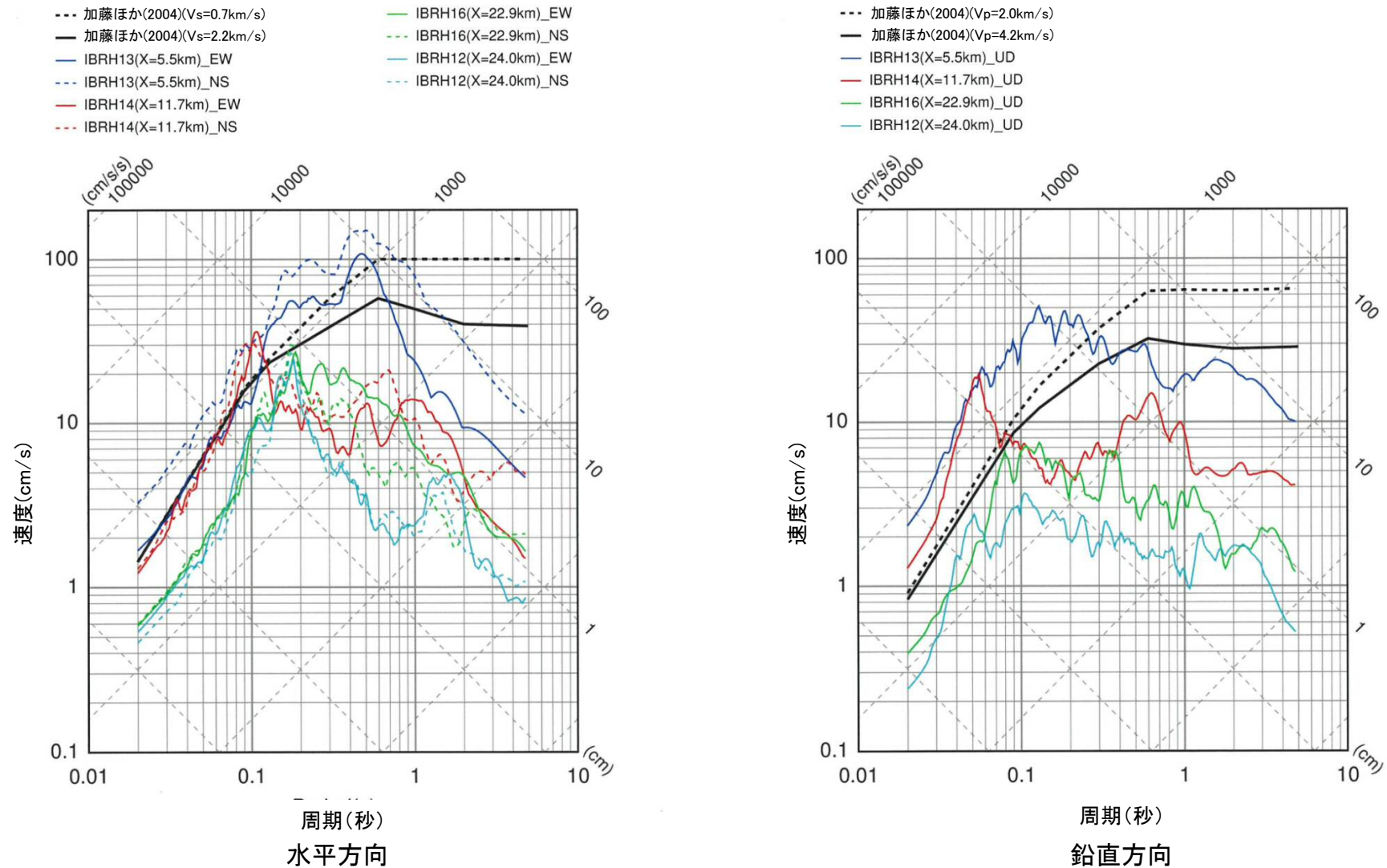
■ K-NET観測点の観測記録のうち, IBR003(日立)及びIBR004(大宮)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを一部の周期で上回る。



K-NET各観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2011年茨城県北部地震(観測記録)

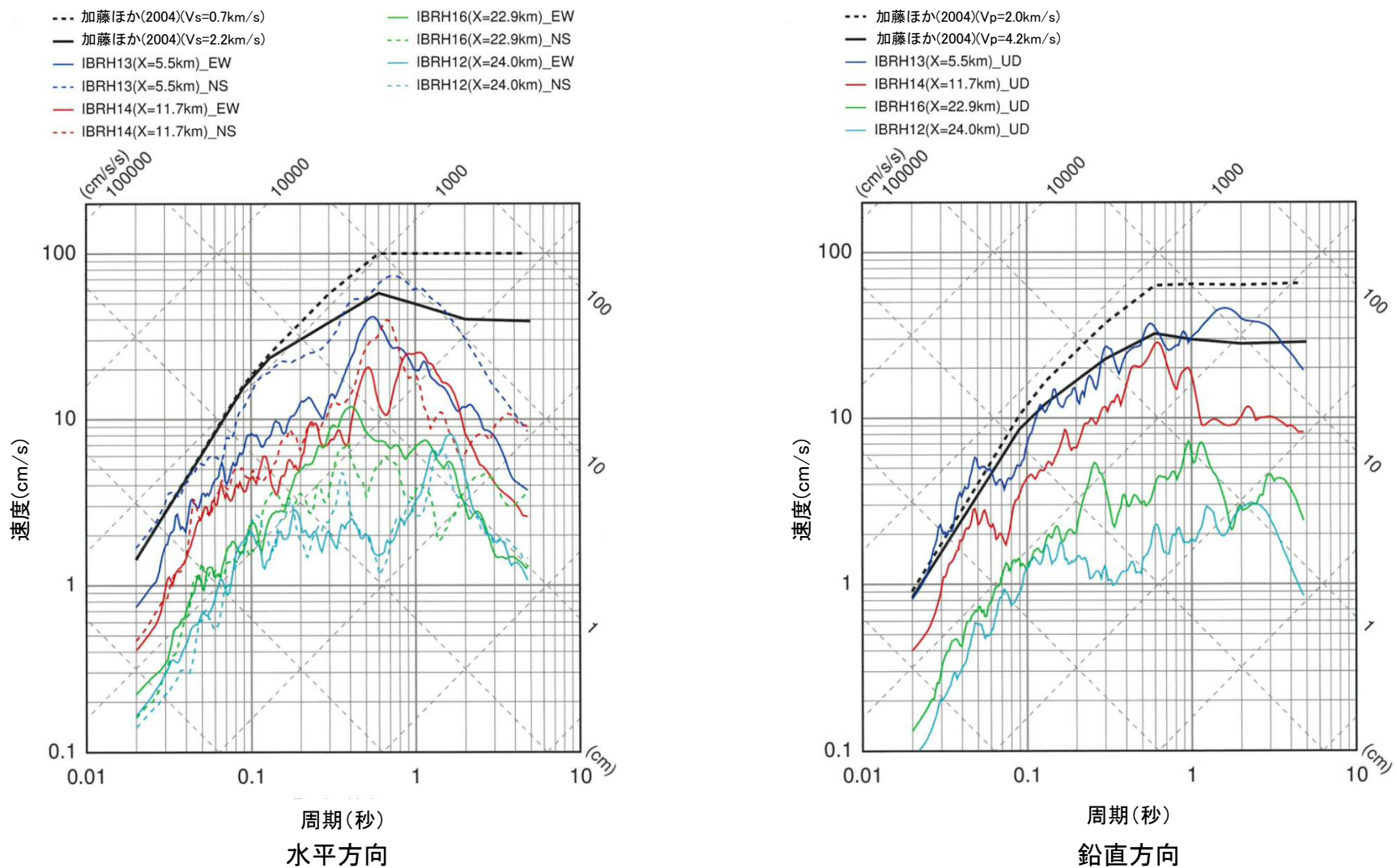
■ KiK-net観測点の地表観測記録のうち、IBRH13(高萩)及びIBRH14(十王)の観測記録は、加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回る。



KiK-net各観測記録(地表)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2011年茨城県北部地震(観測記録)

■ KiK-net観測点の地中観測記録(地中×2)のうち, IBRH13(高萩)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを一部の周期で上回る。



KiK-net各観測記録(地中×2)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2011年茨城県北部地震(はぎとり解析)

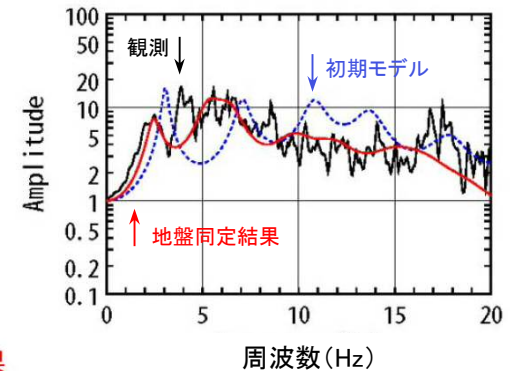
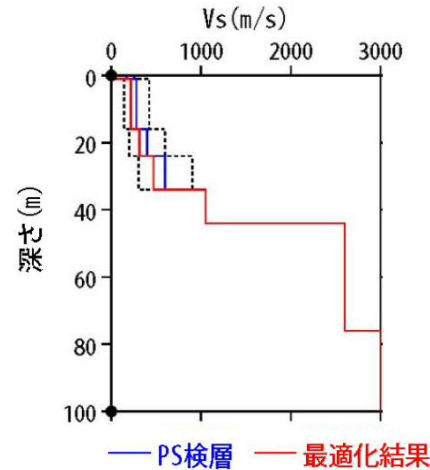
- IBRH13(高萩)について, KiK-netボーリングデータを初期値とし, 観測記録の伝達関数を再現できるように地盤同定を実施。
- 得られた地盤モデルは, 表層のVsが極端に小さく, また上下動の観測記録の伝達関数を再現できていないため, 1次元波動論によるはぎとり解析の適用が困難と考えられる。

地盤同定結果(水平方向)

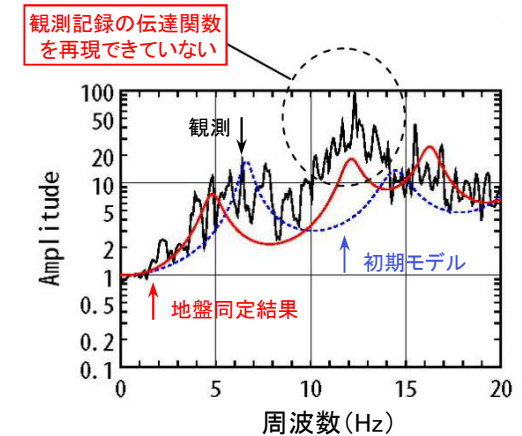
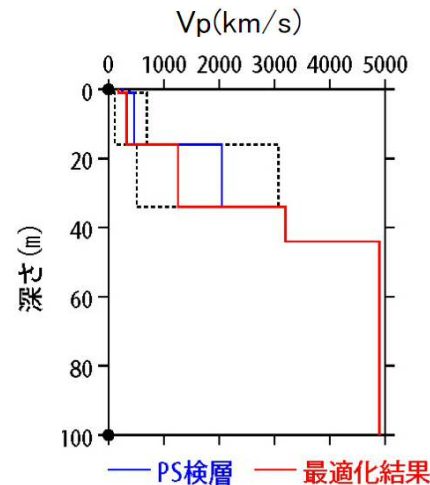
No	THK (m)	DEP (m)	Den (g/cm ³)	S波速度(m/s)					減衰定数	
				Initial	Lower	Upper	Optimized	Opt./Ini.	ho	α
1	1	0	1.64	170	17	255	22	0.13	0.152	0.180
2	15	1	1.64	280	140	420	218	0.78		
3	8	16	1.93	400	200	600	311	0.78		
4	10	24	1.93	600	300	900	467	0.78		
5	10	34	2.26	1050	1050	1050	1050	1.00		
6	32	44	2.52	2600	2600	2600	2600	1.00		
7	24	76	2.52	3000	3000	3000	3000	1.00		
8	—	100	2.52	3000	3000	3000	3000	1.00		

地盤同定結果(鉛直方向)

No	THK (m)	DEP (m)	Den (g/cm ³)	P波速度(m/s)					減衰定数	
				Initial	Lower	Upper	Optimized	Opt./Ini.	ho	α
1	1	0	1.64	250	25	375	179	0.72	0.502	1.00
2	15	1	1.64	460	115	690	330	0.72		
3	8	16	1.93	2050	513	3075	1258	0.61		
4	10	24	1.93	2050	513	3075	1258	0.61		
5	10	34	2.26	3200	3200	3200	3200	1.00		
6	32	44	2.52	4900	4900	4900	4900	1.00		
7	24	76	2.52	4900	4900	4900	4900	1.00		
8	—	100	2.52	4900	4900	4900	4900	1.00		



伝達関数の比較(水平方向)



伝達関数の比較(鉛直方向)

※電力共通研究「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震動評価手法の高度化に関する研究」にて検討を実施

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2011年和歌山県北部地震(概要)

■ 概要(発生日時, 地震規模等)

1. 地震発生日時 (気象庁他)

- ・発生日時: 平成23年7月5日 19時18分頃
- ・地震規模: $M_j 5.5$ ($M_w 5.0$)
- ・震源深さ: 約7km
- ・震源位置: 北緯33.99°、東経135.233°

2. 各地の震度及び被害状況

各地の震度(気象庁)は以下のとおり。

- ・震度5強: 広川町、日高川町
- ・震度5弱: 有田市、湯浅町
- ・地震による津波の発生はなし

被害状況(消防庁)は以下のとおり。

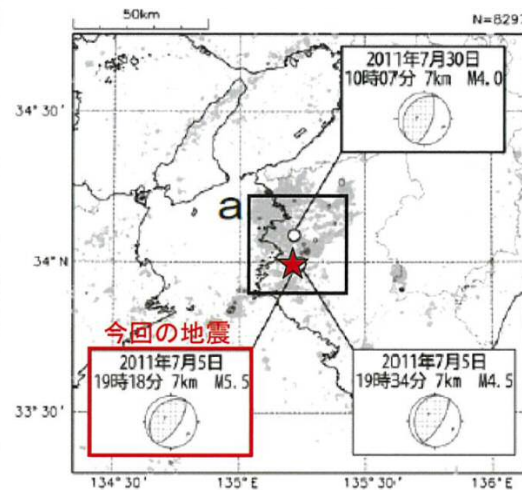
- ・住宅全壊・半壊: 0棟
- ・住宅一部破損: 21棟
(内訳: 有田市 1棟、湯浅町 12棟、
広川町 7棟、由良町 1棟)
- ・人的被害: 被害情報なし
- ・和歌山北部臨海北部、和歌山北部臨海中部、和歌山北部臨海南部、御坊各区域の石油コンビナート施設について、被害なし

3. 地震発生メカニズム(気象庁)

- ・発震機構解より、北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型の地震。
- ・同日19時34分には、ほぼ同じ場所で $M 4.5$ の地震(最大震度4)が発生。また、30日10時07分にこの地震の北約10km、深さ7kmで $M 4.0$ の地震(最大震度3)が発生。この2つの地震の発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型。
- ・今回の震源域周辺では、1900年代以降、 $M 5.0$ を越える地震が発生している。

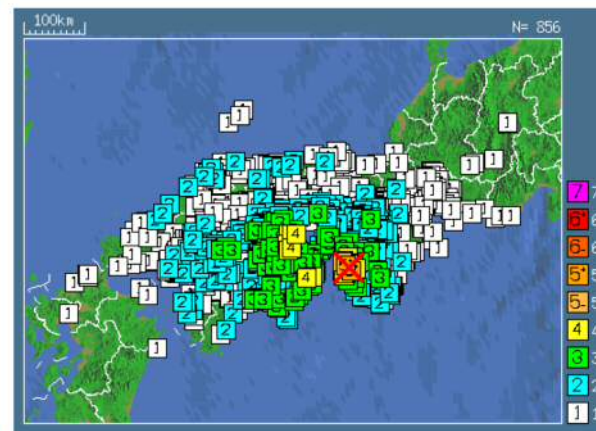
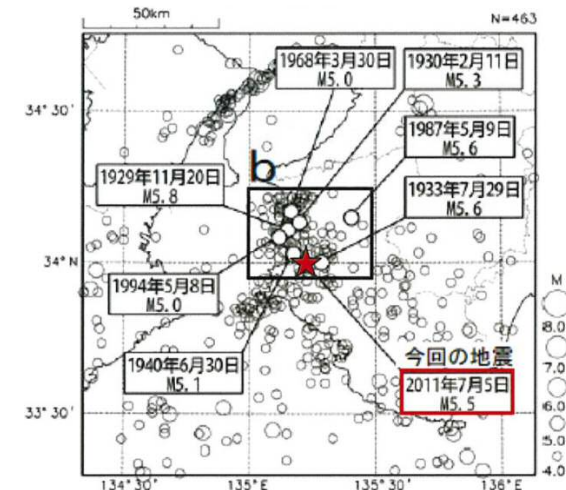
震央分布図

(1997年10月1日～2011年7月31日、
深さ0～20km, $M \geq 1.5$)
2011年7月以降の地震を濃く表示



震央分布図

(1923年8月1日～2011年7月31日、
深さ0～40km, $M \geq 4.0$)

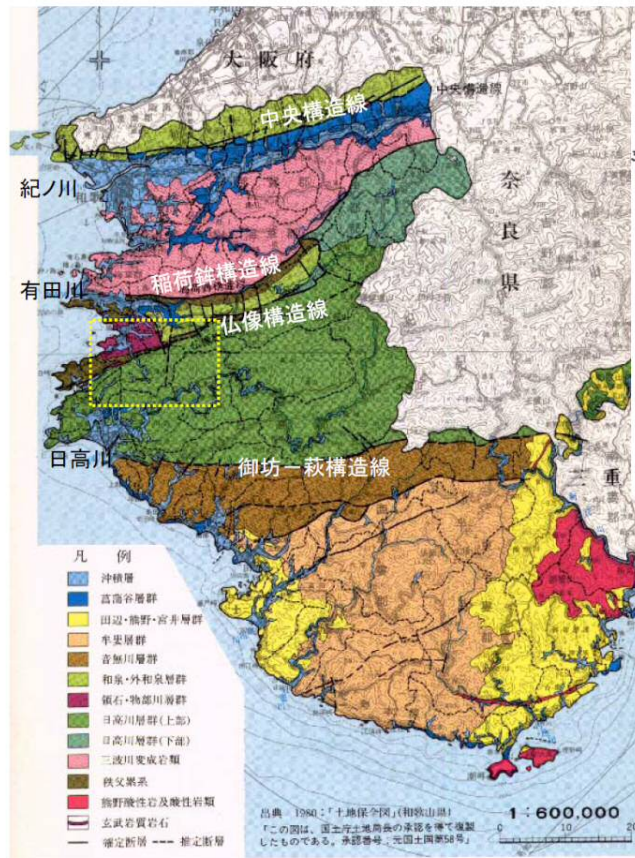


気象庁 震度データベースによる震度分布

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

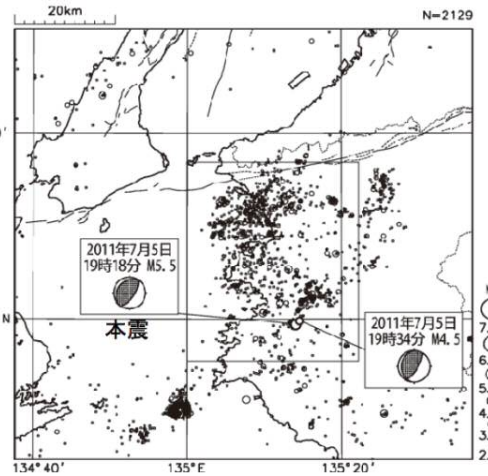
2011年和歌山県北部地震(震源周辺の地質構造)

- 和歌山県北部地震の震源域には、古第三紀の日高川層群(上部)が分布する。
- 震源近傍には、仏像構造線があるが、活断層としての確実度は低いとされている。
- 和歌山県北部地震は、北西-南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型である。
- 余震は、仏像構造線とほぼ平行な長さ3~4kmの範囲に分布し、南東側が浅くなっている。



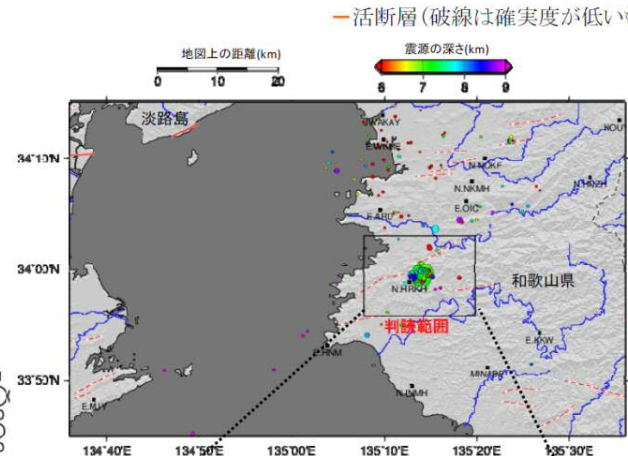
地質図

(平成25年度和歌山県防災計画に加筆)

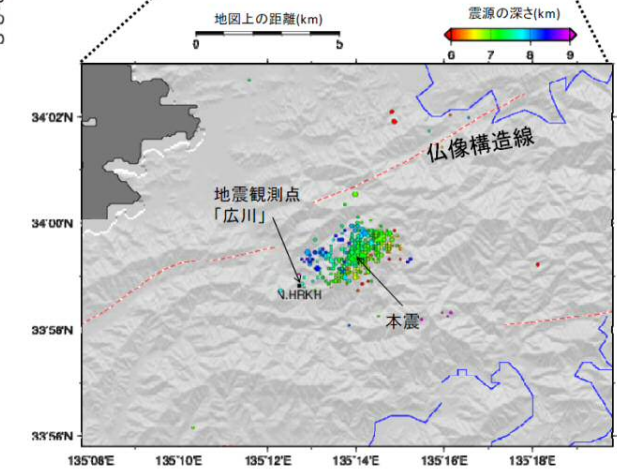


- 1997年10月1日~2011年7月31日
- 深さ 0~30km, M \geq 2.0
- 細線は地震調査研究推進本部による主要活断層

震央分布図
(気象庁に加筆)



気象庁一元化震源(2011/7/5 19:18-7/12 19:18)



余震分布図(電力中央研究所提供)

—活断層(破線は確実度が低いもの)

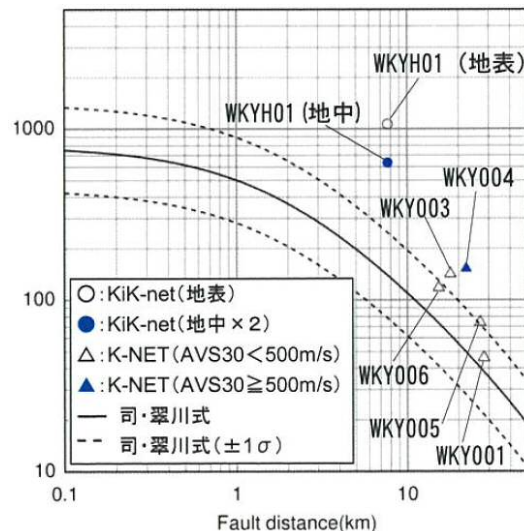
2011年和歌山県北部地震(観測記録)

- 震源距離が30km以内の観測記録としては下表の6記録となる。
- このうち、震源近傍に位置するWKYH01(広川)においては、地表で最大加速度1064.5cm/s²が観測されており、司・翠川(1999)の距離減衰式の+1σを上回る。

断層最短距離が30km以内の観測記録(K-NET及びKiK-net)

観測点			震源距離(km)	AVS30(m/s)	最大加速度(cm/s ²)※		
					水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)
K-NET (地表)	WKY006	御坊	15.3	198.4	88.3	117.5	46.0
	WKY003	有田	17.9	144.0	92.9	141.6	68.3
	WKY004	清水	22.2	681.8	115.4	152.6	29.2
	WKY005	龍神	26.8	338.3	45.7	74.1	32.9
	WKY001	和歌山	28.1	206.3	43.4	46.4	29.9
KiK-net (地表・ 地中)	WKYH01	広川	7.7	462.9	754.2 (137.1)	1064.5 (317.0)	385.8 (96.8)

※()の数値は地中記録を示す



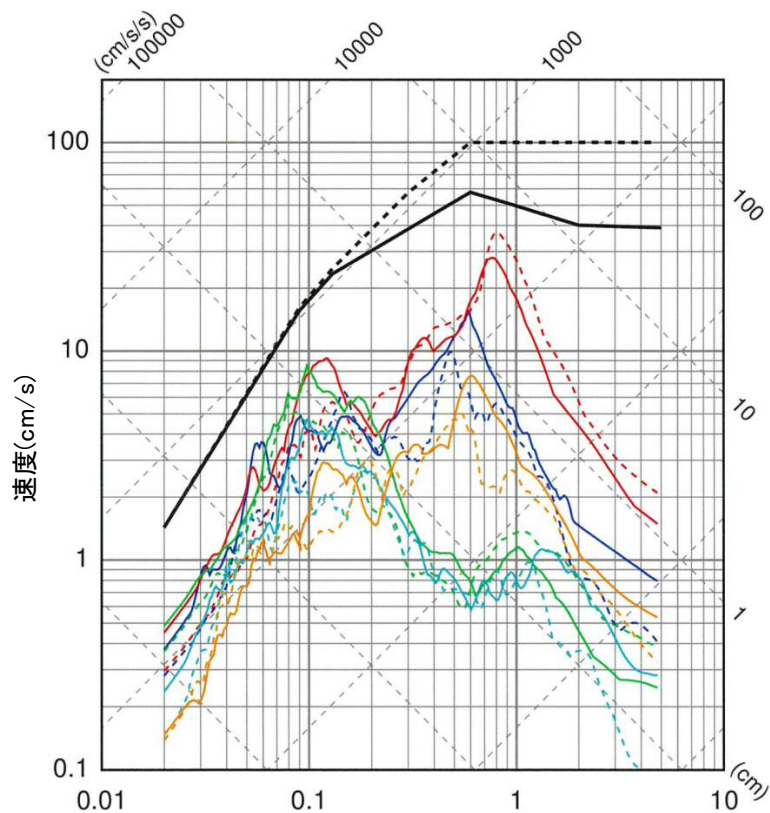
司・翠川(1999)の距離減衰式との関係

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

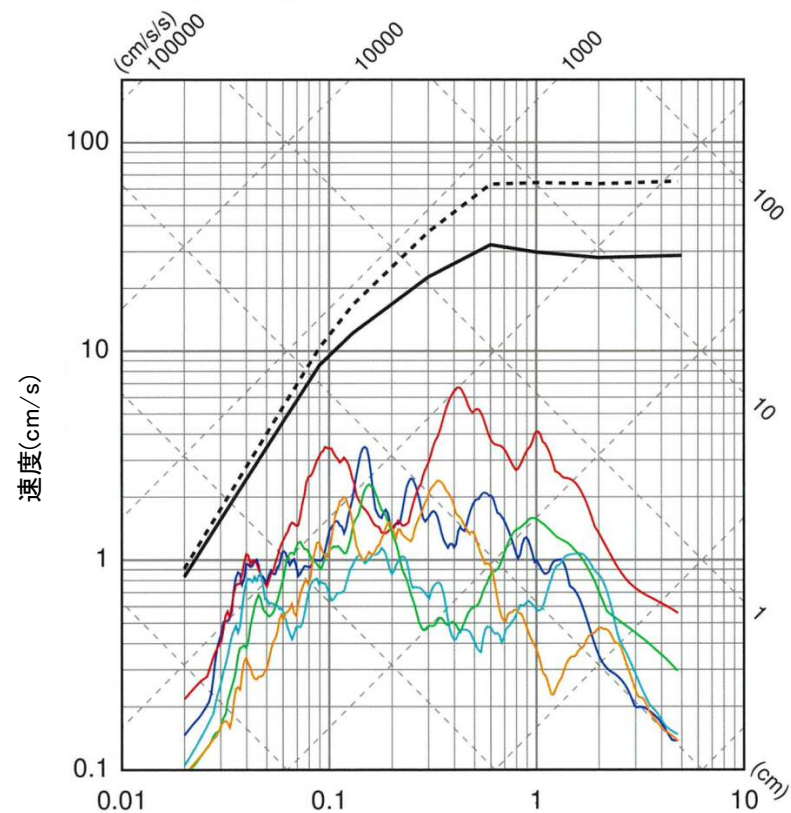
2011年和歌山県北部地震(観測記録)

■ K-NET観測点の観測記録は、すべて加藤ほか(2004)の応答スペクトルに包絡される。

- | | | |
|--|------------------------------------|--|
| --- 加藤ほか(2004)($V_s=0.7\text{km/s}$) | — WKY004($X=22.2\text{km}$)_EW | --- 加藤ほか(2004)($V_p=2.0\text{km/s}$) |
| — 加藤ほか(2004)($V_s=2.2\text{km/s}$) | --- WKY004($X=22.2\text{km}$)_NS | — 加藤ほか(2004)($V_p=4.2\text{km/s}$) |
| — WKY006($X=15.3\text{km}$)_EW | — WKY005($X=26.8\text{km}$)_EW | — WKY006($X=15.3\text{km}$)_UD |
| --- WKY006($X=15.3\text{km}$)_NS | --- WKY005($X=26.8\text{km}$)_NS | — WKY003($X=17.9\text{km}$)_UD |
| — WKY003($X=17.9\text{km}$)_EW | — WKY001($X=28.1\text{km}$)_EW | — WKY004($X=22.2\text{km}$)_UD |
| --- WKY003($X=17.9\text{km}$)_NS | --- WKY001($X=28.1\text{km}$)_NS | — WKY005($X=26.8\text{km}$)_UD |
| | | — WKY001($X=28.1\text{km}$)_UD |



周期(秒)
水平方向

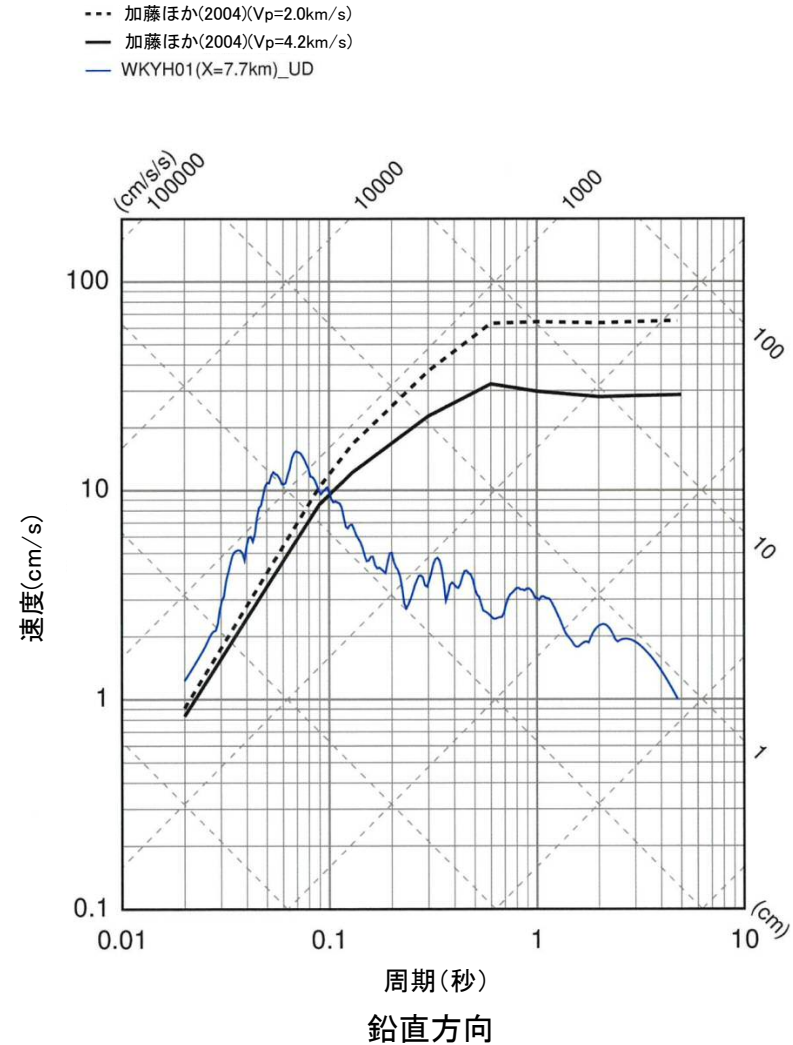
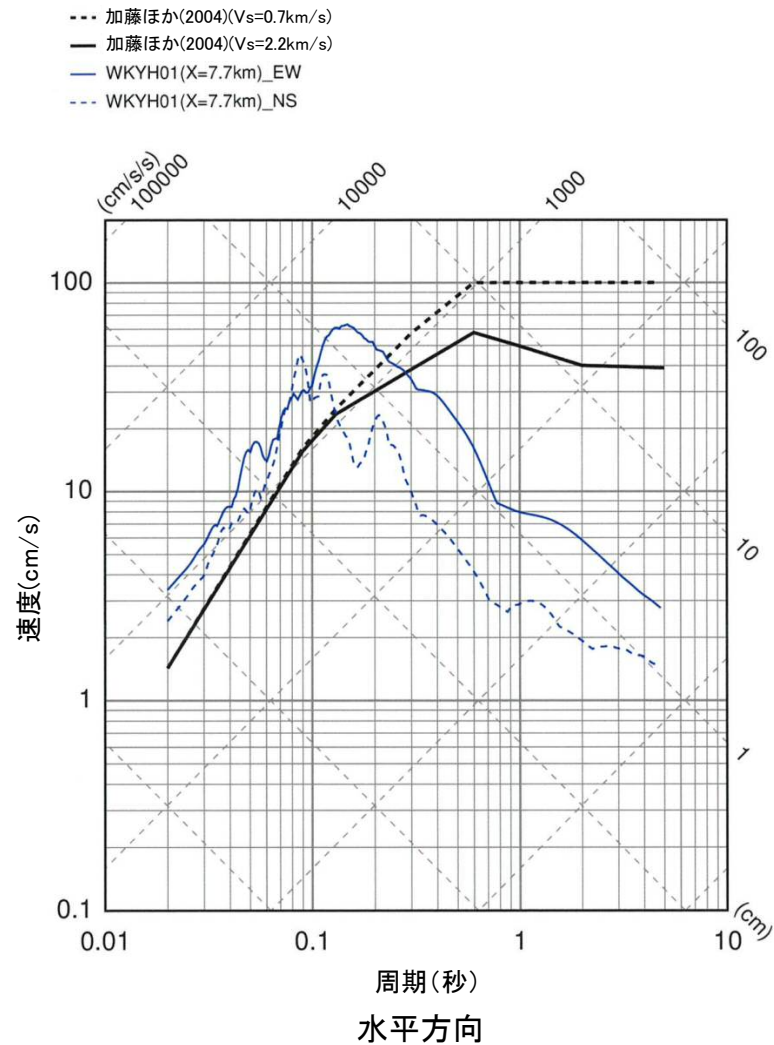


周期(秒)
鉛直方向

K-NET各観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2011年和歌山県北部地震(観測記録)

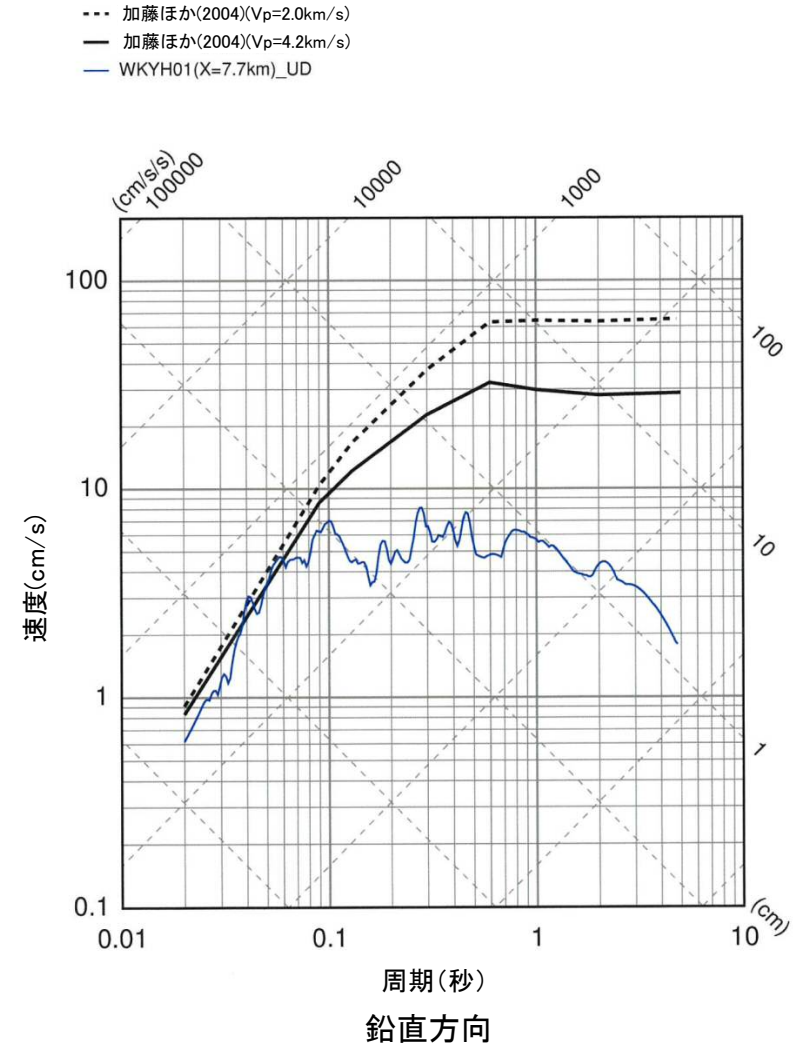
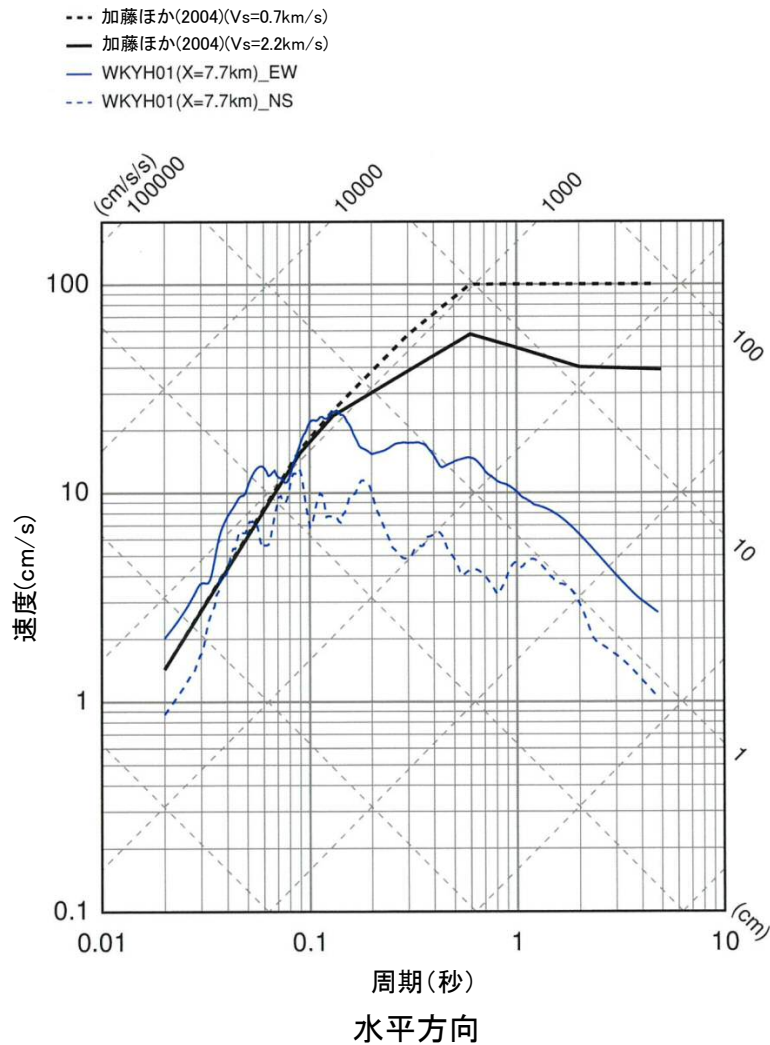
■ KiK-net観測点の地表観測記録のうち, WKYH01(広川)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを一部の周期で上回る。



KiK-net各観測記録(地表)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2011年和歌山県北部地震(観測記録)

■ KiK-net観測点の地中観測記録(地中×2)のうち, WKYH01(広川)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを一部の周期で上回る。



KiK-net各観測記録(地中×2)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

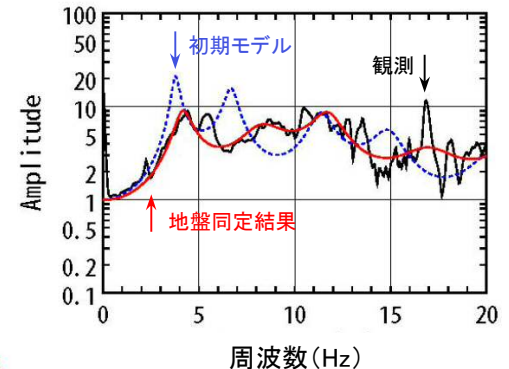
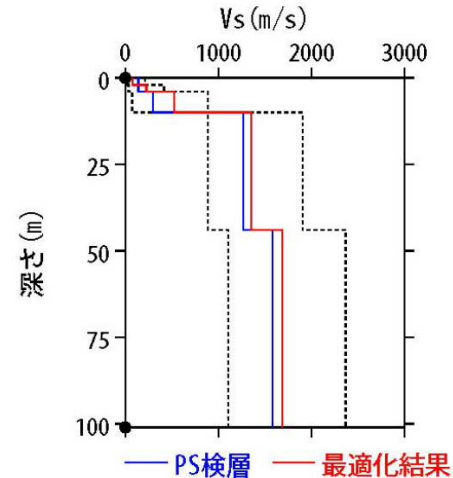
2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2011年和歌山県北部地震(はぎとり解析)

- WKYH01(広川)について, KiK-netボーリングデータを初期値として, 観測記録の伝達関数を再現できるように地盤同定を実施。
- 得られた地盤モデルは, PS検層結果から大きく乖離しているため, 1次元波動論によるはぎとり解析の適用が困難と考えられる。

地盤同定結果(水平方向)

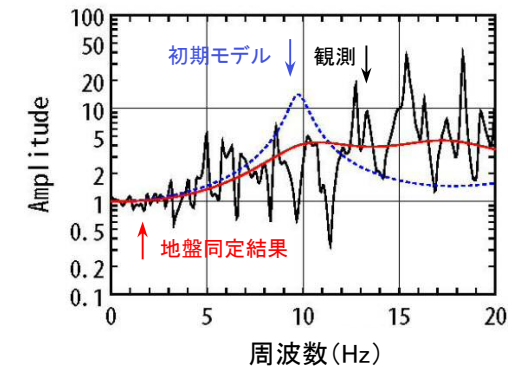
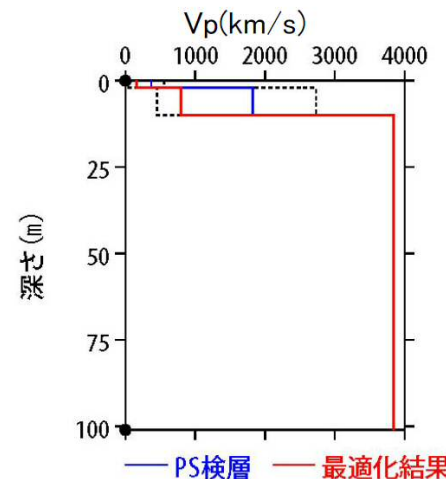
No	THK (m)	DEP (m)	Den (g/cm ³)	S波速度(m/s)					減衰定数	
				Initial	Lower	Upper	Optimized	Opt./Ini.	ho	α
1	2	0	1.64	139	14	209	78	0.56		
2	2	2	1.82	139	35	417	225	1.62	0.298	0.324
3	6	4	1.82	296	74	888	524	1.77		
4	34	10	2.37	1269	888	1904	1354	1.07		
5	57	44	2.37	1580	1106	2370	1686	1.07	0.284	0.715
6	—	101	2.37	1580	1106	2370	1686	1.07		



伝達関数の比較(水平方向)

地盤同定結果(鉛直方向)

No	THK (m)	DEP (m)	Den (g/cm ³)	P波速度(m/s)					減衰定数	
				Initial	Lower	Upper	Optimized	Opt./Ini.	ho	α
1	2	0	1.64	368	37	552	161	0.44		
2	2	2	1.82	1820	455	2730	798	0.44		
3	6	4	1.82	1820	455	2730	798	0.44		
4	34	10	2.37	3846	3846	3846	3846	1.00	1.000	0.590
5	57	44	2.37	3846	3846	3846	3846	1.00		
6	—	101	2.37	3846	3846	3846	3846	1.00		



伝達関数の比較(鉛直方向)

※電力共通研究「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震動評価手法の高度化に関する研究」にて検討を実施

2011年長野県北部地震(概要)

■ 概要(発生日時, 地震規模等)

- 地震発生日時(気象庁他)
 - 発生日時: 平成23年3月12日 03時59分頃
 - 地震規模: Mj6.7 (Mw6.2)
 - 震源深さ: 約8km
 - 震源位置: 北緯36.985°, 東経138.597°
- 各地の震度及び被害状況

各地の震度(気象庁)は以下のとおり。

 - 震度6強: 長野県 栄村
 - 震度6弱: 新潟県 十日町市, 津南町
 - 震度5強: 新潟県 上越市
 - 震度5弱: 長野県 野沢温泉村
 - 群馬県 中之条町
 - 新潟県 長岡市, 柏崎市, 出雲崎町, 湯沢町, 刈羽村, 南魚沼市

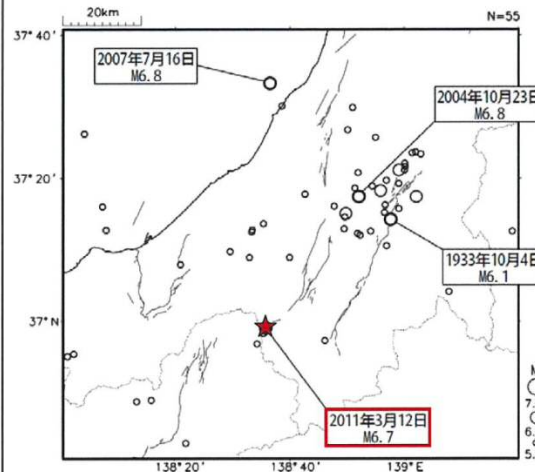
地震による津波の発生はなし

被害状況(気象庁)は以下のとおり。

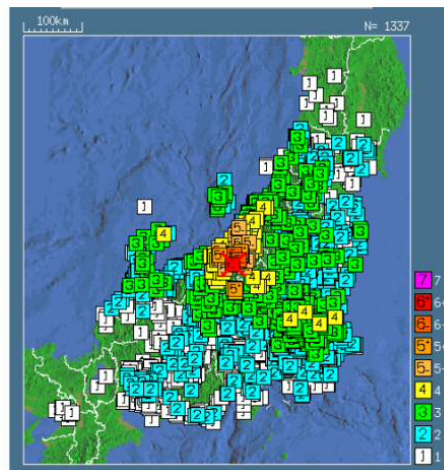
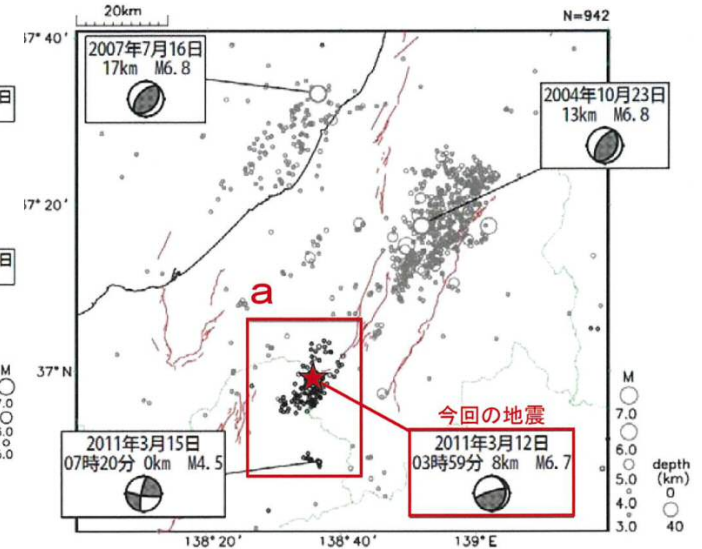
- 住宅全半壊及び一部破損: 1,324棟
- 負傷者57名(重傷者1名, 軽傷者56名)

- 地震発生メカニズム(気象庁)
 - 発震機構解より、北西-南東方向に圧力軸を持つ**逆断層型の地震**。
 - 1997年10月以降の活動を見ると、今回の地震の震源付近(領域a)では、M5.0以上の地震は発生していなかった。今回の地震の後、12日04時31分と05時42分に、長野県栄村で最大震度6弱を観測する余震が発生。

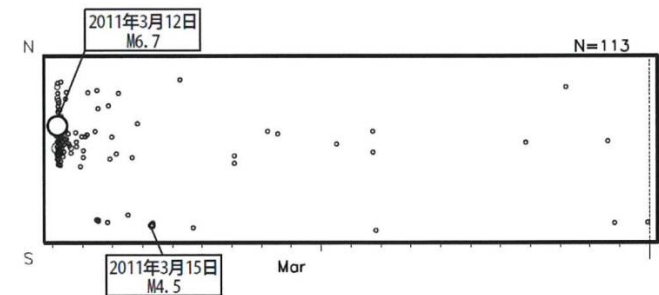
震央分布図
(1923年8月1日~2011年3月31日, 深さ0~40km, M≥5.0)



震央分布図
(1997年10月1日~2011年3月31日, 深さ0~40km, M≥3.0)
2011年3月以降の地震を濃く表示。



気象庁 震度データベースによる震度分布



領域a内の時空間分布図(南北投影)
(2011年3月12日~3月31日)

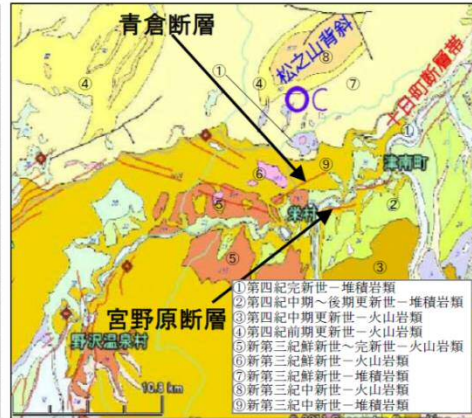
2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2011年長野県北部地震(震源周辺の地質構造)

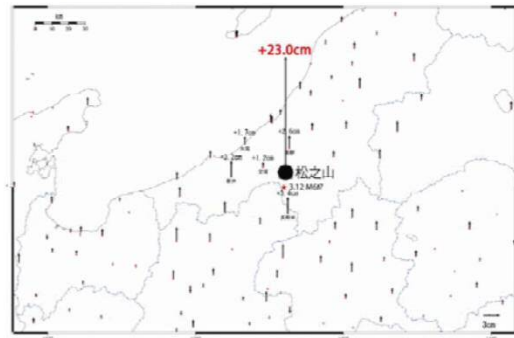
- 長野県北部地震の震源付近には、堆積岩類及び火山岩類(新第三紀中新世～第四紀完新世)が分布する。
- 震源付近には、十日町断層帯の西端に位置する宮野原断層、青倉断層があり、これらは活断層と推定されている。
- 震源断層は、北西-南東方向の圧縮軸を持つ南東傾斜の逆断層と見られている。また、余震の震源分布の投影図から、余震域の北東側と南西側では、断層面の傾斜が異なる可能性があると見られている。
- 余震分布の震源域の北端に、松之山背斜がほぼ一致することから、南東傾斜の断層は、松之山背斜と関連した断層構造である可能性が高いと想定されている。また、松之山が隆起した解釈とも調和的であり、地震によって松之山背斜が成長した可能性があると見られている。



長野県北部の主な地震

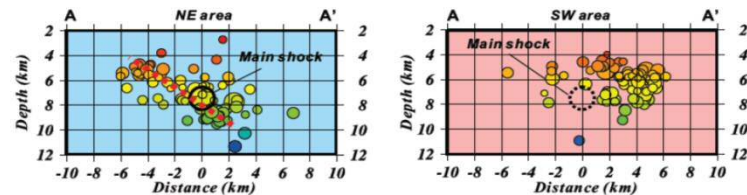
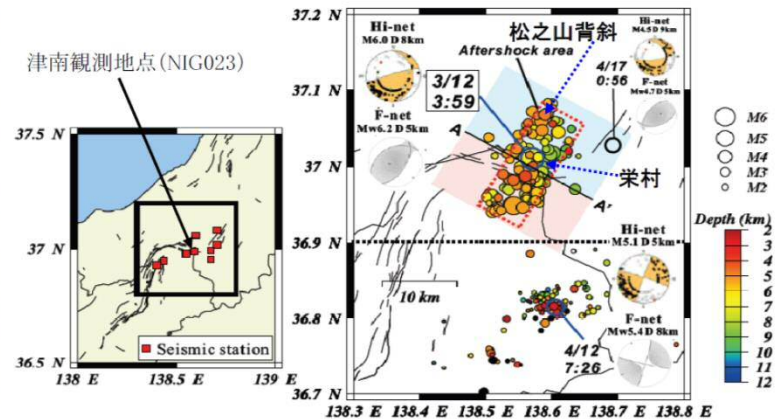


周辺地質図



長野県北部地震前後の上下方向の地殻変動

3月12日長野県北部の地震に伴う地変と栄村周辺地域の活断層 (廣内ほか, 2012) に加算



A-A'断面上に震源を投影した図(左:北東域, 右:南西域)

- ・稠密地震観測データを用いた解析により、本震の震源の深さは約8kmと推定。
- ・余震は、北北東-南南西方向に約17kmの広がり、深さ4~10kmに分布。
- ・余震域の北東側では、余震が南東傾斜の面状に分布するが、南西側ではその特徴が見られず、北東側と南西側では断層面の傾斜が異なる可能性。

3月12日長野県北部の地震と余震の震源分布図

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

2011年長野県北部地震(観測記録)

- 震源距離が30km以内の観測記録としては下表の10記録となる。
- このうち、震源近傍に位置するNIG023(津南)においては、最大加速度 703.7cm/s^2 が観測されており、司・翠川(1999)の距離減衰式の $+1\sigma$ を上回る。

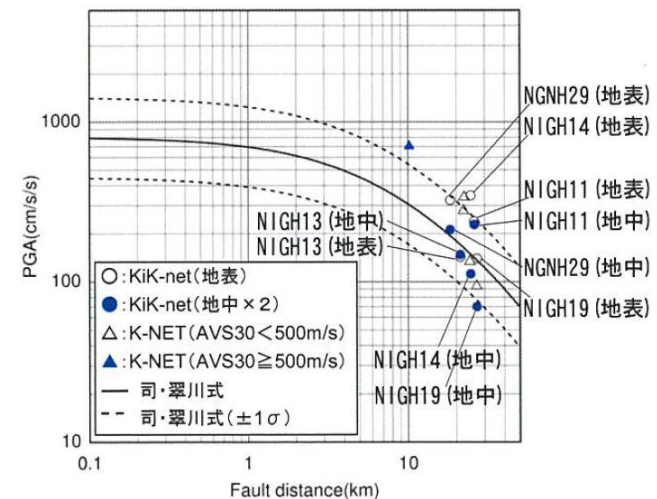
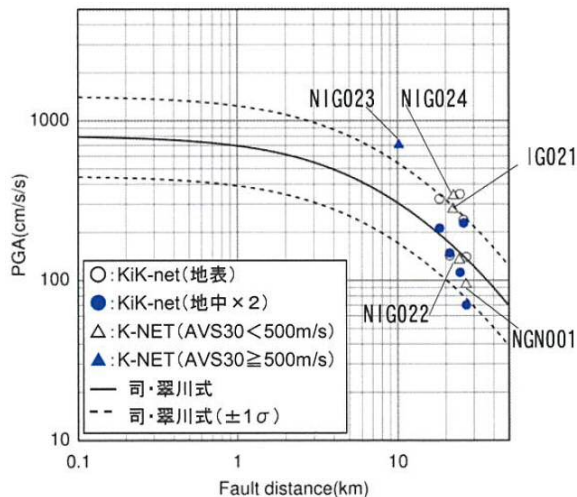
断層最短距離が30km以内の観測記録(K-NET)

観測点	震源距離(km)	AVS30(m/s)	最大加速度(cm/s^2)			
			水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)	
K-NET (地表)	NIG023 津南	10.2	579.5	535.7	703.7	316.2
	NIG021 十日町	22.2	418.8	277.9	248.5	125.5
	NIG024 安塚	22.4	340.2	337.5	216.8	113.0
	NIG022 塩沢	24.3	197.0	113.4	134.1	73.0
	NGN001 飯山	26.8	324.9	92.1	94.4	47.9

断層最短距離が30km以内の観測記録(KiK-net)

観測点	震源距離(km)	AVS30(m/s)	最大加速度(cm/s^2)※			
			水平(NS)	水平(EW)	鉛直(UD)	
KiK-net (地表・地中)	NGNH29 野沢温泉	18.3	464.9	279.5 (87.8)	323.8 (106.5)	259.1 (65.6)
	NIGH13 牧	21.2	461.1	143.1 (74.3)	135.9 (39.0)	69.6 (40.7)
	NIGH14 塩沢	24.6	437.6	300.0 (48.6)	346.1 (56.3)	149.0 (31.7)
	NIGH11 川西	25.9	375.0	238.5 (114.5)	158.4 (83.2)	90.6 (42.9)
	NIGH19 湯沢	26.9	625.0	139.8 (35.4)	127.3 (34.2)	70.5 (6.1)

※()の数値は地中記録を示す



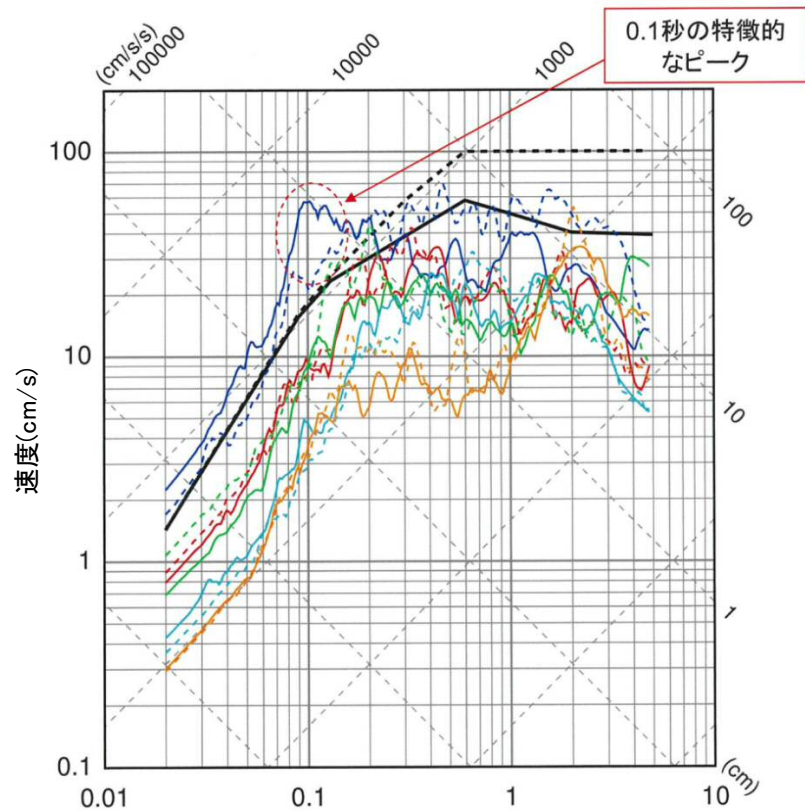
司・翠川(1999)の距離減衰式との関係

2011年長野県北部地震(観測記録)

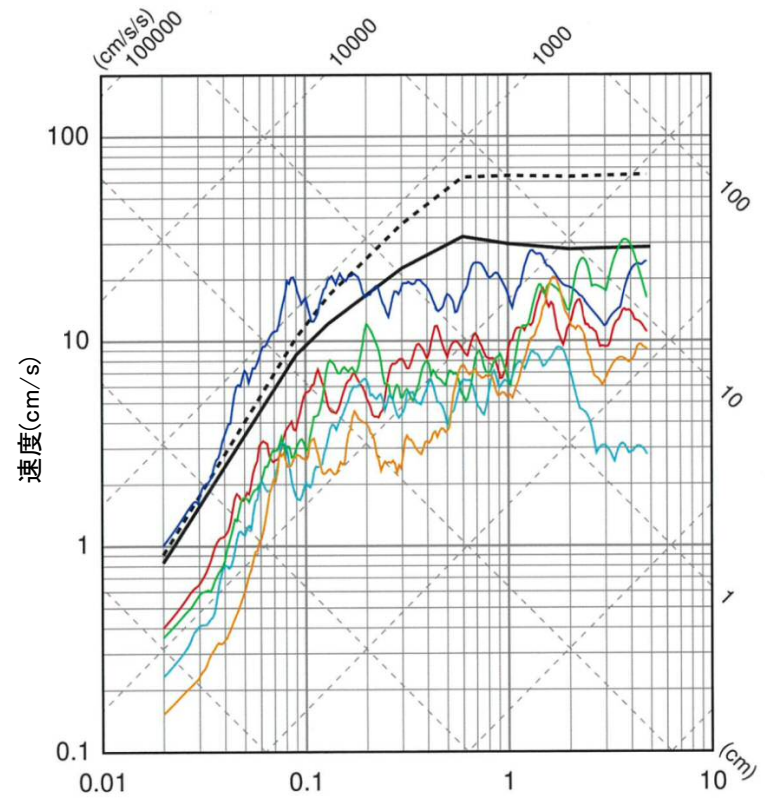
■ K-NET観測点の観測記録のうち, NIG023(津南)及びNIG024(安塚)の観測記録は, 加藤ほか(2004)の応答スペクトルを一部の周期で上回る。

- 加藤ほか(2004)($V_s=0.7\text{km/s}$)
- 加藤ほか(2004)($V_s=2.2\text{km/s}$)
- NIG023($X=10.2\text{km}$)_EW
- NIG023($X=10.2\text{km}$)_NS
- NIG021($X=22.2\text{km}$)_EW
- NIG021($X=22.2\text{km}$)_NS
- NIG024($X=22.4\text{km}$)_EW
- NIG024($X=22.4\text{km}$)_NS
- NIG022($X=24.3\text{km}$)_EW
- NIG022($X=24.3\text{km}$)_NS
- NGN001($X=26.8\text{km}$)_EW
- NGN001($X=26.8\text{km}$)_NS

- 加藤ほか(2004)($V_p=2.0\text{km/s}$)
- 加藤ほか(2004)($V_p=4.2\text{km/s}$)
- NIG023($X=10.2\text{km}$)_UD
- NIG021($X=22.2\text{km}$)_UD
- NIG024($X=22.4\text{km}$)_UD
- NIG022($X=24.3\text{km}$)_UD
- NGN001($X=26.8\text{km}$)_UD



周期(秒)
水平方向

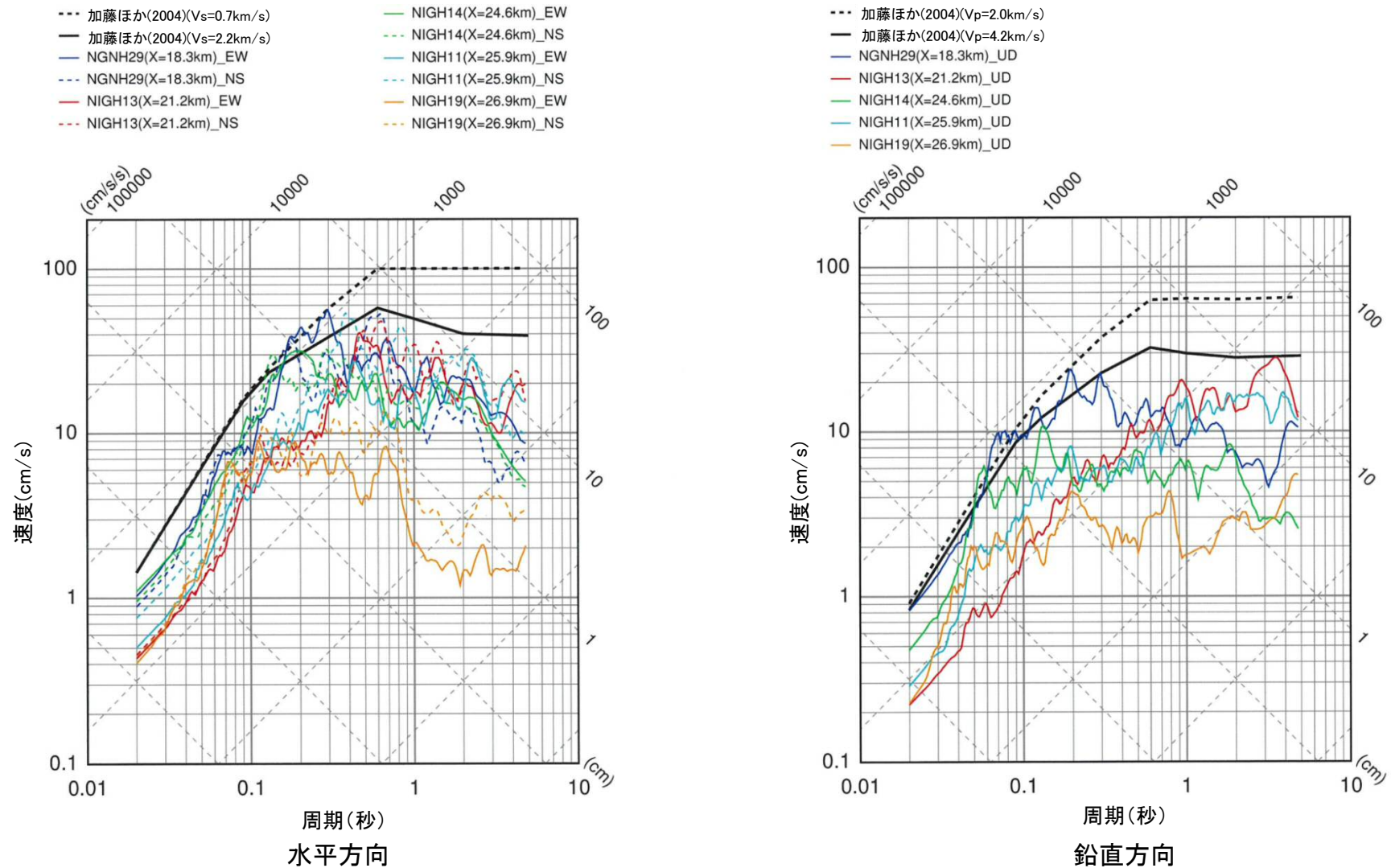


周期(秒)
鉛直方向

K-NET各観測記録の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2011年長野県北部地震(観測記録)

■ KiK-net観測点の地表観測記録のうち、NGNH29(野沢温泉)及びNIGH14(塩沢)の観測記録は、加藤ほか(2004)の応答スペクトルを一部の周期で上回る。

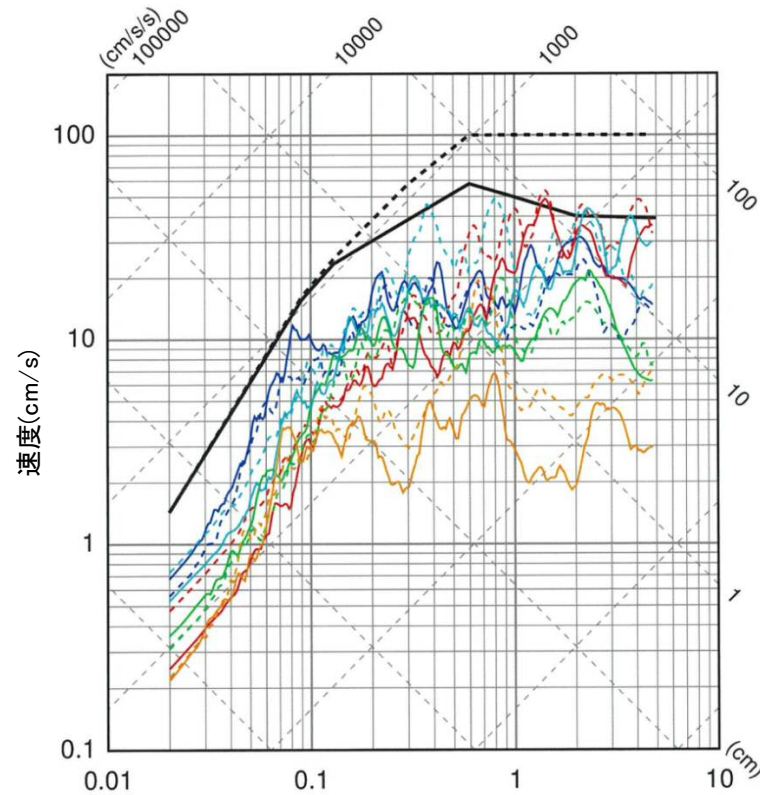


KiK-net各観測記録(地表)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

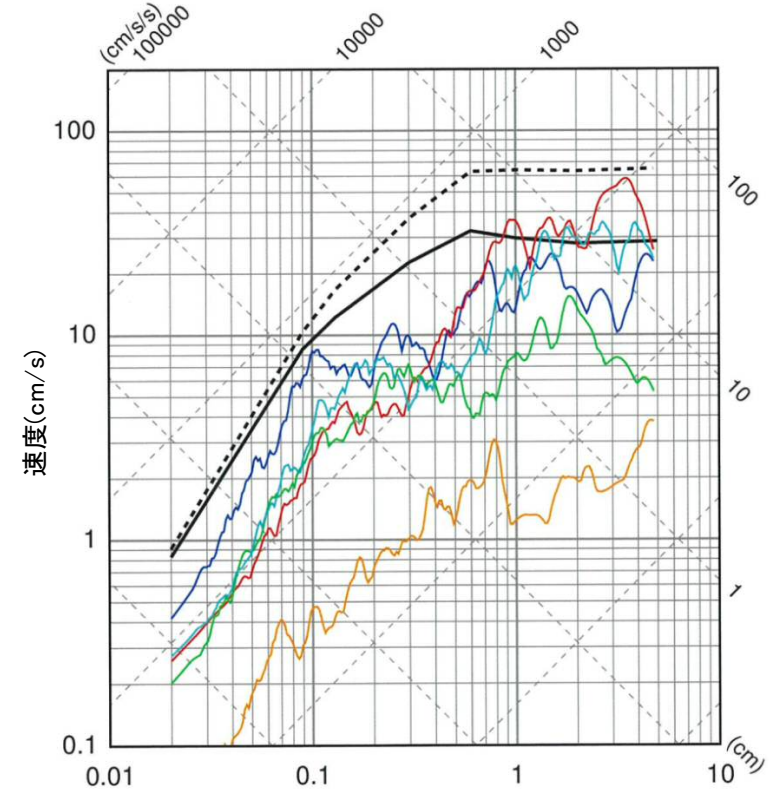
2011年長野県北部地震(観測記録)

■ KiK-net観測点の地中観測記録(地中×2)は、すべて加藤ほか(2004)の応答スペクトルに包絡される。

- | | | | |
|----------------------------|---------------------------|-----|------------------------|
| --- 加藤ほか(2004)(Vs=0.7km/s) | — NIGH14(X=24.6km)_EW | --- | 加藤ほか(2004)(Vp=2.0km/s) |
| — 加藤ほか(2004)(Vs=2.2km/s) | - - - NIGH14(X=24.6km)_NS | — | 加藤ほか(2004)(Vp=4.2km/s) |
| — NGNH29(X=18.3km)_EW | — NIGH11(X=25.9km)_EW | — | — NGNH29(X=18.3km)_UD |
| - - - NGNH29(X=18.3km)_NS | - - - NIGH11(X=25.9km)_NS | — | — NIGH13(X=21.2km)_UD |
| — NIGH13(X=21.2km)_EW | — NIGH19(X=26.9km)_EW | — | — NIGH14(X=24.6km)_UD |
| - - - NIGH13(X=21.2km)_NS | - - - NIGH19(X=26.9km)_NS | — | — NIGH11(X=25.9km)_UD |
| | | — | — NIGH19(X=26.9km)_UD |



周期(秒)
水平方向



周期(秒)
鉛直方向

KiK-net各観測記録(地中×2)の応答スペクトルと加藤ほか(2004)の応答スペクトルの比較

2011年長野県北部地震(はぎとり解析)

- NIG023(津南)の観測記録については、地盤情報が乏しいため、地盤モデルが構築できない。
- 上記に伴い、はぎとり解析による基盤地震動の評価ができない。
- 今後、各種調査により地盤情報の取得が必要である。

2. Mw6.5未満の地震(14地震)に関する検討

まとめ

■ Mw6.5未満の地震のうち、影響の大きい5地震について整理した結果を以下に示す。

		2004年 北海道留萌支庁南部地震	2013年 栃木県北部地震	2011年 和歌山県北部地震	2011年 茨城県北部地震	2011年 長野県北部地震
地盤モデル	使用モデル	・佐藤ほか(2013)のボーリング結果に基づく地盤モデル	・KiK-net観測記録に基づく地盤同定モデル	・KiK-net観測記録に基づく地盤同定モデル	・KiK-net観測記録に基づく地盤同定モデル	・地盤情報が少なく、地盤モデルを構築できない
	既往の知見との整合性	・微動探査による地盤データと整合 ・知見で指摘されている非線形性を考慮	・KiK-net地盤データと整合しない ・知見で指摘されている減衰、方位依存性の影響が不明	・KiK-net地盤データと整合しない ・知見で指摘されている減衰の影響が不明	・観測記録の伝達関数及びKiK-net地盤データと整合しない ・知見で指摘されている減衰の影響が不明	・地盤モデルに関する既往の知見がない
	更なる知見収集・検討事項	—	・地盤モデルの改良 ・知見で指摘されている特性に係るデータの取得と影響度合いの評価	・地盤モデルの改良 ・知見で指摘されている特性に係るデータの取得と影響度合いの評価	・地盤モデルの改良 ・知見で指摘されている特性に係るデータの取得と影響度合いの評価	・地質調査、微動探査等による地盤情報の取得
はざとり解析	解析手法	・非線形性を考慮した等価線形解析	・線形解析	・線形解析	・線形解析	・地盤モデルが構築できないため、解析できない
	精度	・観測記録と整合	・はざとり解析の適用性が不明	・はざとり解析の適用性が不明	・はざとり解析の適用性が不明	・はざとり解析の適用性が不明
	更なる知見収集・検討事項	—	・地表及び地中観測記録の再現解析	・地表及び地中観測記録の再現解析	・地表及び地中観測記録の再現解析	・地表観測記録の再現解析
結果の信頼性		○	×	×	×	×

まとめ

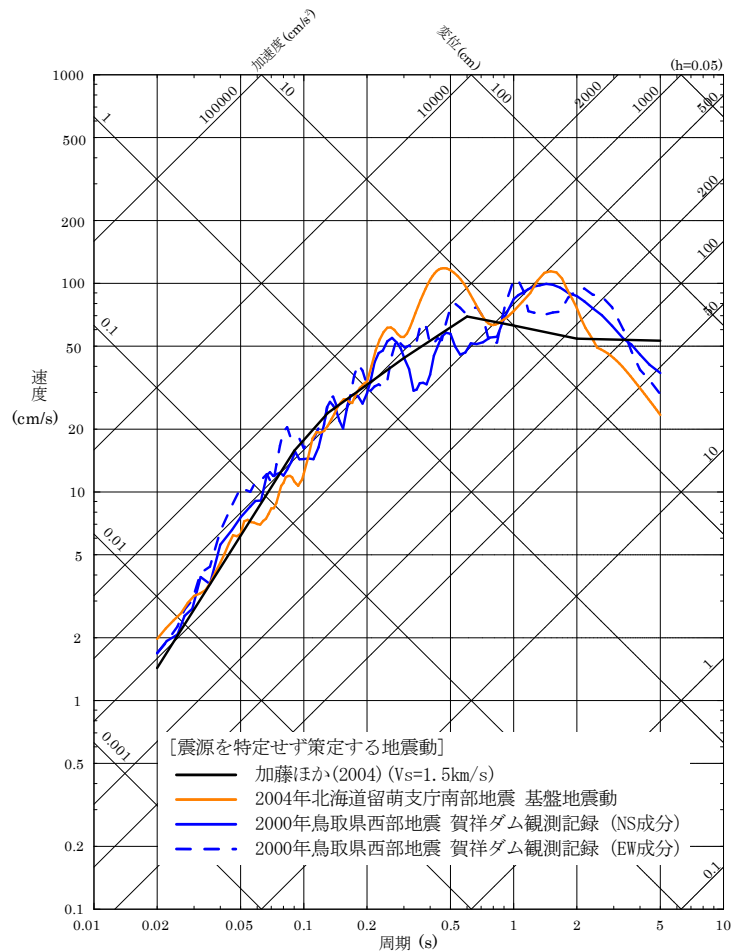
- Mw6.5未満の地震のうち、影響の大きい5地震について整理した結果、2004年北海道留萌支庁南部地震のHKD020(港町)の観測記録については、信頼性のある基盤地震動が評価できたと考えられることから、震源を特定せず策定する地震動として考慮する。
- 2013年栃木県北部地震のTCGH07(栗山西)、2011年和歌山県北部地震のWKYH01(広川)、2011年茨城県北部地震のIBRH13(高萩)の観測記録については、一次元波動論では信頼性のある地盤モデルが構築できず、はぎとり解析による基盤地震動の評価は困難と考えられ、更なる知見の収集、はぎとり解析等の検討が必要である。
- 2011年長野県北部地震のNIG023(津南)の観測記録については、地盤情報が乏しいため、地盤モデルが構築できず、はぎとり解析による基盤地震動の評価ができない。今後、各種調査により、地盤情報の取得が必要である。

3. 「震源を特定せず策定する地震動」の策定

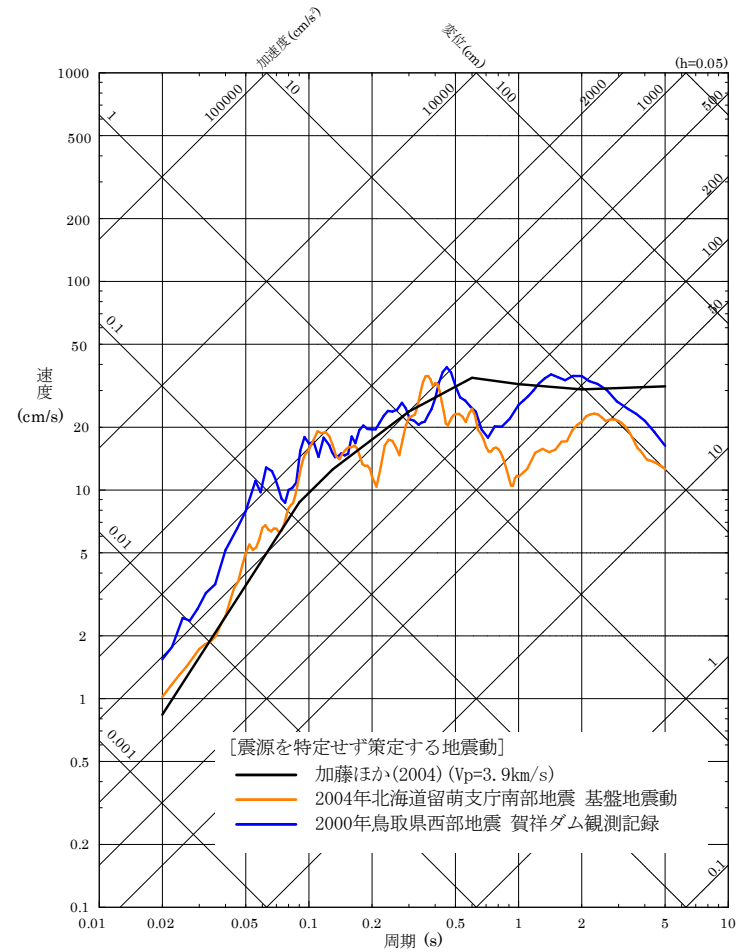
3. 「震源を特定せず策定する地震動」の策定

「震源を特定せず策定する地震動」の策定

- 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」に示されている16地震の各観測記録の分析結果に基づき、2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム(監査廊)の観測記録と、2004年北海道留萌支庁南部地震のHKD020(港町)の基盤地震動を、震源を特定せず策定する地震動として考慮する。



水平方向



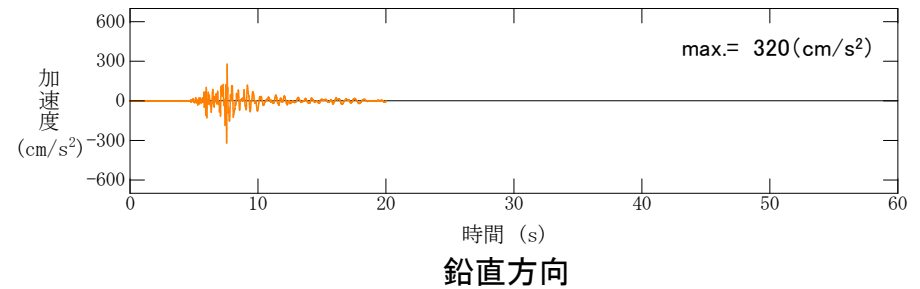
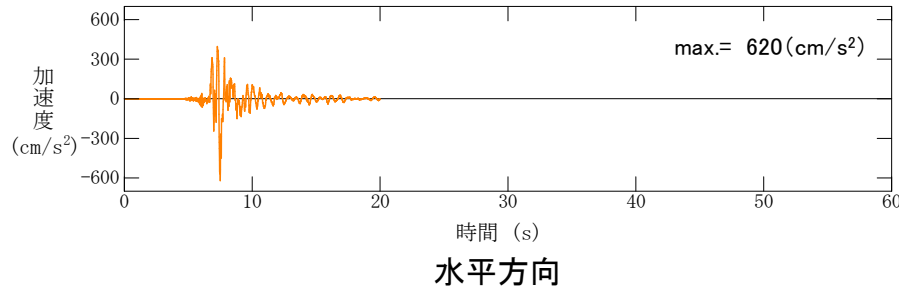
鉛直方向

震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトル

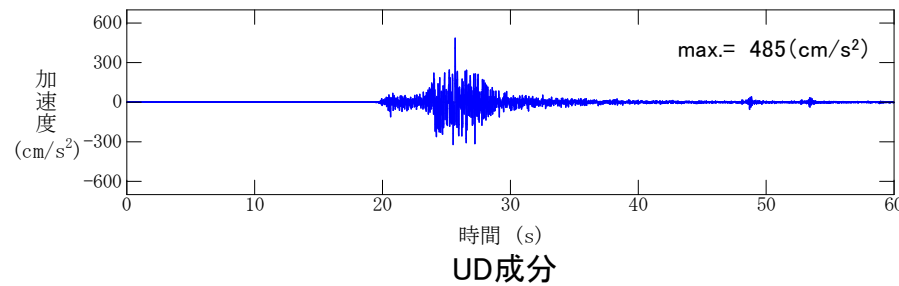
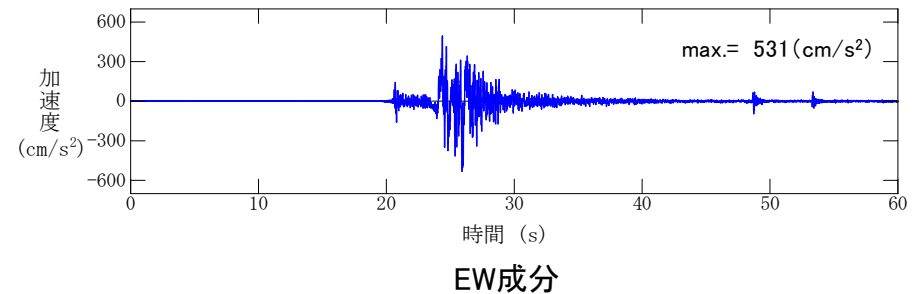
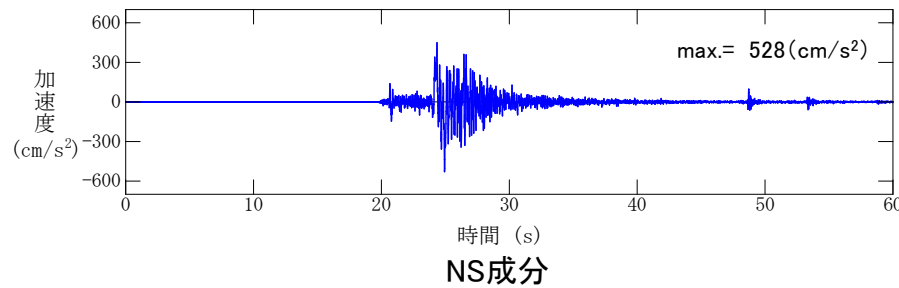
3. 「震源を特定せず策定する地震動」の策定

「震源を特定せず策定する地震動」の策定

■ 加速度時刻歴波形



2004年北海道留萌支庁南部地震のHKD020(港町)の基盤地震動



2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム(監査廊)の観測記録

今後の取り組み

- 2004年北海道留萌支庁南部地震のHKD020(港町)の観測記録については、信頼性のある基盤地震動が評価できたと考えられるが、現在ボーリング等の調査データの整理とそれらを踏まえたはざとり計算に係る検討が進められているところであり、今後もそれらの検討結果を踏まえて基盤地震動の評価の信頼性向上に努める。
- 2013年栃木県北部地震のTCGH07(栗山西)、2011年和歌山県北部地震のWKYH01(広川)、2011年茨城県北部地震のIBRH13(高萩)の観測記録については、一次元波動論による信頼性のある地盤モデルが構築できていないことから、今後更なる知見の収集、はざとり解析等の検討を進め、信頼性の高い基盤地震動の算定を試みる。
- 2011年長野県北部地震のNIG023(津南)の観測記録については、地盤情報が乏しいため、地盤モデルが構築できていないことから、今後各種調査により、地盤情報の取得に努める。

- (1) 気象庁:震度データベース <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>
- (2) 気象庁:平成20年6月 地震・火山月報(防災編), 特集「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震」について
- (3) 消防庁:災害情報 <http://www.fdma.go.jp>
- (4) 北村信(1965):5万分の1地質図幅「焼石岳」及び説明書.地質調査総合センター(旧地質調査所)
- (5) 鹿野和彦・吉田史郎(1985):境港地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所
- (6) 鹿野和彦・中野俊(1986):恵曇地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所
- (7) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編)(2012):20万分の1日本シームレス地質図
- (8) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編)(2012):20万分の1日本シームレス地質図データベース(2012年7月3日版).産業技術総合研究所 研究情報公開データベースDB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター <https://gbank.gsj.jp/seamless/legend.html>
- (9) 染井ほか(2010):ひずみ集中帯内外で発生した地殻内地震系列間の震源特性の比較, 第13回日本地震工学シンポジウム
- (10) 垣見俊弘・松田時彦・相田勇・衣笠善博(2003):日本列島と周辺海域の地震地体構造区分, 地震, 第2輯, 第55巻, pp.389-406.
- (11) 原子力発電環境整備機構(2004):概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, NUMO-TR-04-02
- (12) 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊1わが国の地質環境
- (13) 気象庁:平成12年10月 地震・火山月報(防災編), 特集2.平成12年(2000年)鳥取県西部地震
- (14) 地震調査研究推進本部:平成12年(2000年)鳥取県西部の地震 <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/00oct3/p05.htm>
- (15) Kanno,T.・A.Narita・N.Morikawa・H.Fujiwara・Y.Fukushima(2006):A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.96, No.3, pp.879-897.
- (16) 地震調査研究推進本部(2002):鳥取県西部地震の観測記録を利用した強震動評価手法の検証について, 平成14年10月31日
- (17) 防災科学技術研究所:強震観測網(K-NET, KiK-net) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/search/main.shtml>
- (18) 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男(2004):震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 2004, pp.46-86.
- (19) 国土技術政策総合研究所:国総研資料 第733号 <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0733.htm>

- (20) 永野正行・加藤研一・武村雅之(2001):2000年鳥取県西部地震時の震源断層近傍における基盤地震動の推定-1995年兵庫県南部地震との比較-, 日本建築学会構造系論文集, 第550号, 2001年12月, pp.39-46.
- (21) 山田有孝・三浦賢治(2002):特性曲線法を用いた2000年鳥取県西部地震の地盤震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第558号, 2002年8月, pp.77-83.
- (22) 笠原敬司・岡田義光・山本明(2000):Hi-net(2)地震観測施設の整備, 日本地震学会講演予稿集, 2000年秋季大会, P005.
- (23) 日比野浩・吉村智昭・内山泰生・前田寿朗・倉内信幸(2003):KiK-net日野における観測小屋の影響を考慮した鳥取県西部地震の基盤地震動評価 その1 微動観測および地震観測から評価した観測小屋の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003年9月, pp.165-166.
- (24) 中道聡・川瀬博(2001):2000年10月6日鳥取県西部地震で観測されたTTRH02(日野)の強震記録における表層地盤による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001年9月, pp.153-154.
- (25) 山添正稔・加藤研一・山田有孝・武村雅之(2004):KiK-net伯太および日野地点の地盤構造の推定と2000年鳥取県西部地震時の基盤地震動の再評価, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 2004, pp.107-125.
- (26) 国土技術政策総合研究所:国総研資料 第734号 <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0734.htm>
- (27) 地震調査研究推進本部:留萌支庁南部の地震活動 http://www.jishin.go.jp/main/chousa/major_act/act_2004.htm#a20041214
- (28) 司宏俊・翠川三郎(1999):断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第523号, pp.63-70.
- (29) 佐藤浩章・芝良昭・東貞成・功刀卓・前田宜浩・藤原広行(2013):物理探査・室内試験に基づく2004年留萌支庁南部の地震によるK-NET港町観測点(HKD020)の基盤地震動とサイト特性評価, 電力中央研究所, 平成25年12月
- (30) 笹谷努・前田宜浩・高井伸雄・重藤迪子・堀田淳・関克郎・野本真吾(2008):Mj6.1 内陸地殻内地震によって大加速度を観測したK-NET(HKD020)地点でのS波速度構造の推定, 物理探査学会第119回, 学術講演会講演論文集, pp.25-27.
- (31) 狐崎長琅・後藤典俊・小林芳正・井川猛・堀家正則・斉藤徳美・黒田徹・山根一修・奥住宏一(1990):地震動予測のための深層地盤P・S波速度の推定, 自然災害科学, Vol.9, No.3, 1990, pp.1-17.
- (32) 安田進・山口勇(1985):種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542.
- (33) 今津雅紀・福武毅芳(1986):動的変形特性のデータ処理に関する一考察, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.533-536.
- (34) 気象庁:平成25年2月 地震・火山月報(防災編), 2月25日 栃木県北部の地震, pp.25-26.

- (35) 引間和人(2013): スペクトルインバージョンを用いた2013年2月栃木県北部地震の震源域におけるサイト・伝播特性に関する検討, 日本地震工学会・大会-2013梗概集, pp.335-336.
- (36) 気象庁: 平成23年3月 地震・火山月報(防災編), 3月11日からの茨城県北部から福島県浜通りにかけての地震活動, pp.21
- (37) 青柳恭平・上田圭一(2012): 2011年東北地方太平洋沖地震による阿武隈南部の正断層型誘発地震の特徴 —臨時余震観測に基づく震源分布と速度—, 電力中央研究所, 平成24年4月
- (38) 気象庁: 平成23年7月 地震・火山月報(防災編), 7月5日からの和歌山県北部の地震活動, pp.33.
- (39) 防災わかやま: 平成25年度和歌山県防災計画 <http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/bousai/plan/plan1.html>
- (40) 気象庁: 平成23年3月 地震・火山月報(防災編), 特集2.3月12日の長野県・新潟県県境付近の地震, pp.149-167.
- (41) 廣内大助・松多信尚・杉戸信彦・竹下欣宏(2012): 3月12日長野県北部の地震に伴う地変と栄村周辺地域の活断層, 長野県北部地震災害調査研究報告書. 信州大学山岳科学総合研究所, 2012, pp.9-15.