

# 港湾・空港分野で用いられている サイトスペシフィックな設計地震動について

港湾空港技術研究所 野津 厚

[nozu@p.mpat.go.jp](mailto:nozu@p.mpat.go.jp)

謝辞：防災科学技術研究所および気象庁の強震記録を利用しています。心より御礼申し上げます。

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 歴史地震・被害地震（4件）

21140

今村式二倍強震計の記録から推定した東京本郷における1923年関東地震の地動

○片岡俊一（弘前大）・早川崇・佐藤俊明・宮腰淳一・岡田敬一

21141

1923年関東地震の相模湾の余震（Mj6.5）のCMT

○早川崇（清水建設）・片岡俊一・佐藤俊明・岡田敬一・宮腰淳一

21142

シンプルな断層モデルを用いた2023年トルコ・シリア地震(Mw7.8)のシミュレーション

○長坂陽介（港湾空港技研）・野津厚

21143

2023年トルコ・シリア地震(Mw7.5)の破壊形態に着目した断層近傍の理論地震動評価

○金山聖（東京理科大）・永野正行

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 震源特性・震源モデル(1) (6件)

21150

富岳を用いた大規模地震動計算によるVerification－現実的な地盤構造における多重点震源のベンチマークテスト－

○小林広明（小堀鐸二研究所）・渡辺哲史・笠松健太郎・加藤研一・縣亮一郎・廣部紗也子・日吉善久・堀高峰

21151

経験的グリーン関数法に基づく日向灘のM7クラスの4地震の特性化震源モデル

○佐藤智美（清水建設）

21152

2014年伊予灘地震(MW 6.3)の破壊過程の複雑性を考慮した震源モデル

○郭雨佳（大崎総合研究所）・宮腰研・塩田哲生・木戸智之・宮腰淳一・藤原広行

21153

震源特性・地震発生層の上端深さに着目した2008年岩手・宮城内陸地震時に観測された大加速度記録の再現 その1：東傾斜共役セグメントを考慮した特性化震源モデルの構築

○小山龍二（東京電力ホールディングス）・岩井徹・田中信也・貴堂峻至・新井健介・鳥田晴彦

21154

震源特性・地震発生層の上端深さに着目した2008年岩手・宮城内陸地震時に観測された大加速度記録の再現 その2：共役セグメントの有無及びSMGA上端深さの違いによる影響検討

○貴堂峻至（大崎総合研究所）・新井健介・鳥田晴彦・小山龍二・岩井徹・田中信也

21155

エンベロープインバージョンによる2024年8月8日の日向灘地震の震源モデルの推定

○友澤裕介（鹿島建設）・山口純輝・引田智樹・坂敏秀

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 震源特性・震源モデル(2) (6件)

21156

強震動生成域及び破壊開始点の配置方法に関する検討

○中西航大（大阪大）・川辺秀憲

21157

観測点配置が震源インバージョン解析結果に及ぼす影響に関する基礎的検討

○小穴温子（清水建設）・宮腰研・関口春子

21158

地震動予測時のアスペリティの設定の高度化に向けた波形インバージョンによる断層モデルの分析

○大島光貴（清水建設）

21159

長周期地震動に対する震源特性の感度解析

○西本昌（大成建設）・山本優・五十嵐さやか・内山泰生・糸井達哉

21160

断層すべり角の不確定性を考慮した地震動強さの確率分布

○前川利雄（熊谷組）・久田嘉章

21161

和歌山平野における中央構造線断層帯の強震動予測 —強震動生成域及び破壊開始点の位置が強震動予測結果に与える影響の評価—

○濱山翔（大阪大）・川辺秀憲

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 断層・動力学モデル（6件）

21162

日本の内陸地殻内地震に対する地表地震断層出現率のロジスティック回帰モデル

○加藤研一（小堀鐸二研究所）・渡辺哲史・高橋容之・野尻揮一郎

21163

動力学モデルによる地表地震断層が破壊された地震の破壊挙動の検討

○津田健一（清水建設）・宮腰淳一・岩田直樹・種翔太郎

21164

動的破壊シミュレーションを用いた地表断層変位分布の再現性に基づく震源モデルの評価

○栗山雅之（電力中央研究所）・佐藤浩章

21165

内陸地殻内地震における応力降下量とすべり分布との関係に関する動力学的検討（その1）横ずれ断層の場合

○潮崎歩乃香（熊本大）・矢野賢太郎・壇一男

21166

内陸地殻内地震における応力降下量とすべり分布との関係に関する動力学的研究（その2）逆断層の場合

○矢野賢太郎（熊本大）・潮崎歩乃香・壇一男

21167

数値シミュレーションに基づく浅部すべりを考慮した断層近傍地震動強さの分布性状の検討

○本田栄（竹中工務店）・佐藤吉之

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 地震波伝播・減衰（6件）

221168

九州地域における幾何減衰項の係数の特性（その1）－観測記録に基づく二重スペクトル比法による評価－

○阿部空弥（九州電力）・浦田悠貴・元木健太郎・加藤研一

21169

九州地域における幾何減衰項の係数の特性（その2）数値シミュレーション解析に基づく一考察

○元木健太郎（小堀鐸二研究所）・加藤研一・阿部空弥・浦田悠貴

21170

Estimation of 3-D attenuation structure in northeast Japan based on integrated land and seafloor strong-motion data

○Yadab Dhakal（NIED）・Takashi Kunugi・Shin Aoi

21171

地震動のP波部水平/上下スペクトル比の逆解析による地盤Q値の推定精度に関する検討（その2）

○佐藤吉之（竹中工務店）・久家英夫

21172

コーダ部から得られる長周期成分のQ値と地盤モデルのQ値との関係に関する検討

○梅田尚子（竹中工務店）・本田栄・佐藤吉之

21173

日向灘周辺で発生した地震により東京湾岸で観測された長周期地震動

○植竹富一（東京電力ホールディングス）

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 地震波伝播・減衰（2件）

21174

関東平野の波動伝播に関するWave Gradiometry法の適用 2024年能登半島地震のシミュレーションへの適用

○山本優（大成建設）・西本昌・八木勇治・日吉善久・堀高峰

21175

想定南海トラフ巨大地震による大阪堆積盆地におけるレーリー波とラブ波の時空間分布の定量評価

○上林宏敏（京都大）・関口春子

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 到来方向・異方性（5件）

21176

令和6年能登半島地震において大振幅地震動を観測したK-NET富来の到来方向依存

○赤羽日向（小堀鐸二研究所）・元木健太郎

21177

地表/地中スペクトル比の地震波到来方向による変動に関する検討

○青木雅嗣（大成建設）・山本優・徳光亮一・内山泰生・高井伸雄

21178

地震動スペクトルモデルにおける震源放射異方性の基礎的検討

○池浦友則（鹿島建設）

21179

3次元差分法を用いた大阪平野内のあとゆれの生成場所に関する検討

○井手希（大阪大）・川辺秀憲

21180

エネルギーfluxを用いた3次元有限差分法における地震波伝播方向の可視化

○杉山充樹（大林組）

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 表層地盤・非線形（6件）

221181

地盤の非線形性を考慮した微動H/Vスペクトル比による擬似地盤增幅率に基づく地震動強さの推定

○鈴木海渡（大成建設）・三浦弘之・神野達夫・重藤迪子・阿比留哲生

21182

Shallow-Soil Response Prediction for Noto Peninsula Earthquakes

○八木茂治（旭化成ホームズ）・飯星力・藤原広行・森川信之・先名重樹

21183

2024年能登半島地震の珠洲・輪島における地盤增幅特性と本震時の非線形化

○川瀬博（日本建築総合試験所）・仲野健一・伊藤恵理

21184

逐次非線形解析によるはぎとり解析－伏木富山港の場合

○野津厚（港湾空港技研）

21185

地盤のひずみ軟化特性と弱層が地震応答特性に与える影響に関する検討

○王博涵（竹中工務店）・井上修作

21186

表層地盤の不均質性と地震動の空間変動特性の関係（その1）実地盤の不均質性の調査

○田子彰大（JFEシビル）・徳光亮一・青木雅嗣・山本優・内山泰生・大野晋

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 表層地盤・非線形（3件）

21187

表層地盤の不均質性と地震動の空間変動特性の関係（その2）隣接地点間における地震動の空間変動の評価

○徳光亮一（大成建設）・青木雅嗣・山本優・内山泰生・田子彰大・大野晋

21188

地盤の非線形性を考慮した3次元差分法の堆積盆地状地盤への適用

○増山喜朗（東京理科大）・中川博人・永野正行

21189

深度センサーと箱庭型砂場を活用した防災教材の開発

○護雅史（名古屋大）・桂川陽佳

# 今年の日本建築学会大会のプログラムより地震動関連の発表

## 不整形地盤・地下構造（5件）

21190

KiK-net一関西観測点（IWTH25）の深部地盤構造に基づく地震動特性の検討 その2：深部地盤のS波速度構造の推定

○佐藤浩章（電力中央研究所）・東貞成・栗山雅之

21191

KiK-net一関西観測点（IWTH25）の深部地盤構造に基づく地震動特性の検討 その3：深部地盤モデルのS波速度の更新と波動場の試算

○東貞成（電力中央研究所）・佐藤浩章

21192

令和6年能登半島地震における長周期地震動シミュレーションによる3次元不整形の影響分析

○吉田昌平（大崎総合研究所）・宮腰研・郭雨佳・日吉善久・堀高峰

21193

令和6年能登半島地震(Mj7.6)時の長周期地震動シミュレーションと新潟県沿岸部における地盤增幅特性と海域の影響

○三好優人（東京理科大）・永野正行

21194

2024年能登半島地震の余震の地震動シミュレーションを用いた能登周辺地域の地下構造モデルの評価

○野田将矢（大阪大）・川辺秀憲

地震動関係だけで49件の発表！

★地震動研究において我々土木分野は建築分野に、質はともかくとして少なくとも量的には圧倒的に負けている。

→なぜそうなったか？

→道示スペクトルの存在が大きいと思われる。

★ただ、港湾・空港分野では少し状況が異なっており、土木学会第3次提言の影響などもあり、震源特性やサイト特性の影響を考慮したサイトスペシフィックな設計地震動が2007年頃から日常的に利用されている。

★「最前線」という触れ込みで話すのはおこがましいが、港湾・空港分野と関わりの少ない方にとっては馴染みのない話であると思われるため、この機会を借りて紹介したい。

★他の分野でも、例えば被害を受けた施設の分析などに、同様の技術が活用できる可能性がある。

★本発表により、地震動に興味を持つ方や、地震動研究の成果の応用について考えて下さる方が一人でも増えれば有り難いと考えている。

# 『港湾の施設の技術上の基準・同解説』



(※)英語版は無償で入手できる。

Technical Standards and Commentaries for Port Facilities (English version)

<https://ocdi.or.jp/en/download4/>

(※)空港土木施設については「空港土木施設設計要領(耐震設計編)」

<https://www.mlit.go.jp/common/001283923.pdf>

## 目 次

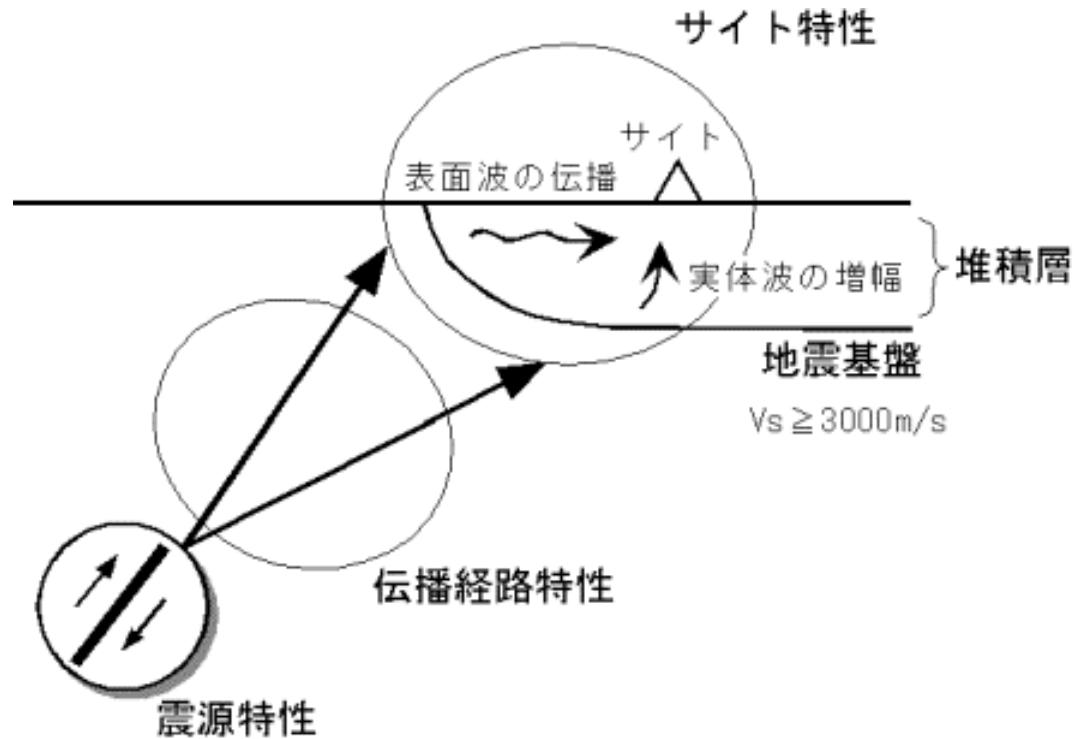
1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

## 目 次

1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

# 地震動に影響を及ぼす要因

- 震源特性
- 伝播経路特性
- サイト特性

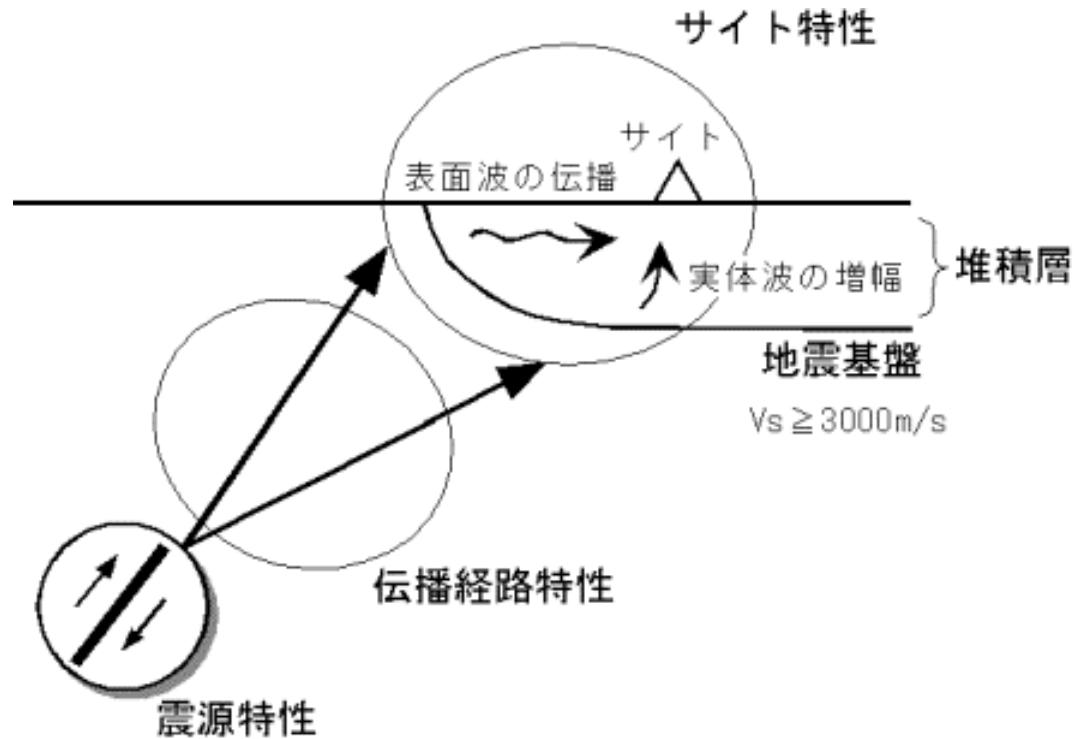


# 地震動に影響を及ぼす要因

- 震源特性

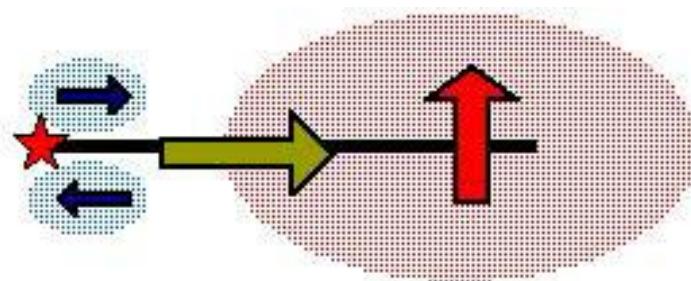
- 伝播経路特性

- サイト特性

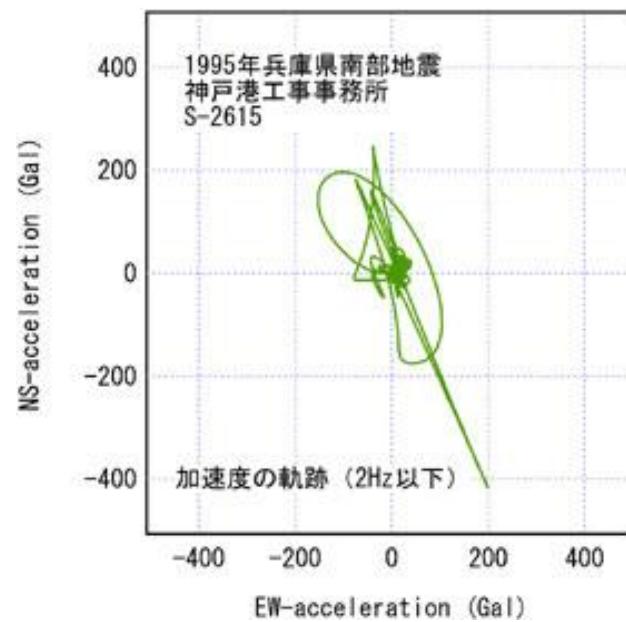
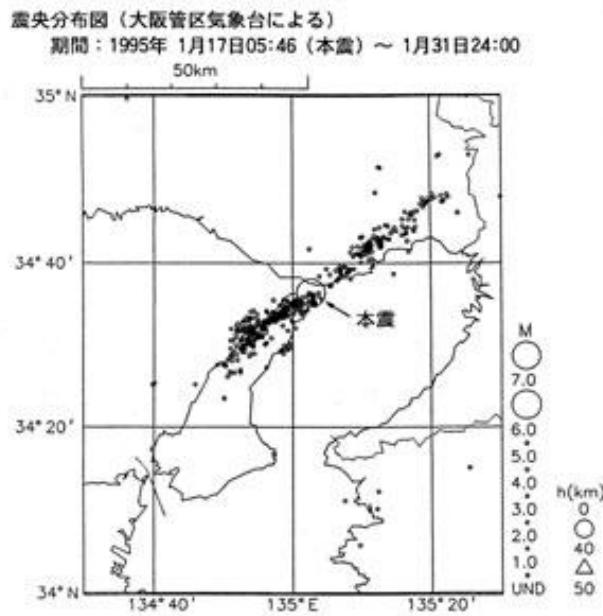


# ディレクティヴィティー(指向性)

- 破壊開始点付近よりも破壊の終端付近の方が揺れが強い。

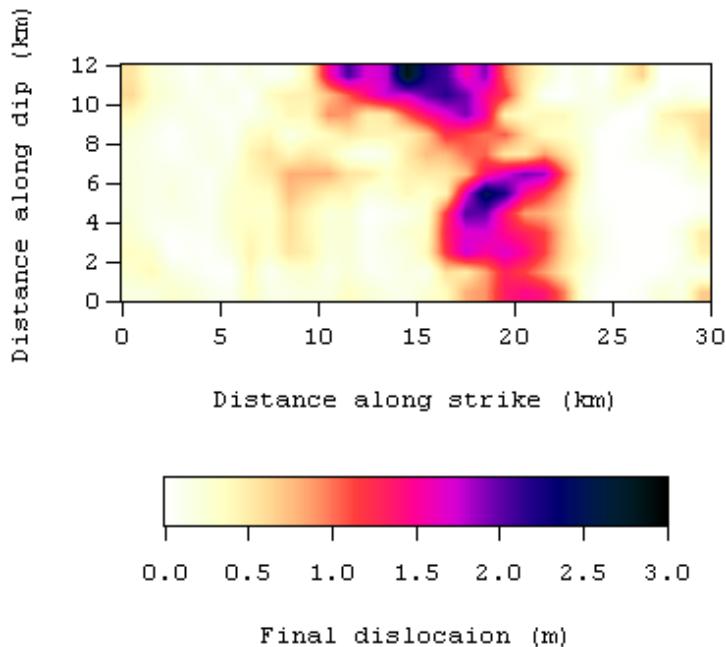


*Unilateral*

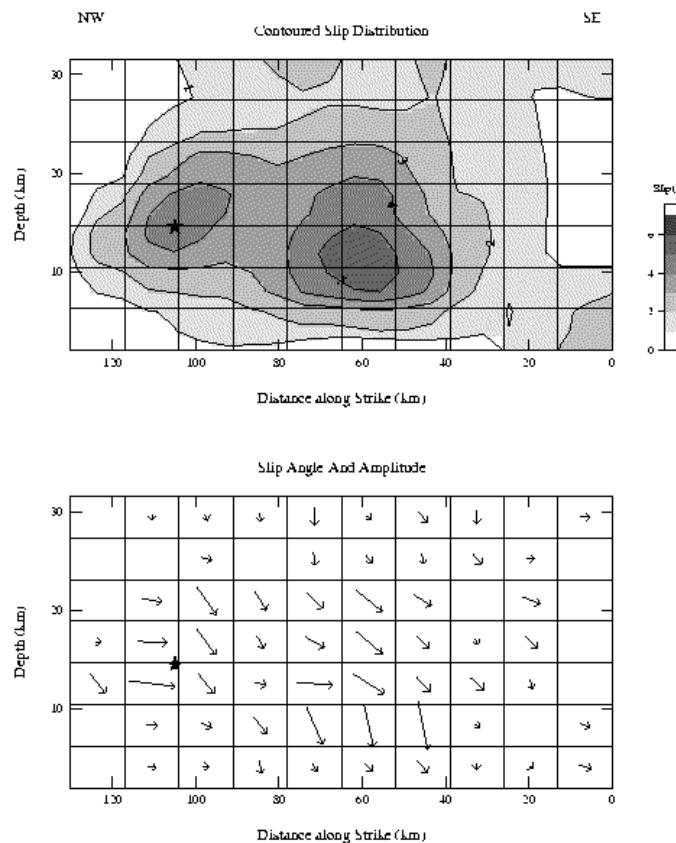


# アスペリティの存在

例1: 2000年鳥取県西部地震  
(野津他, 2003)

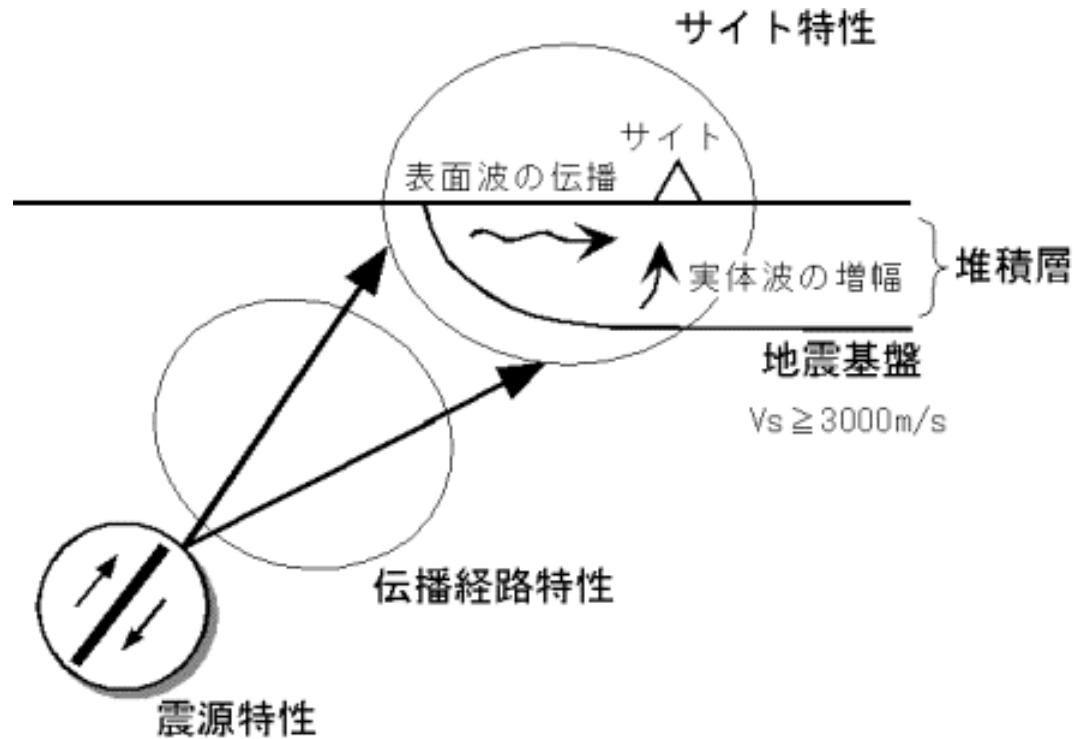


例2: 1923年関東地震  
(Wald and Somerville, 2002)



# 地震動に影響を及ぼす要因

- 震源特性
- 伝播経路特性
- サイト特性



①地震基盤が露頭  
→あまり揺れない



②地震基盤上に薄い堆積層  
→短周期地震動



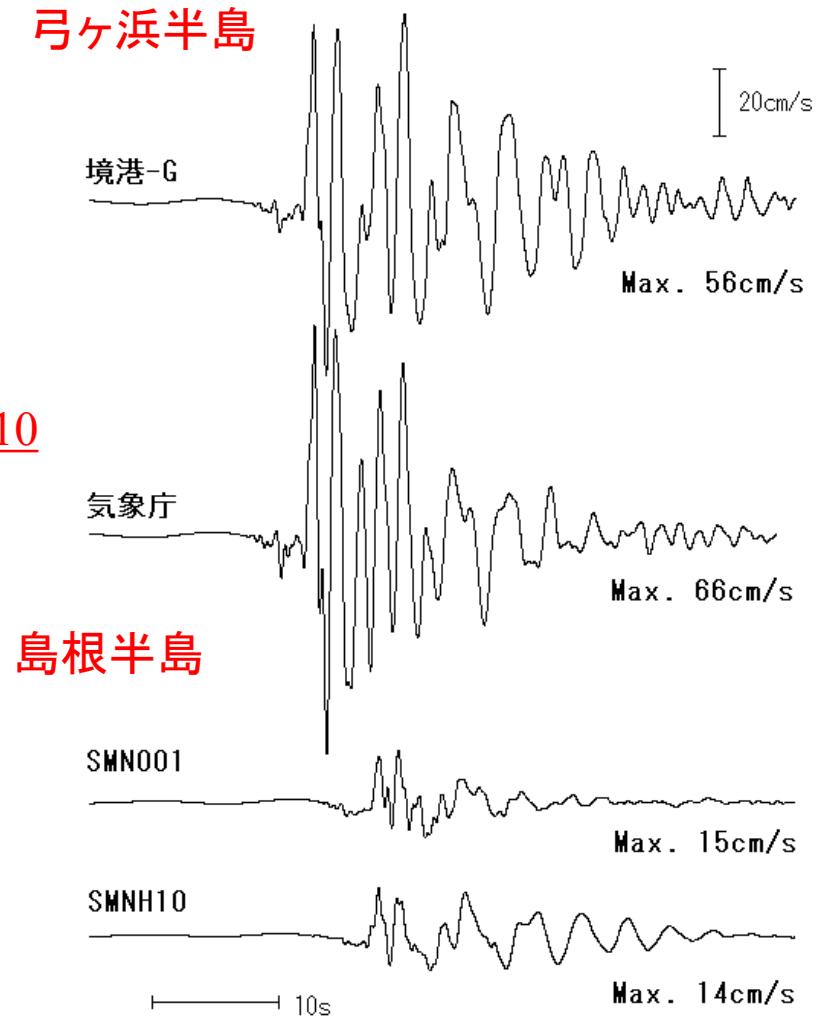
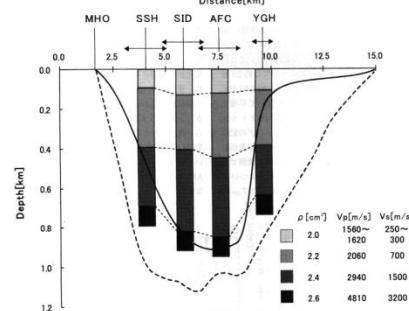
③地震基盤上に厚い堆積層  
→長周期地震動



④地震基盤上に堆積層があり →継続時間の長い揺れ  
地形的に閉じている。

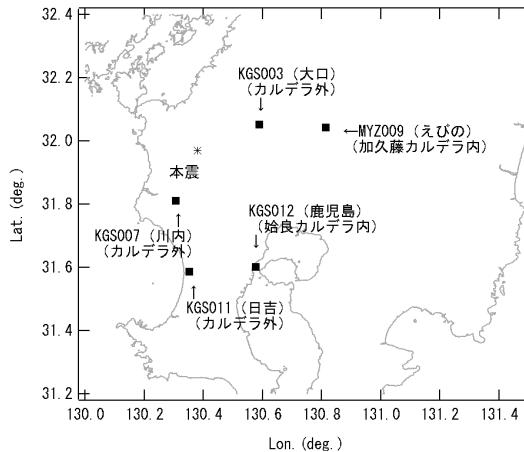


サイト特性の影響が表れている事例(1)～2000年鳥取県西部地震  
弓ヶ浜半島と島根半島で最大速度は4倍異なっている。



現地のサイト特性を精度良く評価しなければ、被害想定はミスリーディングなものとなる。<sup>22</sup>

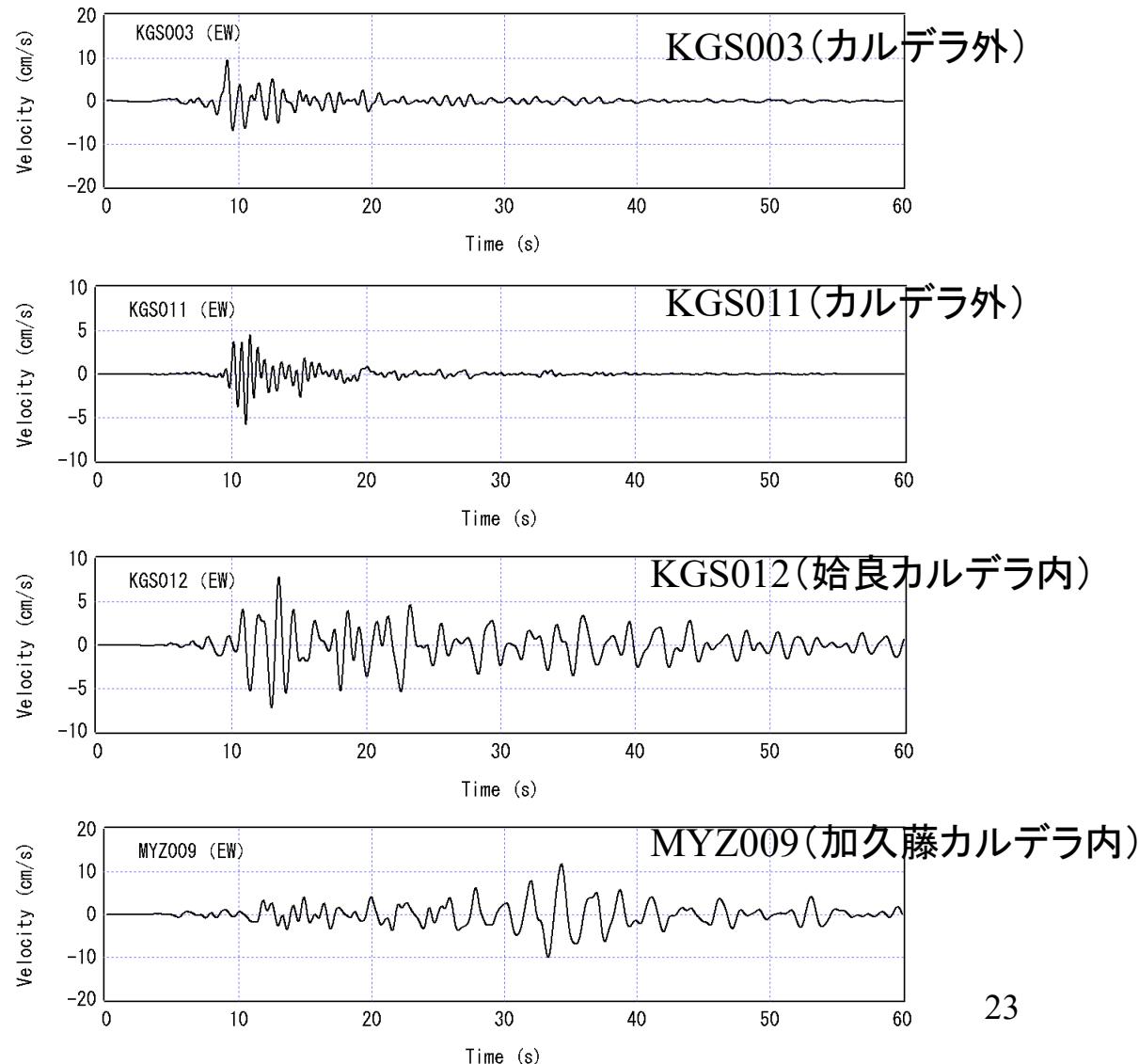
## サイト特性の影響が表れている事例(2)～カルデラの重要性



★カルデラ内(下の二つ)では継続時間の長い地震動が観測されている。

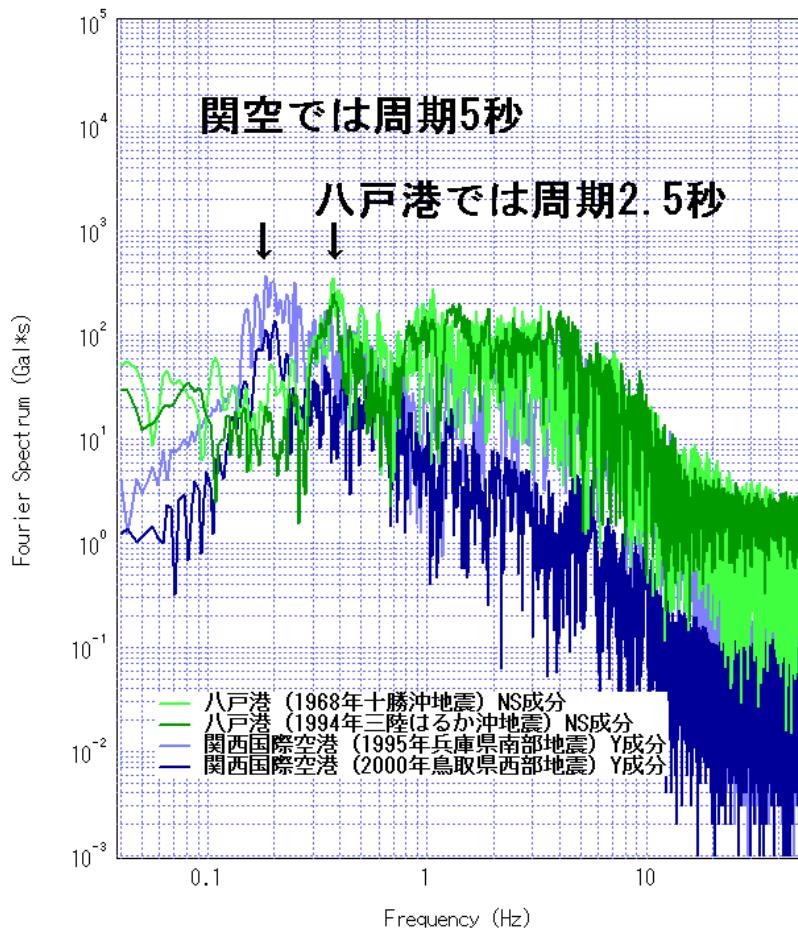
★閉じた構造による盆地生成表面波の影響と考えられる。

### 1997年3月26日鹿児島県北西部地震



## サイト特性の影響が表れている事例(3)

### 観測地点毎に特徴のある地震動の卓越周期



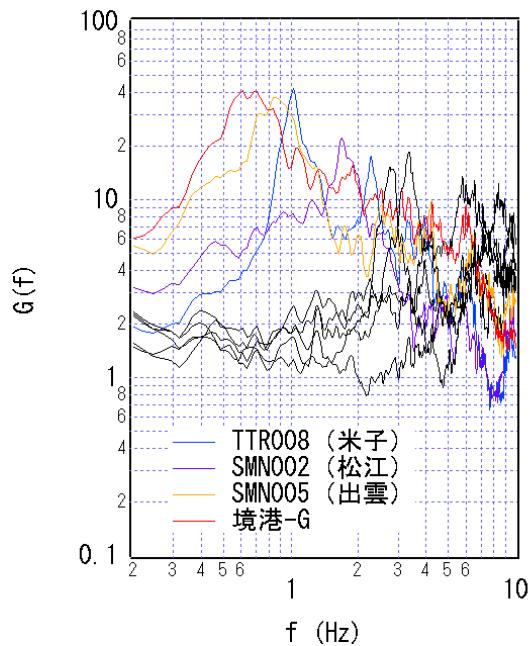
関空の地盤にハ戸波が到来するというのはあり得ないシナリオ

港湾や空港の地下構造の影響を考慮した設計用入力地震動を用いることが必要

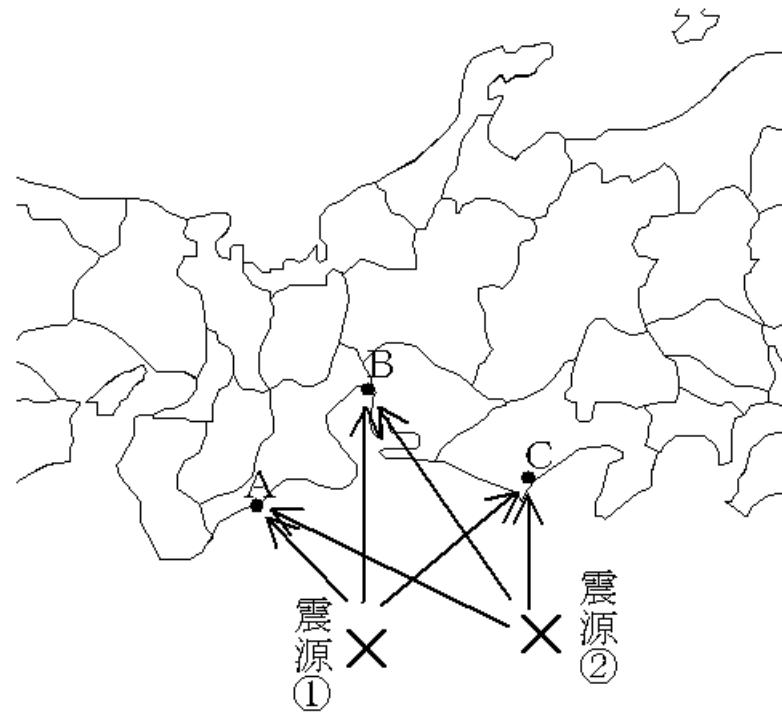
## — 地震観測に基づいて揺れやすさを調べる —

## サイト增幅特性とは？

地震基盤から地表(もしくは工学的基盤)までの地震動(のフーリエスペクトル)の増幅率のこと。

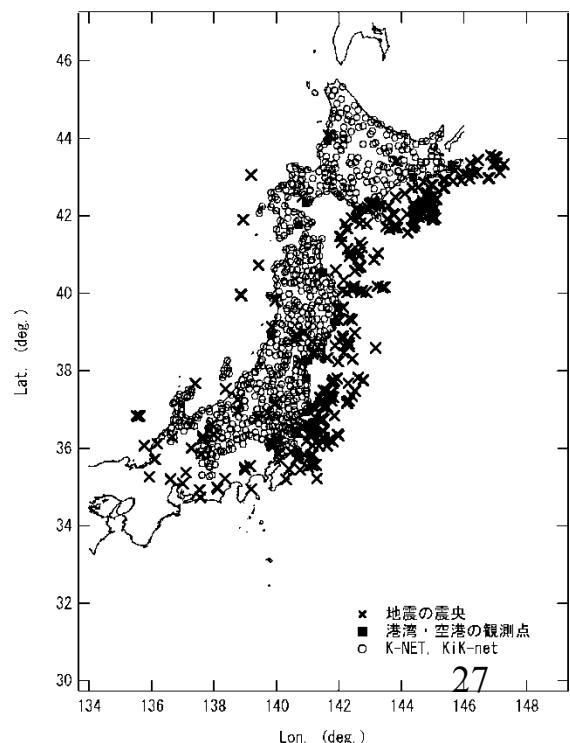
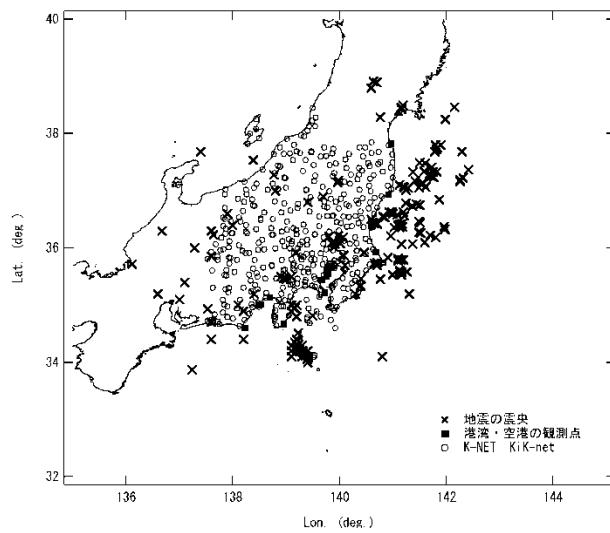
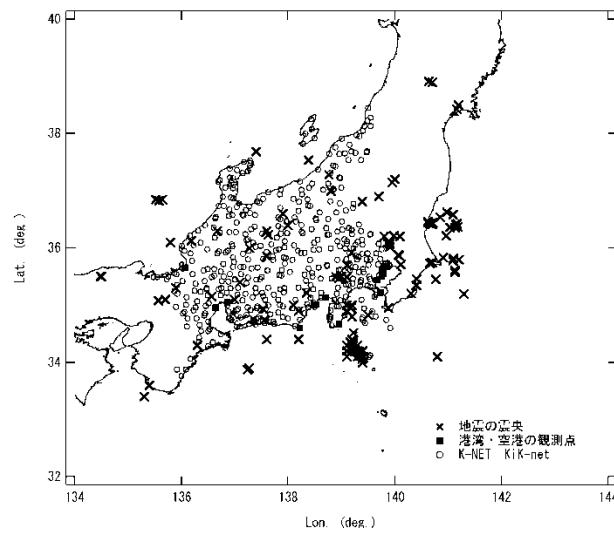
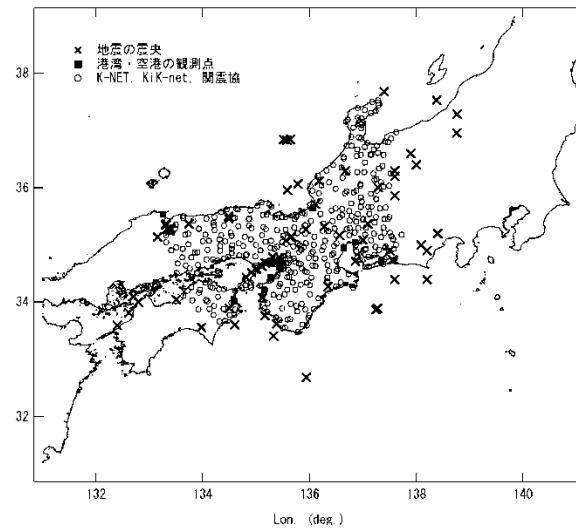
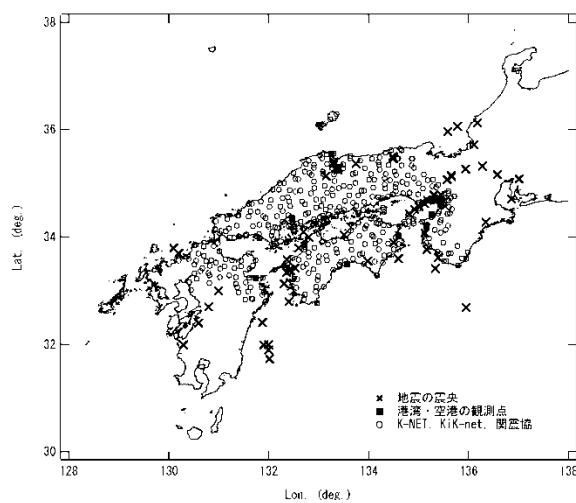
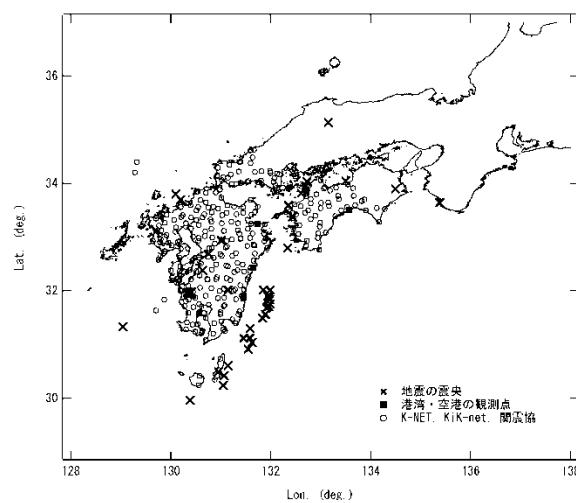


横軸に周波数を、縦軸に増幅率をとつて表される。

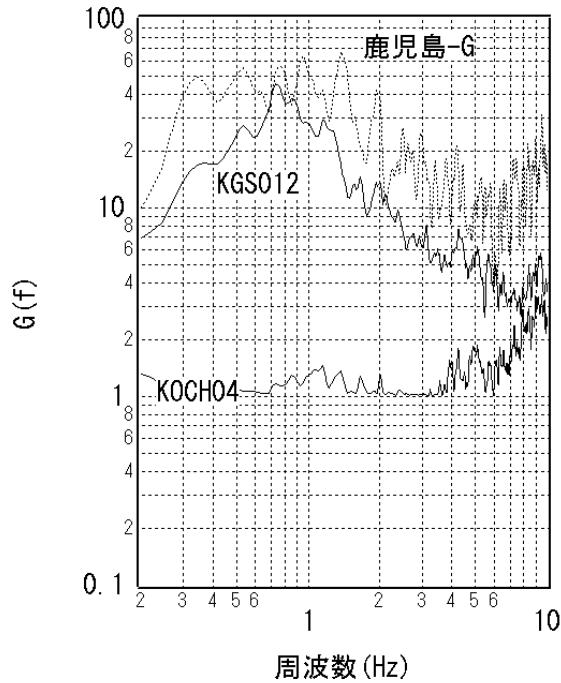


スペクトルインバージョン(多数の地震観測記録に対して一種の回帰分析を適用する方法)によって求めることができる。

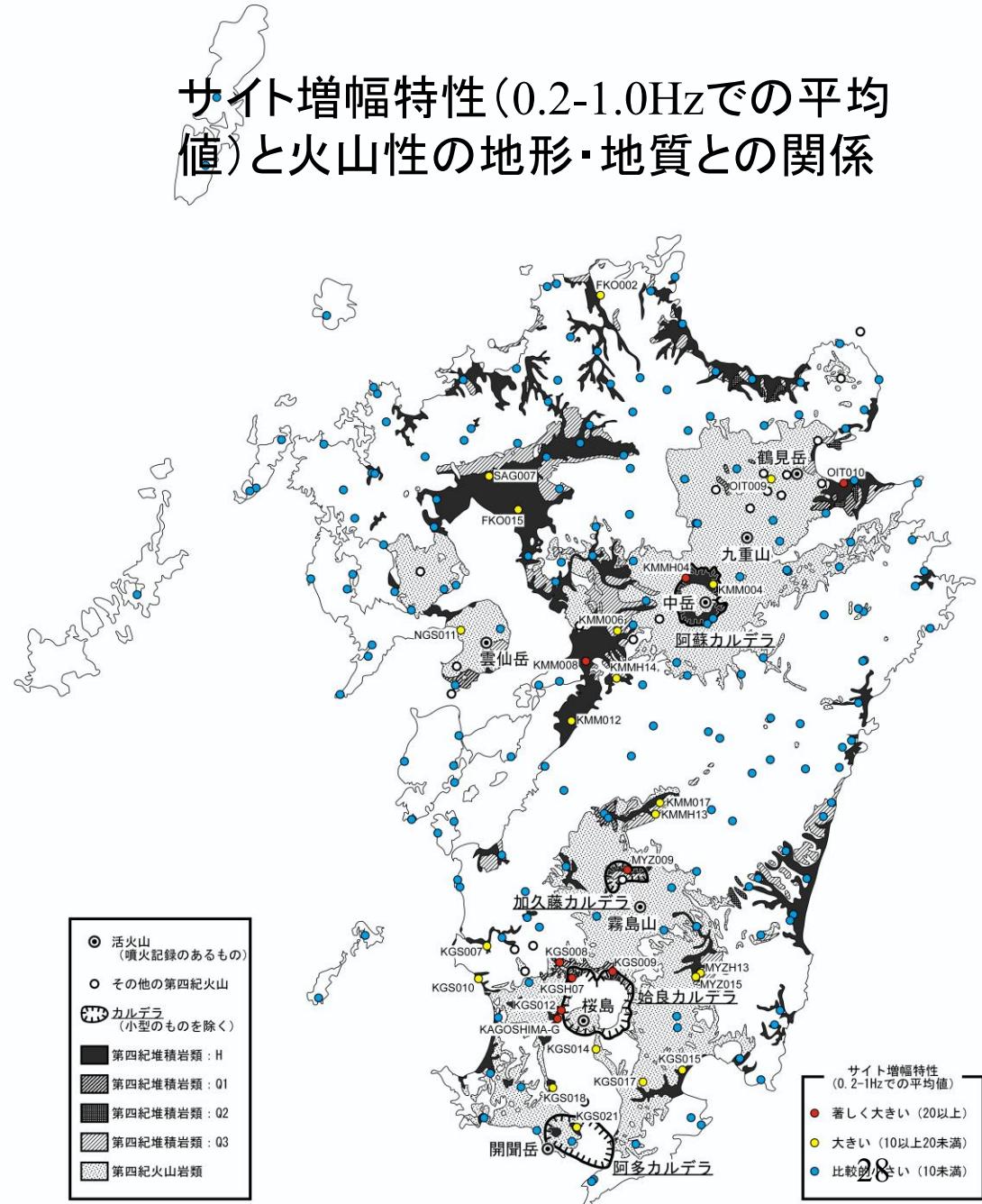
# 港空研資料No.1112の解析対象地点



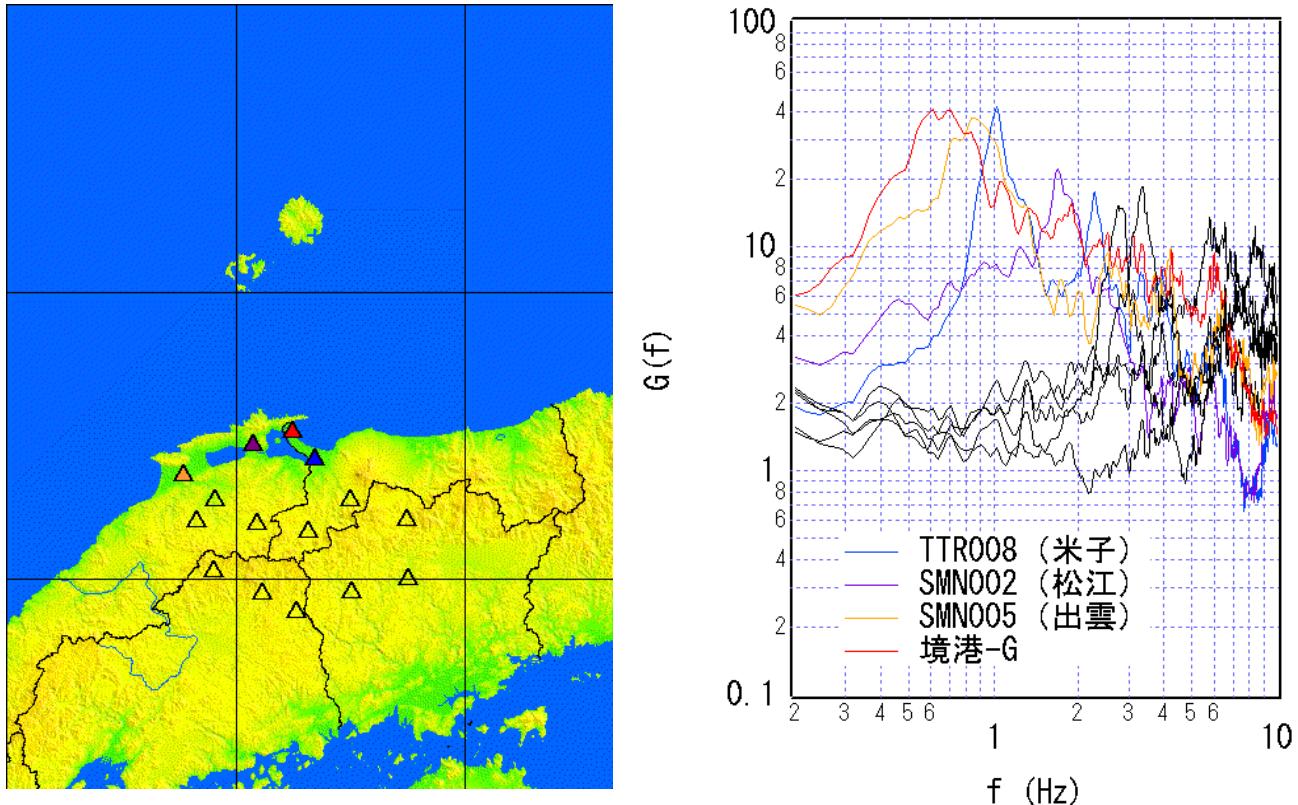
# 解析結果(九州地方の例)



姶良カルデラ内に位置する鹿児島-G(鹿児島港)およびK-NET鹿児島など、カルデラ内の観測点では特に大きなサイト增幅特性が算定される。



## 解析結果(中国地方の例)



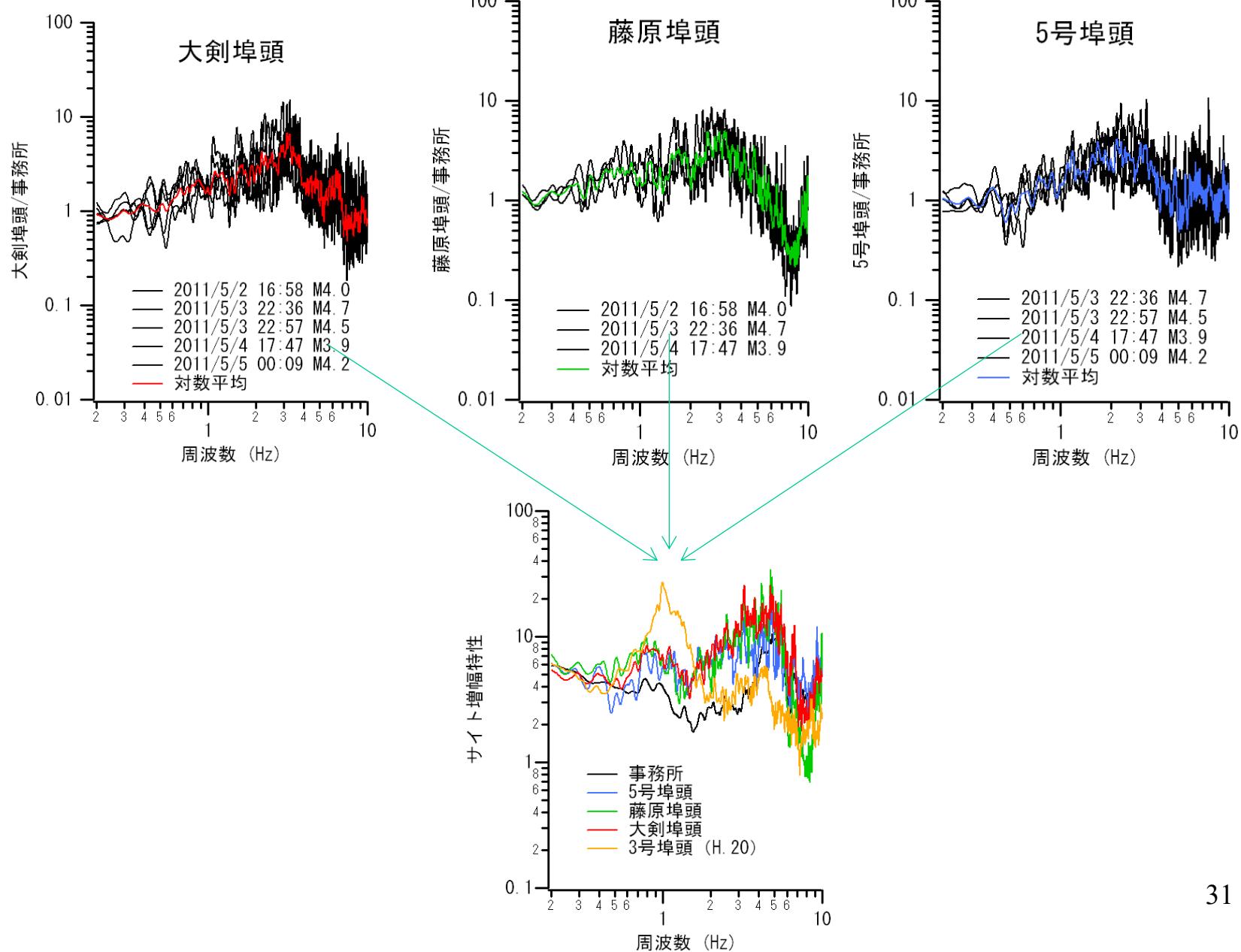
境港市から出雲市にかけての平野部ではサイト増幅特性が大きく、内陸部ではサイト増幅特性が小さい

これらの結果は、港空研資料No.1112および港空研HPで公開されており、  
いつでも利用できる。[https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/siteamplification\\_jpn.html](https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/siteamplification_jpn.html)

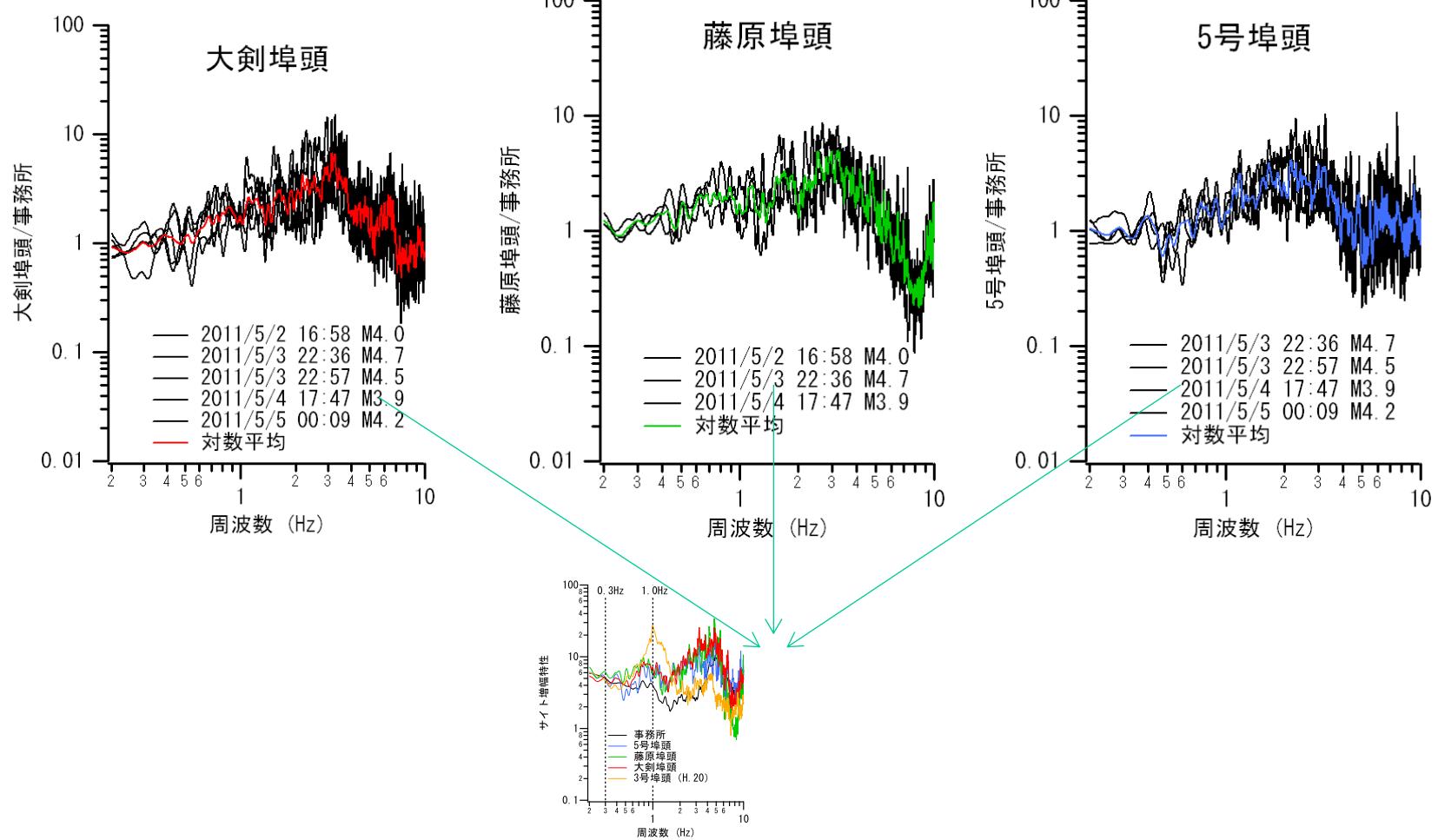
## 【小名浜港の被害】



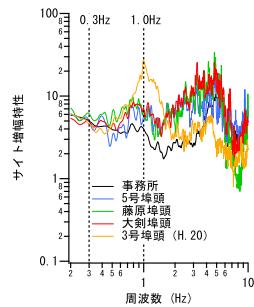
## 【小名浜港の被害】



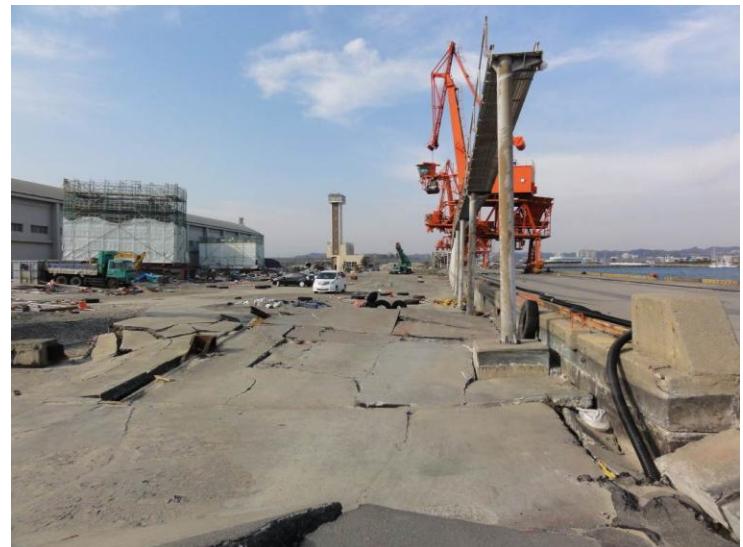
# 【小名浜港の被害】



## 【小名浜港の被害】



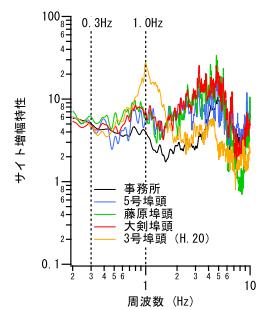
3号埠頭



3号埠頭岸壁(-10m)  
矢板式(設計震度0.15)  
最大せり出し量 1.6m  
岸壁背後の段差 1m以上



## 【小名浜港の被害】

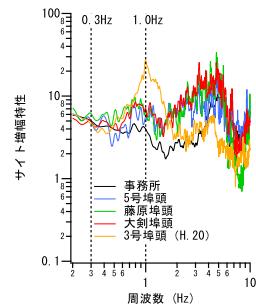


5号埠頭



5号埠頭岸壁(-12m)  
ケーソン式(設計震度0.20)  
最大せり出し量 0.8m

## 【小名浜港の被害】

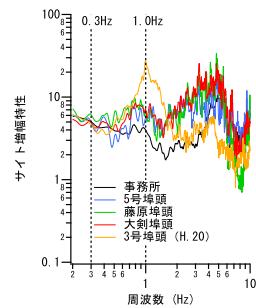


藤原埠頭



藤原埠頭岸壁 (-12m)  
ケーソン式(設計震度0.12)  
最大せり出し量 0.3m

## 【小名浜港の被害】

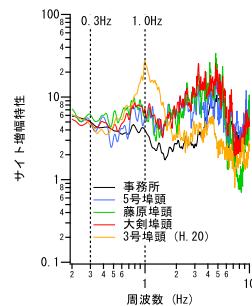


大剣埠頭



大剣埠頭岸壁 (-7.5m)  
ケーソン式(設計震度0.10)  
最大せり出し量 0.5m

## 【小名浜港の被害】



施設名称	構造形式	設計震度	最大せり出し量
3号埠頭岸壁 (-10m)	矢板式	0.15	1.6m
5号埠頭岸壁 (-12m)	ケーソン式	0.20	0.8m
藤原埠頭岸壁 壁(-12m)	ケーソン式	0.12	0.3m
大剣埠頭岸壁 (-7.5m)	ケーソン式	0.10	0.5m

★このように、東北地方太平洋沖地震においては、同一港湾内においても地震動が場所毎に大きく異なる場合があり、そのことが港湾施設の被害程度の大小を左右している実態が明らかになってきた。

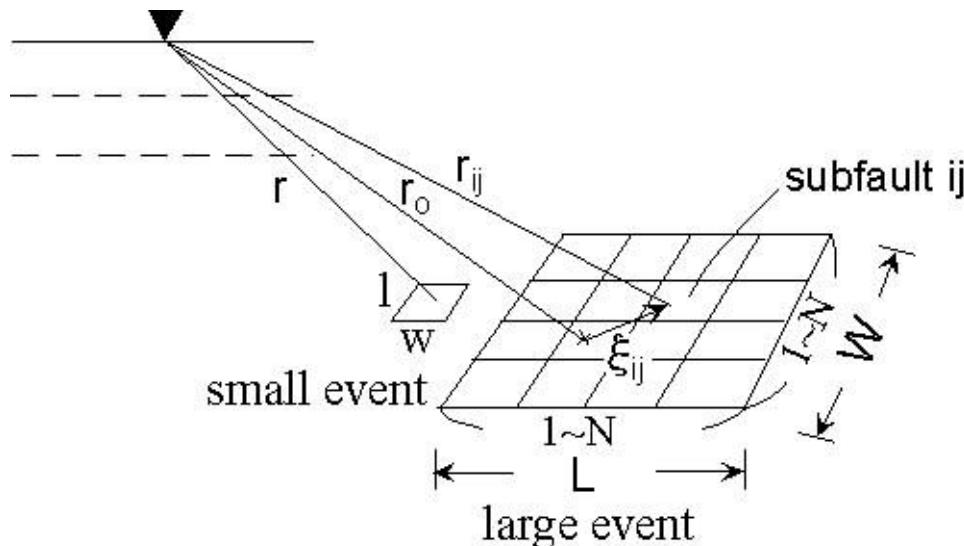
★よって、今後の地震対策においては、港湾内におけるサイト增幅特性の分布を詳細に調べ、サイト增幅特性の大きい場所に立地する施設に対して特に入念に対策を行うことが肝要である。

★港湾計画の段階で港湾内におけるサイト增幅特性の分布を考慮し、サイト增幅特性の小さい場所に重要な施設を立地させることは有効である。

## 目 次

1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

## 修正経験的グリーン関数法



★サイト特性を考慮して想定地震による揺れを予測する方法にはいくつかのものがあるが、ここでは経験的サイト增幅・位相特性を考慮した強震動予測手法を紹介する。

★ステップ1では小地震による港湾での地震波を震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮して計算する。

★ステップ2では小地震による地震波を多数重ね合わせることにより、大地震による港湾での地震波を計算する。

## ステップ1の詳細

★小地震による地震波のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として評価する。

$$|O(f)| = |S(f)| |P(f)| |G(f)|$$

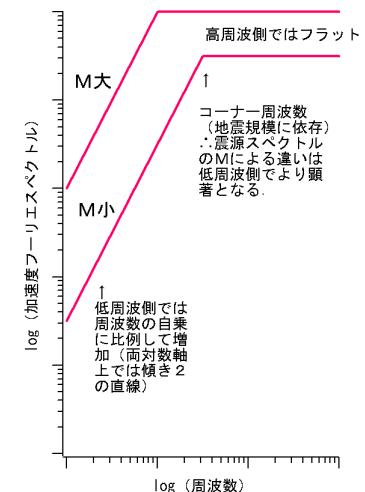
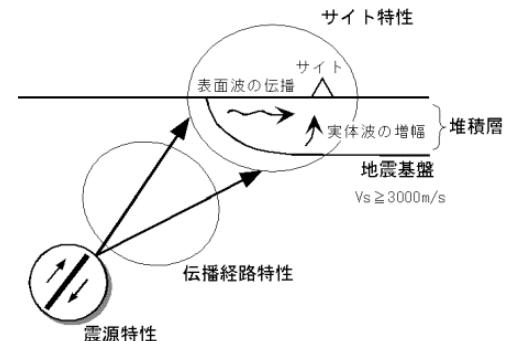
### 1. 震源特性

$$|S(f)| = CM_0 / \left\{ 1 + (f / f_c)^2 \right\} \quad \leftarrow \omega \text{スクエアモデル}$$

### 2. 伝播経路特性

$$|P(f)| = \frac{1}{r} \exp \left( -\pi fr / QV_s \right)$$

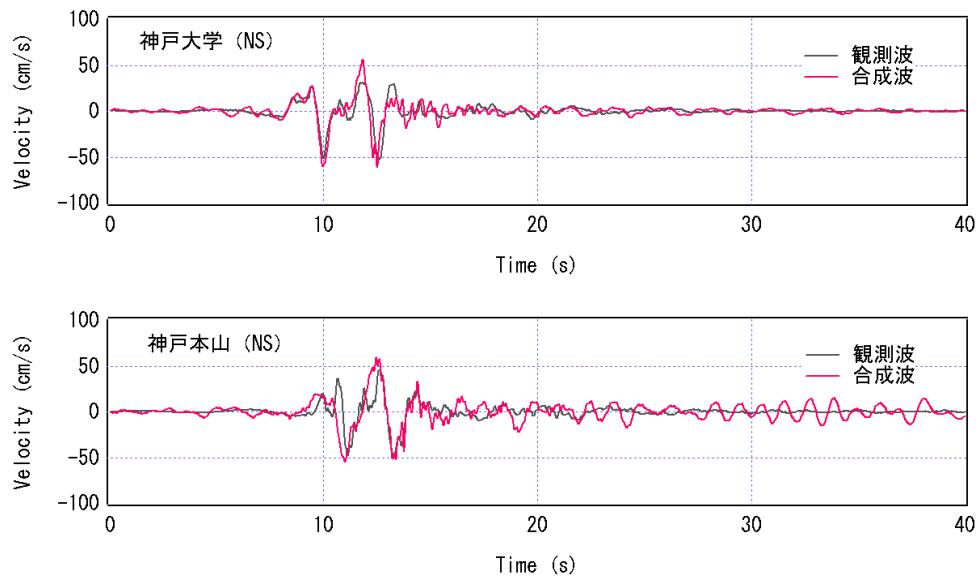
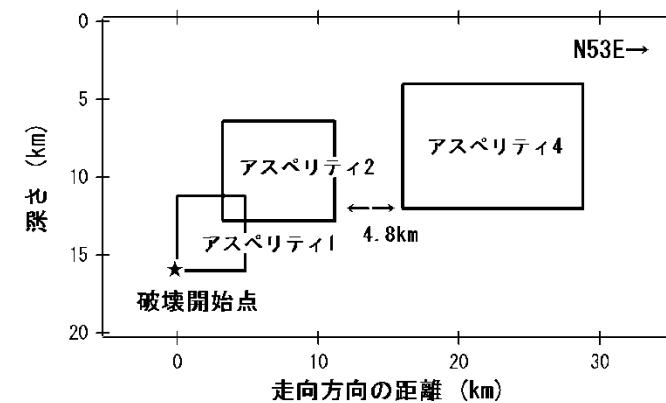
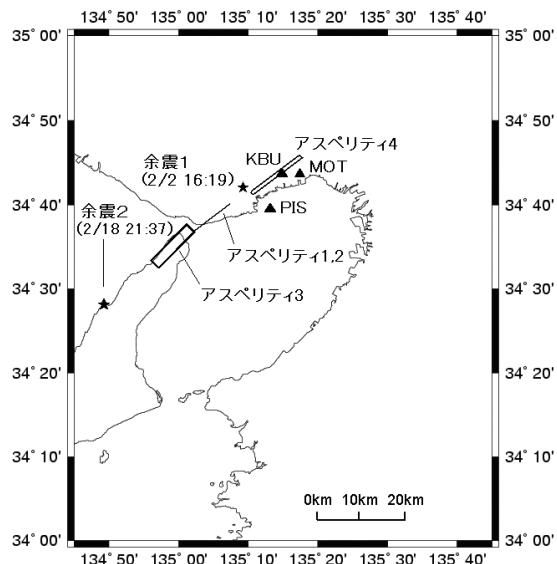
### 3. サイト増幅特性 $|G(f)|$ は強震記録から抽出



★小地震による地震波のフーリエ位相は対象港湾すでに得られている中小地震記録のフーリエ位相をそのまま利用する。

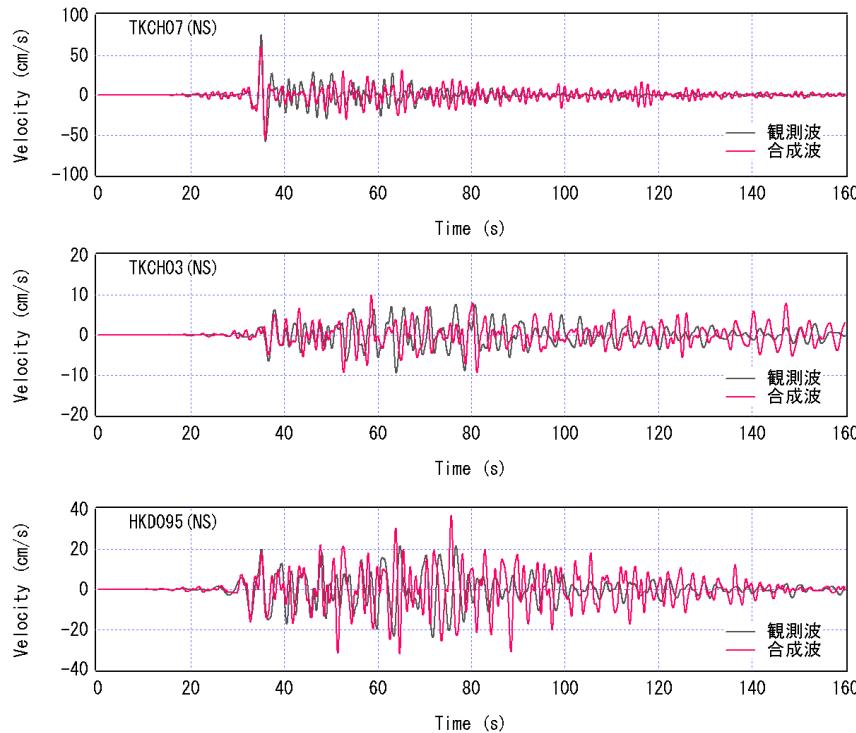
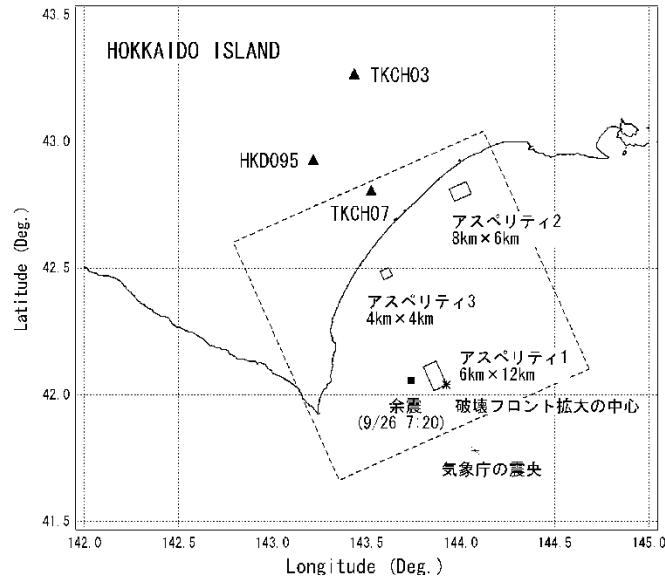
# 過去の地震への適用例(1995年兵庫県南部地震の例)

震源モデル: 山田他(1999)の  
モデルー釜江・入倉(1997)の  
改良版ーの神戸側部分



# 過去の地震への適用例(2003年十勝沖地震の例)

例えば1968年十勝沖地震や2003年十勝沖地震のような海溝型巨大地震、1995年兵庫県南部地震のような内陸活断層地震に対して、上記の計算手法の適用性が確認されている。



2003年十勝沖地震の震源モデルとそれによる強震記録の再現

★計算プログラムは港空研資料No.1173および港空研HPで公開されている。

[https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/sourcemodel/somodel\\_program.html](https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/sourcemodel/somodel_program.html)

★より詳しく知りたい方は港空研地震動研究グループまで御相談下さい。

## 目 次

1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

## — 短期間の地震観測に基づくサイト特性の評価 —

## 短期間の地震観測の事例

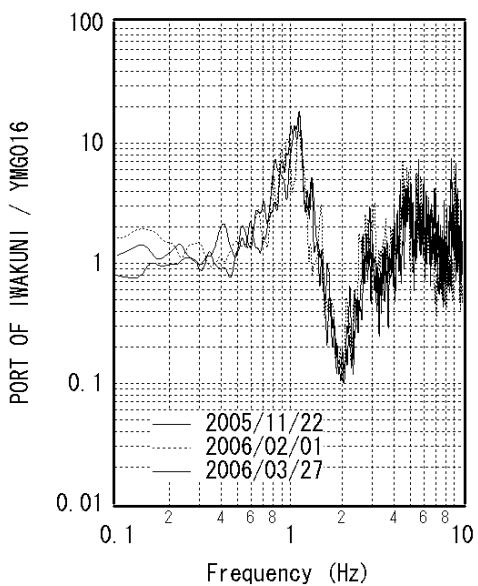


★中国地方整備局による岩国港での地震観測に用いられた地震計

★観測は2005年に約半年間行われた。そこで得られた記録と、恒久的な強震観測点である防災科学技術研究所のYMG016(約5km離れている)の記録との比較を行った。



## 短期間の地震観測の事例



- ★ いったん現地で地震観測記録が得られれば、スペクトル比を用いることで、現地のサイト增幅特性を精度良く、かつ容易に評価できる。
- ★ 例えば下の図は岩国港とYMG016とのスペクトル比を表す。この比をYMG016のサイト增幅特性に乗じることで、岩国港でのサイト增幅特性を評価できる。

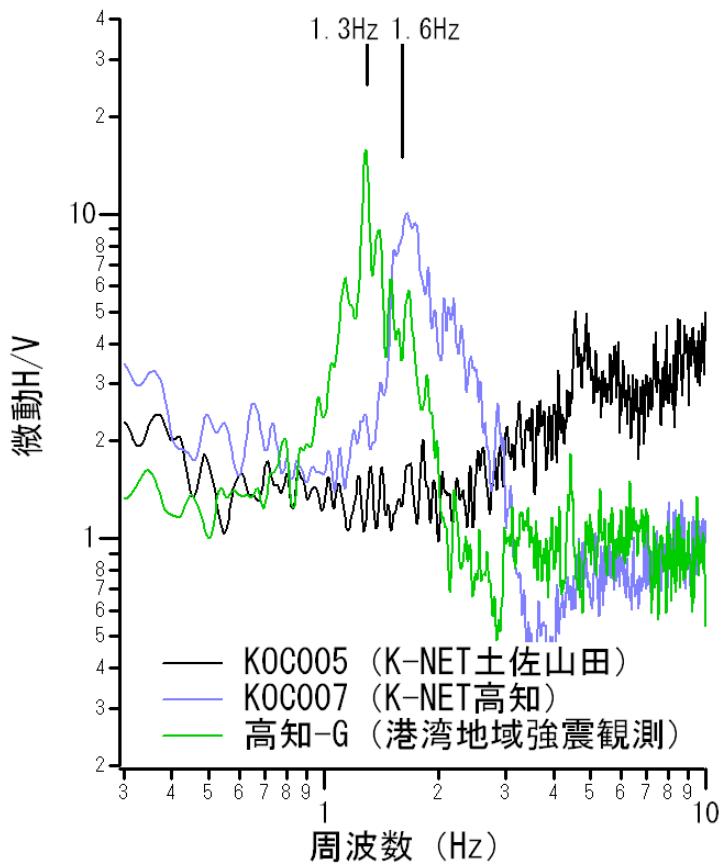
## — 常時微動観測の活用 —

# 微動観測

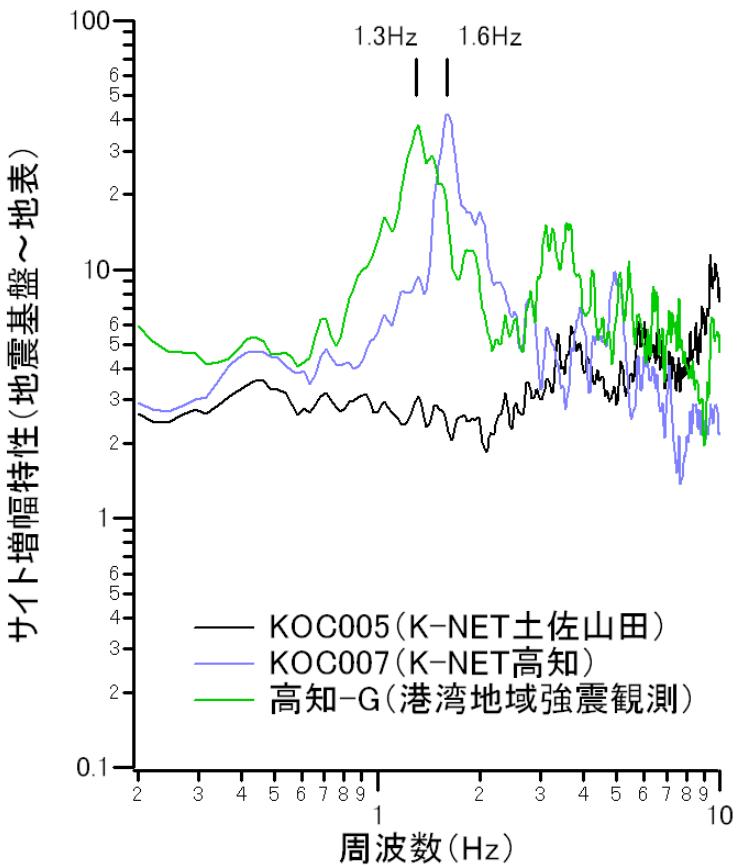


函館空港における微動観測の実施例  
一人でも一日に港湾内の十数地点での観測  
は十分可能なコストパフォーマンスの良い観  
測である。

## 【サイト增幅特性と微動H/Vスペクトル】



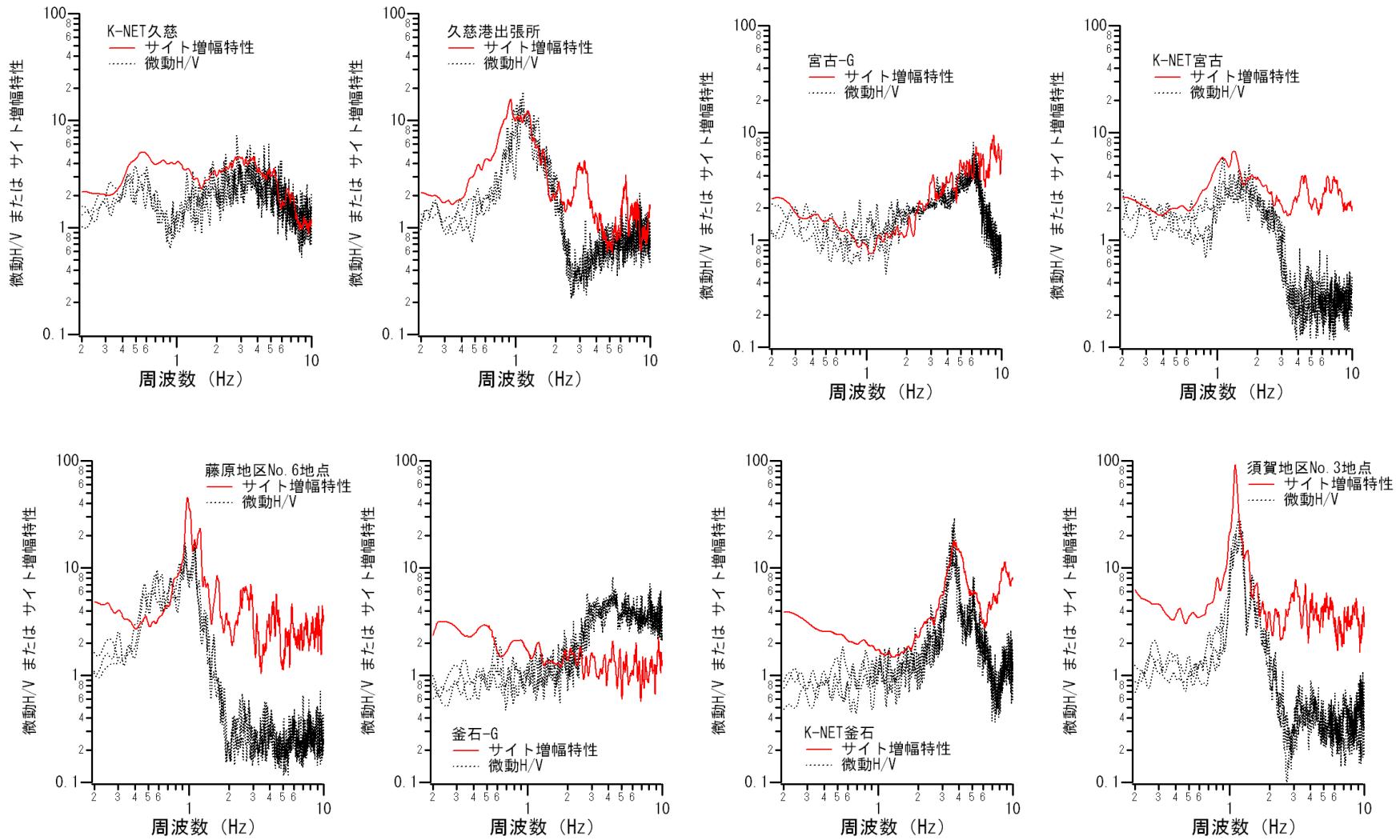
←対応→



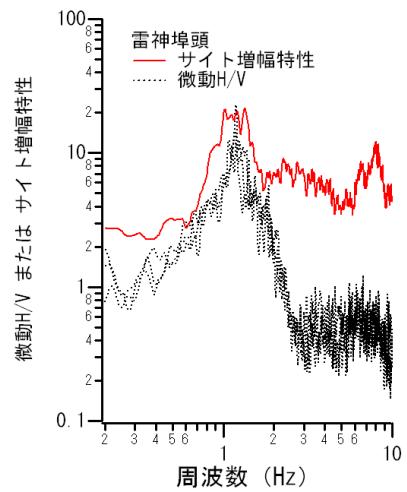
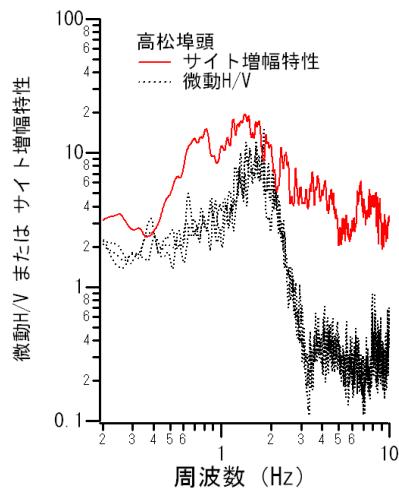
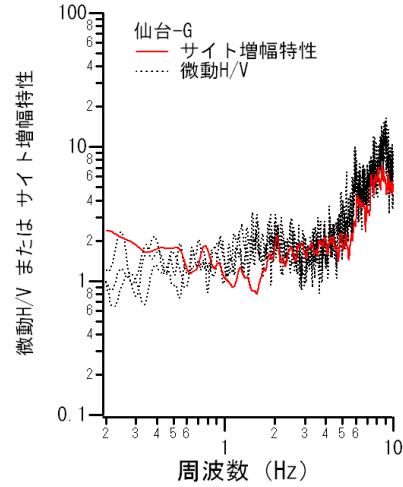
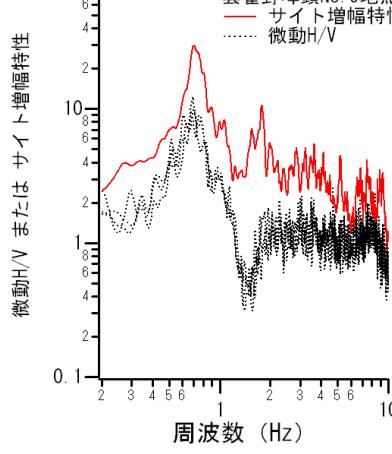
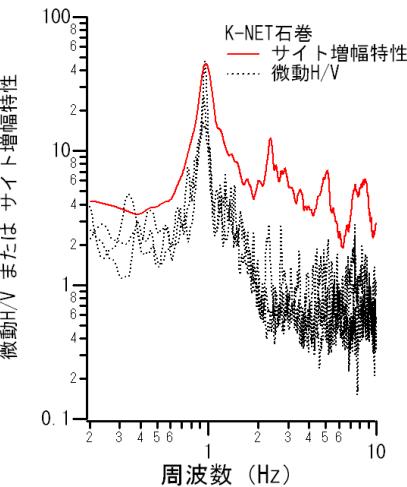
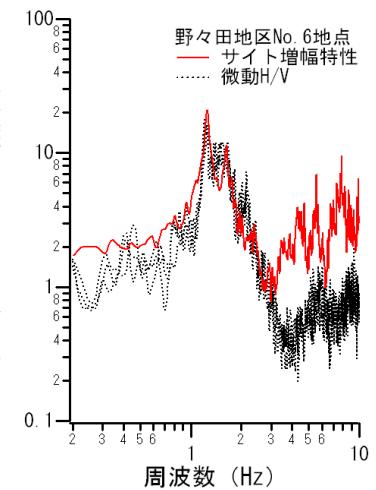
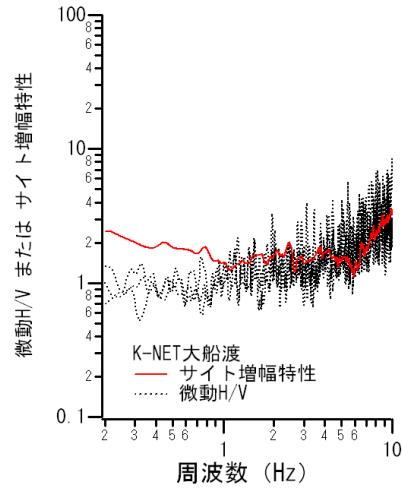
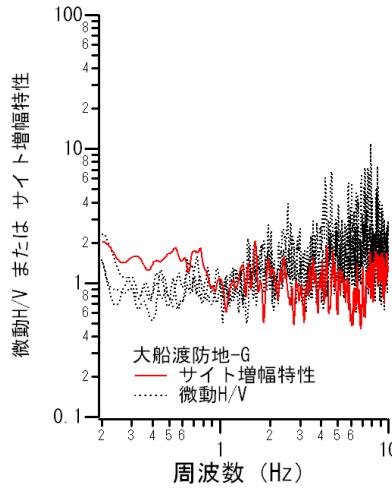
地震観測に基づくサイト增幅特性

高知港とその周辺の強震観測地点における微動H/Vスペクトルとサイト增幅特性の関係(ここに示す微動H/Vは3区間の平均値)

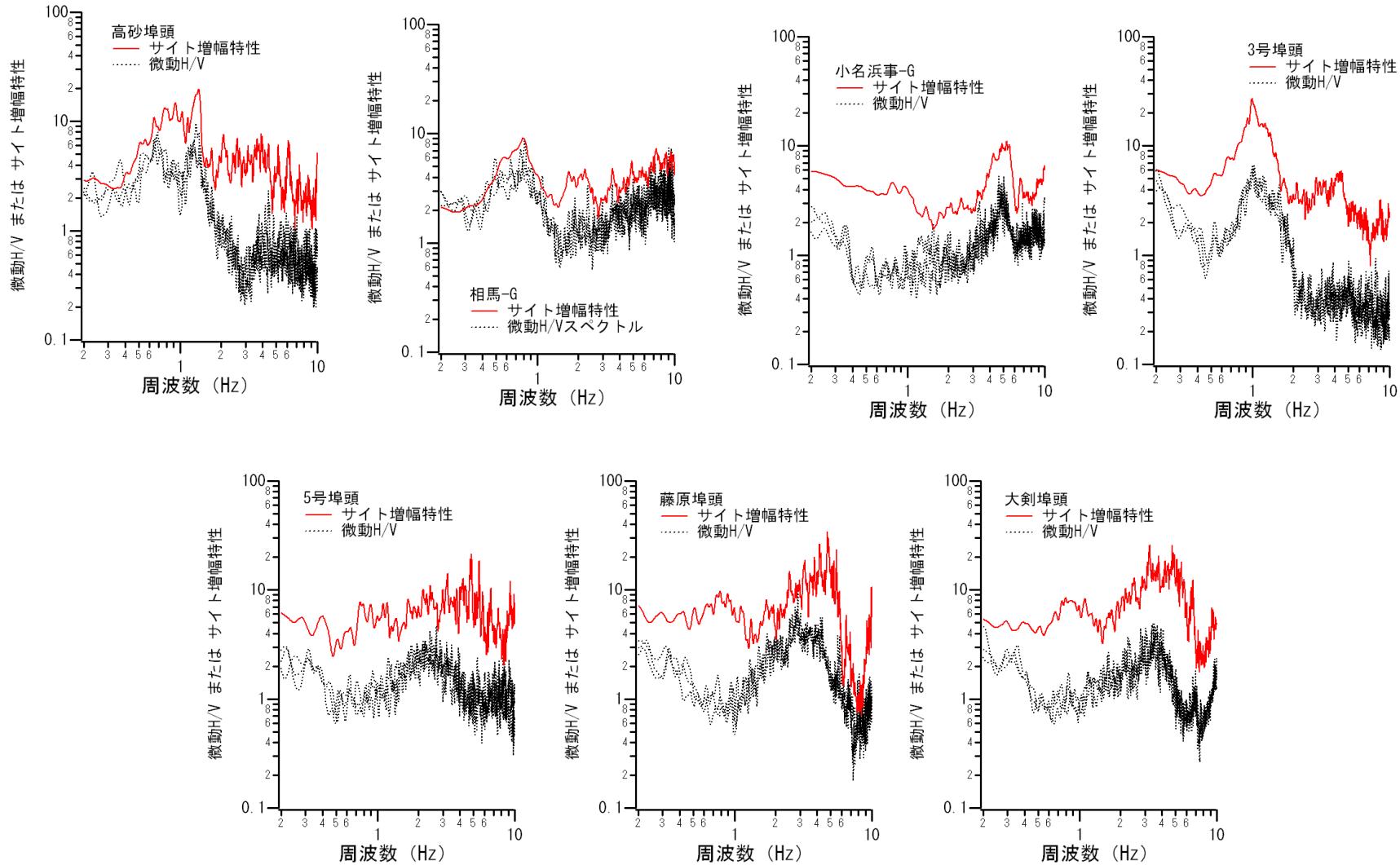
# 東北地方の23地点における微動H/Vとサイト增幅特性の比較(その1)



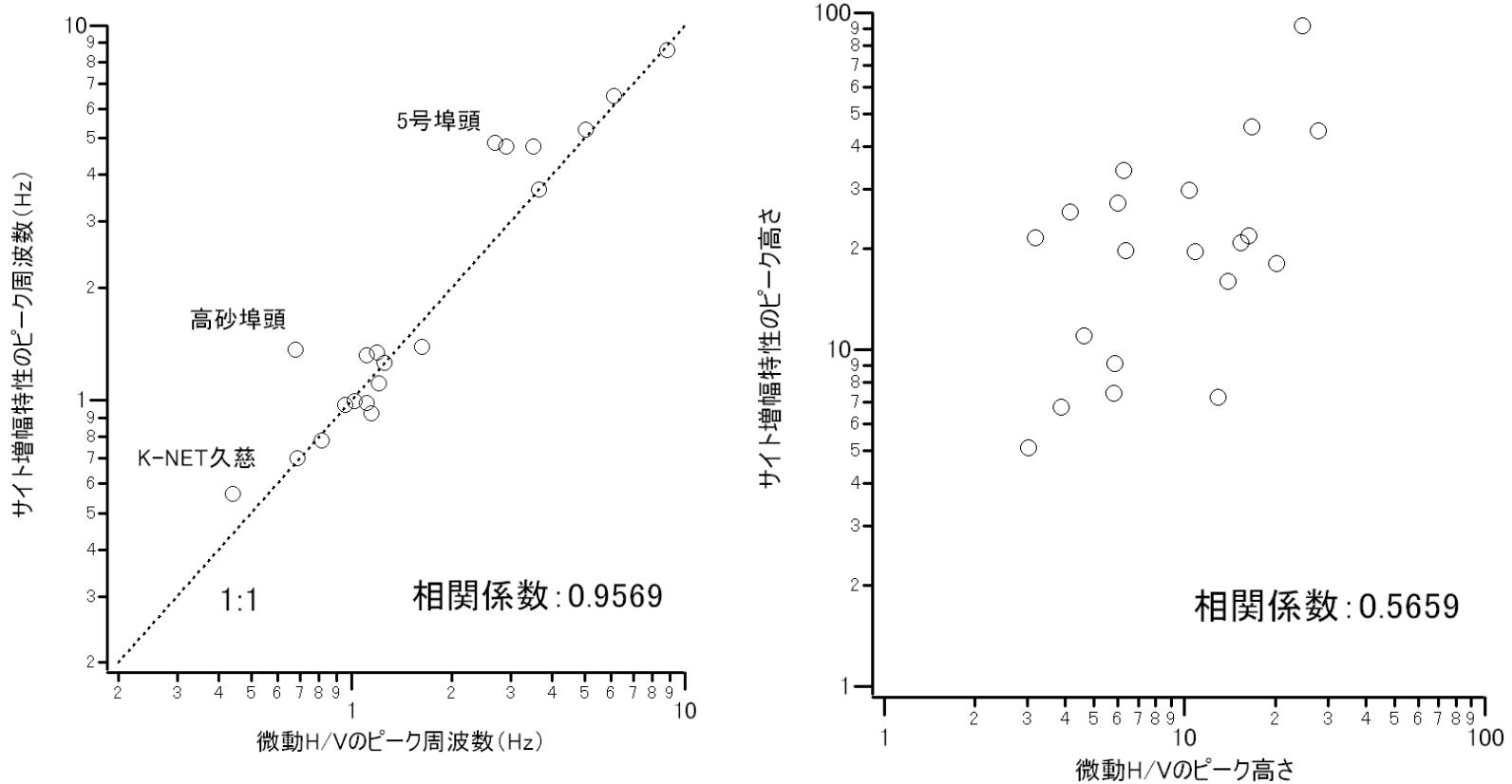
## 東北地方の23地点における微動H/Vとサイト增幅特性の比較(その2)



# 東北地方の23地点における微動H/Vとサイト增幅特性の比較(その3)



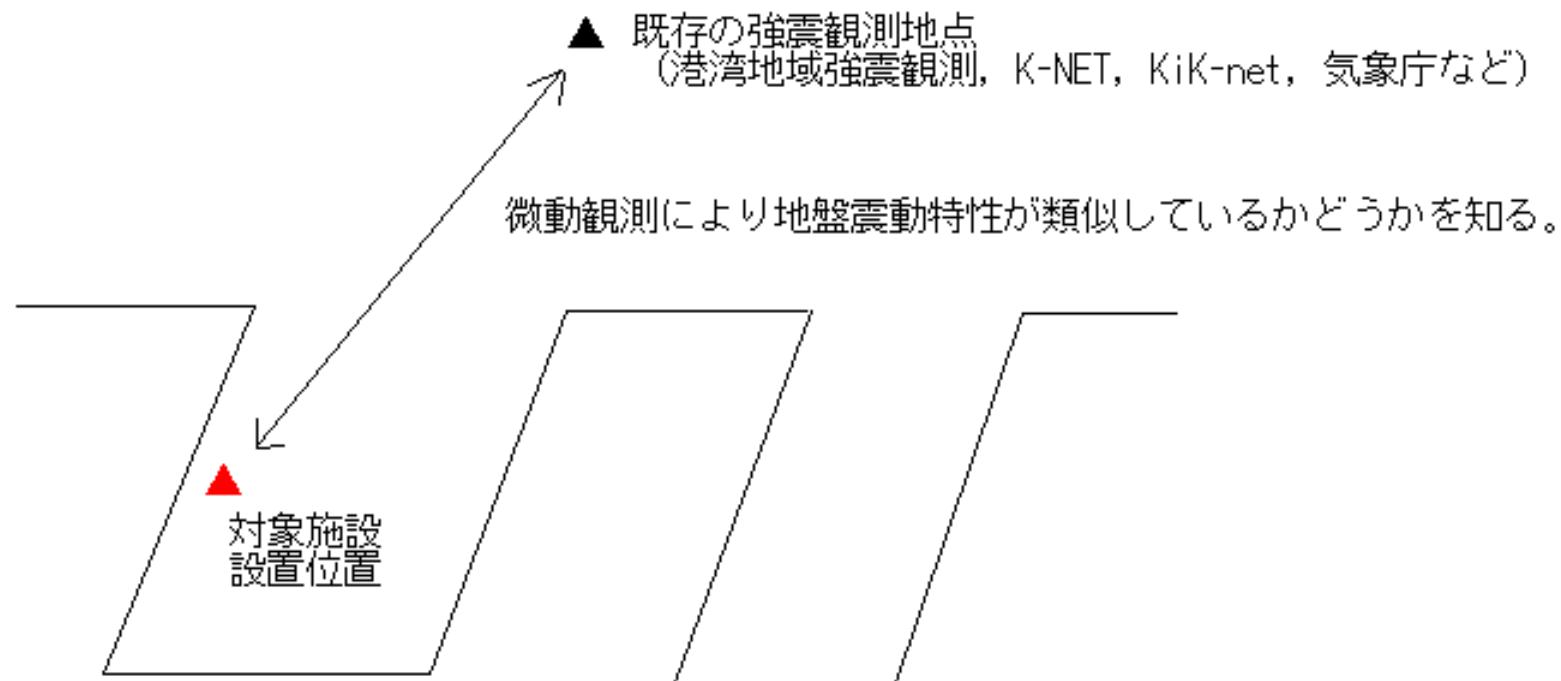
## 微動H/Vスペクトルとサイト增幅特性の ピーク周波数(左)およびピーク高さ(右)の対応関係



- ★ピーク周波数のみならずピーク高さも相関性を有している。
- ★ピーク高さの相関性に関しては、ピーク周波数ほど相関が高くないが、相関があるのは事実のようである。

## — 耐震設計における望ましいサイト特性評価の手順 —

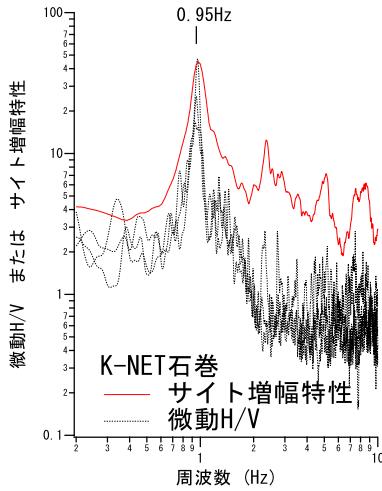
①まず微動観測をする(微動はいつでもどこでも観測できる)。



②既存の強震観測地点と対象施設設置位置で微動特性が似ていれば、既存の強震観測地点におけるサイト增幅特性を用いる。

③似ていなければ、対象施設設置位置(またはその近傍で地盤震動特性が類似している範囲)に地震計を設置し臨時の地震観測を行う。

## — 石巻港の事例 —



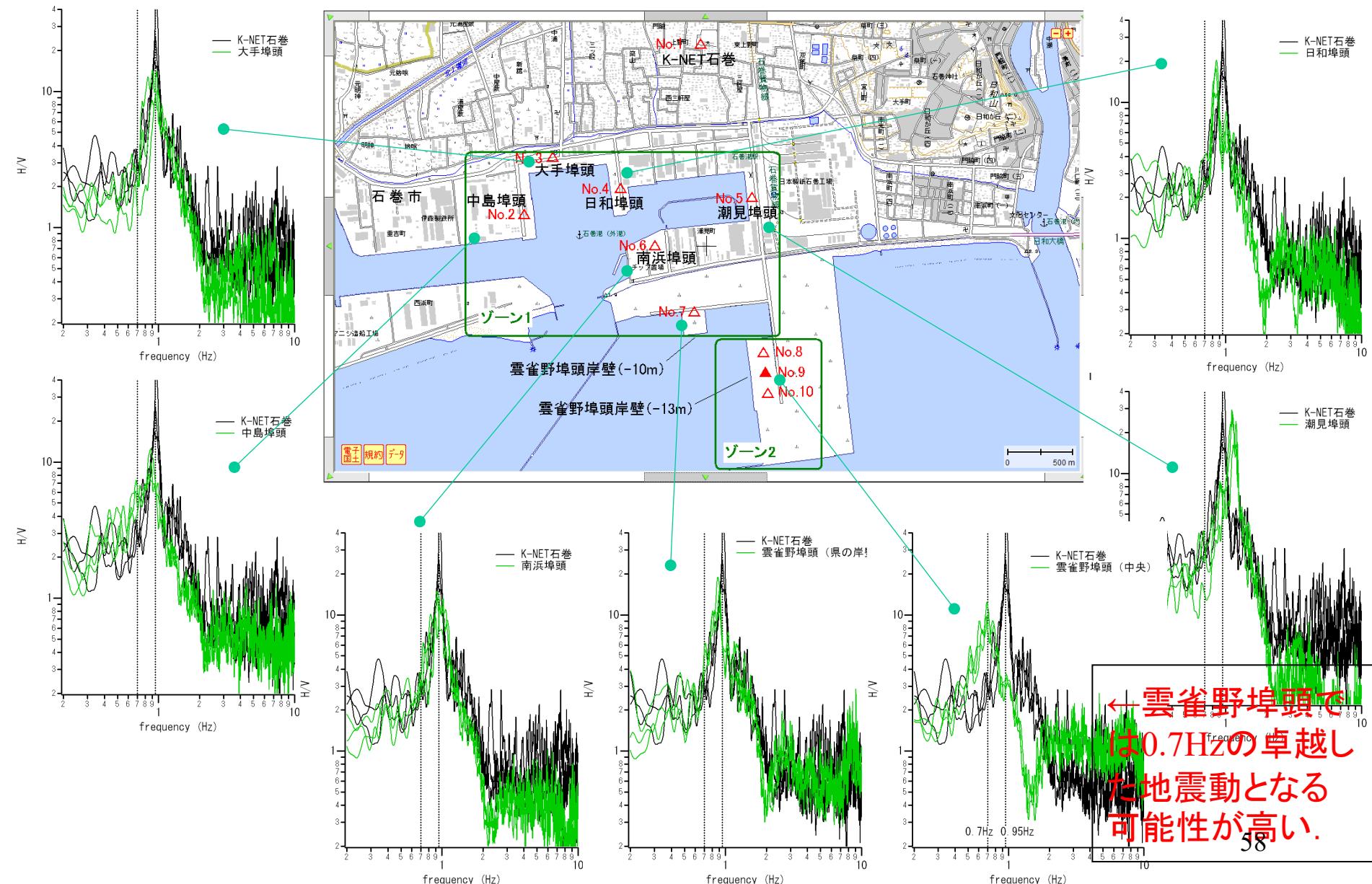
※K-NET 石巻では0.95Hzの卓越したサイト增幅特性が得られている。

※同じ場所で常時微動を測るとやはり0.95Hzの卓越した微動H/Vスペクトルが得られる。

サイト增幅特性  
(港空研資料No.1112)

## 各埠頭における微動観測結果 (K-NETと似ているかどうか)

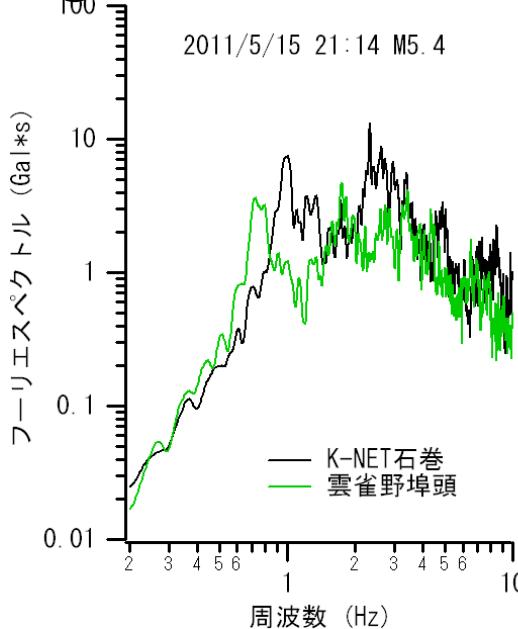
## 【石巻港の場合】



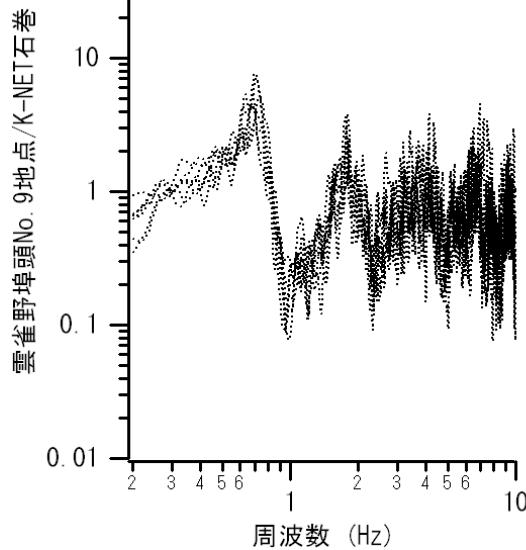
## ①雲雀野埠頭での地震観測の実施



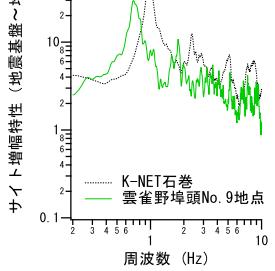
## ②フーリエスペクトルの比較



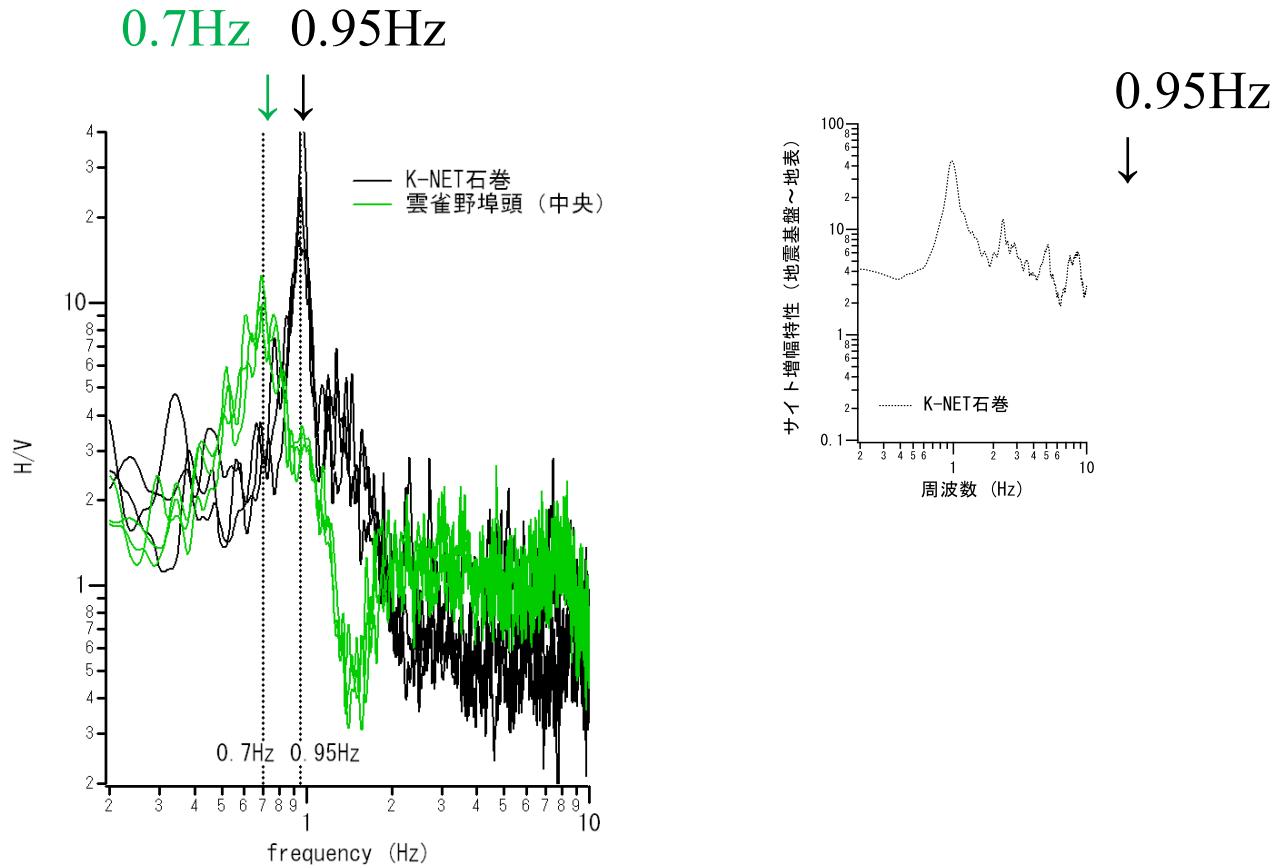
## ③スペクトル比の算定



## ④雲雀野埠頭におけるサイト增幅特性の算定



## — 常時微動観測結果に基づくサイト增幅特性の補正 — (いわゆる竹補正)

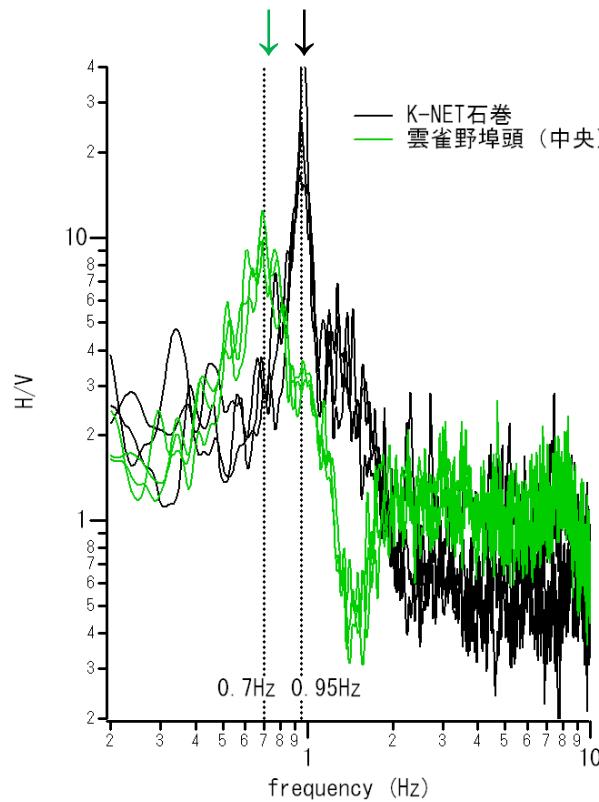


微動H/V

サイト增幅特性

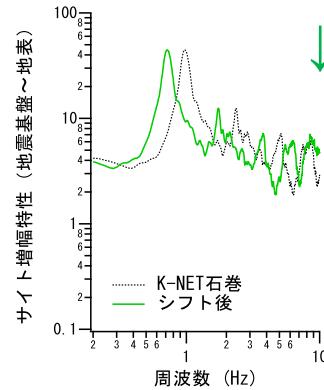
微動観測結果によるとK-NET石巻と雲雀野埠頭における微動H/Vスペクトルのピーク周波数はそれぞれ0.95Hzと0.7Hzで違いがある。その違いの分だけサイト增幅特性のピーク周波数をシフトさせるのがいわゆる竹補正である。

0.7Hz 0.95Hz



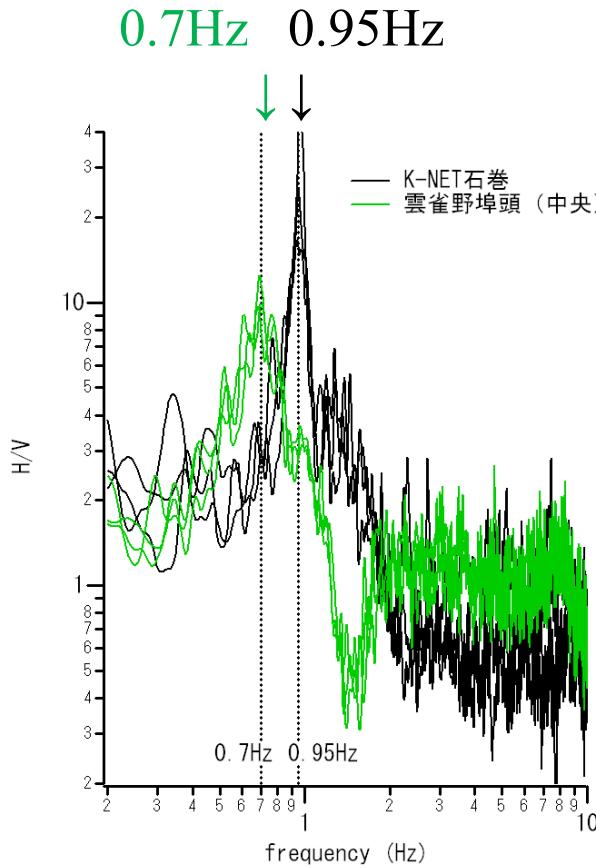
微動H/V

0.7Hz 0.95Hz

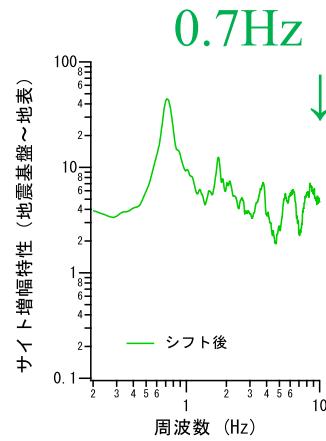


サイト增幅特性

微動観測結果によるとK-NET石巻と雲雀野埠頭における微動H/Vスペクトルのピーク周波数はそれぞれ0.95Hzと0.7Hzで違いがある。その違いの分だけサイト增幅特性のピーク周波数をシフトさせるのがいわゆる竹補正である。



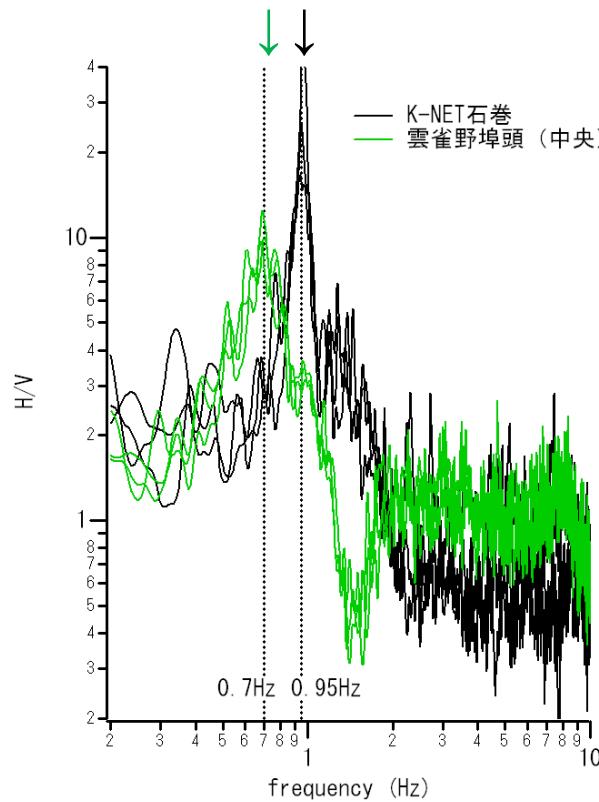
微動H/V



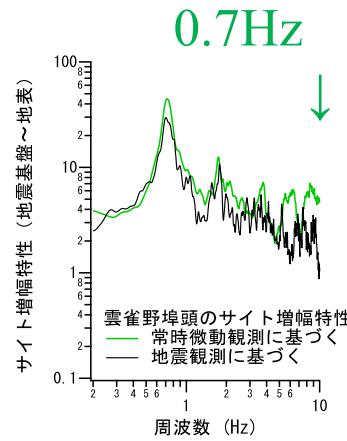
サイト增幅特性

微動観測結果によるとK-NET石巻と雲雀野埠頭における微動H/Vスペクトルのピーク周波数はそれぞれ0.95Hzと0.7Hzで違いがある。その違いの分だけサイト增幅特性のピーク周波数をシフトさせるのがいわゆる竹補正である。

0.7Hz 0.95Hz



微動H/V



サイト增幅特性

この方法の問題点は、補正前後におけるピーク周波数が明瞭でなければ使えないことである。また、補正前後のピーク周波数が明瞭であるような地点に対して適用した場合でも、地震観測記録から得られるサイト增幅特性と完全には一致しない。特にピークの高さの信頼性には議論の余地がある。

## 目 次

1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

# 『港湾の施設の技術上の基準・同解説』

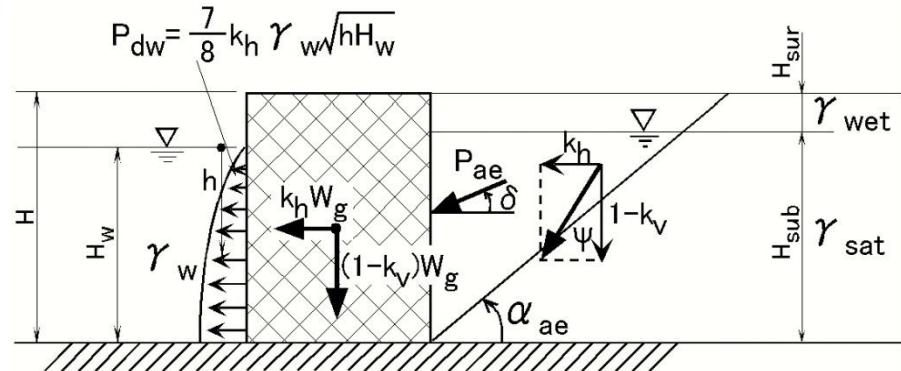


レベル1地震動：震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮し、年超過確率1/75に相当する地震動を設定

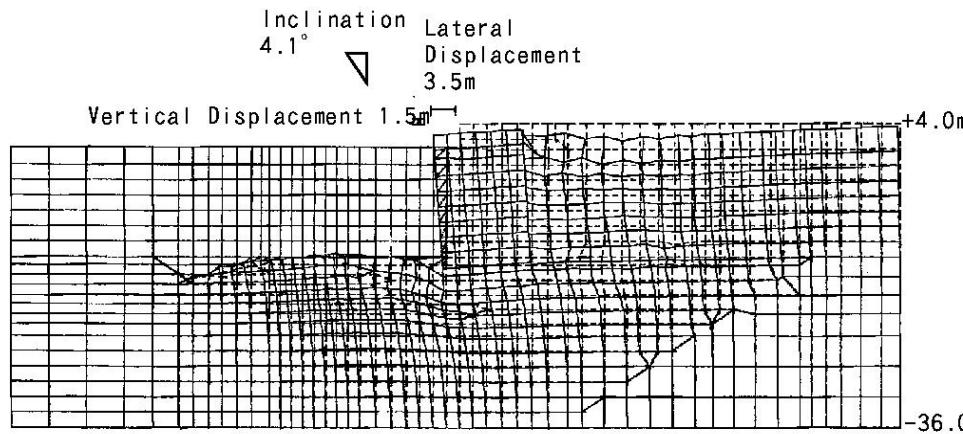
レベル2地震動：対象港湾に最大級の揺れをもたらす地震を選定し、震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮し地震動を設定

## レベル1地震動とレベル2地震動の使い分け

レベル1地震動に対する重力式岸壁の照査: 主として震度法



レベル2地震動に対する重力式岸壁の照査: 主に有効応力解析(FLIP等)



レベル2地震動に対してはある程度の変形を許容

## 港湾におけるレベル1地震動

- ★工学的基盤における年超過確率1/75の地震動.
- ★活断層地震や海溝型地震(例えば相模トラフの地震)のように震源の位置・広がりなどを特定できる地震と、その他のM7.0未満のランダムな地震を考慮<sup>1)2)</sup>.
- ★サイト増幅特性としては原則として地震観測記録から経験的に得られたサイト増幅特性を考慮<sup>1)2)</sup>.
- ★2007年ごろから徐々に整備・公開されてきている<sup>3)</sup>.
- ★微動観測結果に基づき、一つの港湾を地震動特性の異なる複数のゾーンに分け、それぞれのゾーンに対して地震動を設定することも行われている。

1) 長尾他(2005), 土木学会論文集, No.801, I-73, pp.141-158.

2) 竹信他(2014), 国土技術政策総合研究所資料, No.812.

3) 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室ホームページ,  
<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>.

# 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室ホームページ,

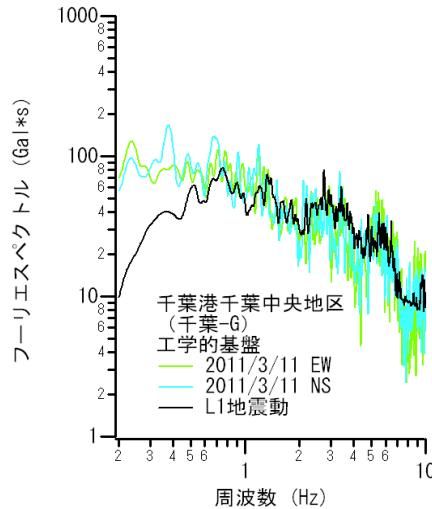
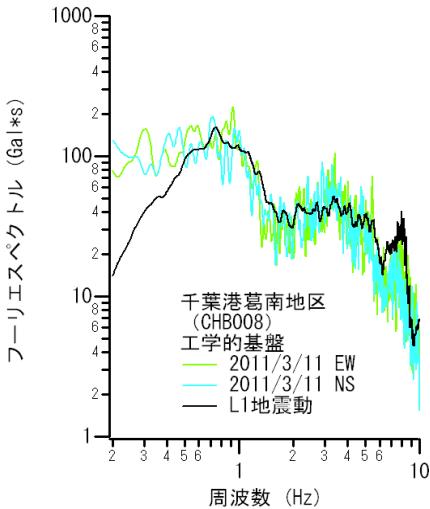
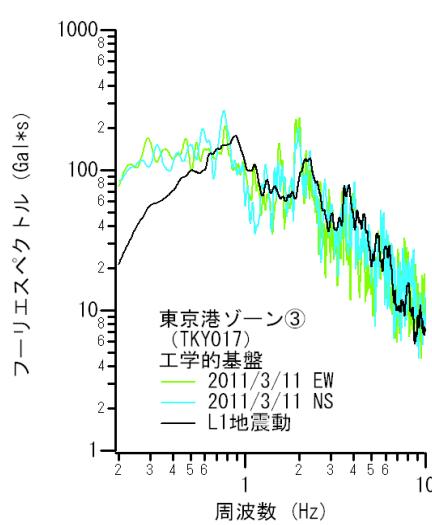
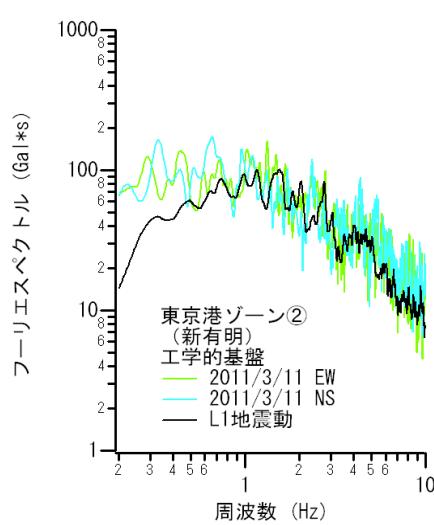
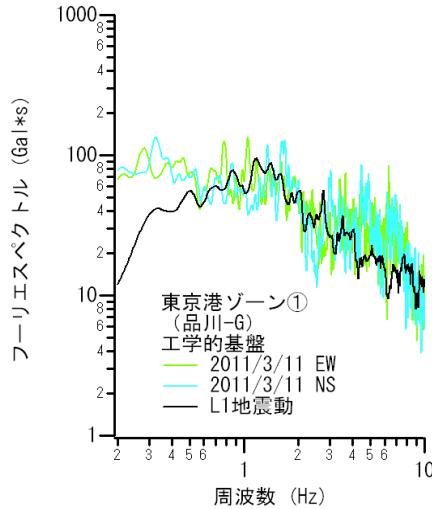
<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>.

国土交通省  
国土技術政策総合研究所  
港湾研究部  
港湾施設研究室  
〒239-0826  
神奈川県横須賀市長瀬3-1-1  
TEL:046-844-5029  
FAX:046-844-5081

研究室紹介	秋田港	9115	s9115	松	j9115	AKITA-G	39.748	140.067	-	[追加] H19.10.12
研究室メンバー new	酒田港	9116	s9116	松	j9116	SAKATA-G	38.935	139.822	-	[追加] H18.10.12
レベル1地震動	関東									
... [レベル1地震動 重要港湾以上]	日立港	9201	s9201	松	j9201	臨時観測点 (H21)	36.483	140.617	-	[追加] H18.10.12 [変更] H23.8.29 梅→松
... [レベル1地震動 (地方港湾)]	大洗港	9202	s9202	梅	j9202	IBR007	36.352	140.596	-	[追加] H18.10.12
... [サイト増幅特性及び 強震測定地点情報]	木更津港	9203	s9203	松	j9203	CHB015	35.374	139.916	-	[追加] H18.10.12
... [照査用震度算定に 当たっての留意点]	常陸那珂港	9205	s9205	松	j9205	HITACHINAKA-U	36.409	140.607	-	[追加] H18.10.12
... [港湾とその周辺のK-NET (またはKIK-net)観測点に おけるサイト増幅特性 の経験的関係を示す係数]	鹿島港	9206	s9206	松	j9206	KASHIMA-ZOKAN-U	35.934	140.693	-	[追加] H18.10.12
... [プログラムダウンロード]	東京港①	9207	s9207	特上松	j9207	SHINAGAWA-G	35.626	139.758	●	[追加] H19.11.29 東京港を ゾーニング
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	東京港②	9212	s9212	特上松	j9212	SHINARIAKE	35.623	139.790	●	[追加] H19.11.29 東京港を ゾーニング
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	東京港③	9213	s9213	特上松	j9213	TKY017	35.647	139.809	●	[追加] H19.11.29 東京港を ゾーニング
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	川崎港	9208	s9208	松	j9208	KAWASAKI-F	35.509	139.754	-	[追加] H18.10.12
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	横浜港(山下地区)	9209	s9209	松	j9209	YAMASHITA-F	35.448	139.663	●	[追加] H25.7.26 横浜港を ゾーニング
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	横浜港(標準)	9216	s9216	松	j9216	na09n	35.243	139.395	●	[追加] H25.7.26 横浜港を ゾーニング
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	横浜港(大黒地区)	9217	s9217	松	j9217	tr10s	35.273	139.404	●	[追加] H25.7.26 横浜港を ゾーニング
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	横須賀港	9210	s9210	松	j9210	KNG003	35.273	139.658	-	[追加] H18.10.12
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	横須賀港(久里浜 地区)	9215	s9215	松	j9215	港研-U	35.229	139.720	-	[追加] H18.10.12
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	千葉港	9211	s9211	松	j9211	CHIBA-G	35.602	140.103	-	[追加] H18.10.12
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	千葉港(葛南港 地区)	9214	s9214	松	j9214	CHB008	35.654	139.902	-	[追加] H19.10.12
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	北陸									
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	直江津港	9303	s9303	梅	j9303	NIG026	37.023	138.251	-	[追加] H18.10.12
... [港湾の施設の技術上の 基準・同解説について]	両津港	9304	s9304	松	j9304	NIG002	38.075	138.440	-	[追加] H18.10.12

↑ サイト増幅特性の適用性を確認してから用いる。

# 東京湾北部の港湾



★2007年頃から整備・公開されてきた各ゾーンのレベル1地震動は、約0.8Hzより高周波側では、振幅や周波数特性という点で、東日本大震災の地震動と極めて良く整合していたことがわかる。

サイトスペシフィックな設計地震動の成功例!

## 港湾におけるレベル2地震動

- ①対象港湾に最もクリティカルとなる地震(レベル2対象地震)の選定.
- ②震源パラメタの設定. ←『港湾の施設の技術上の基準・同解説』
- ③地震波の算定. ←ここでサイト特性を考慮

## —対象地震の選定—

## 対象地震の候補として

- (a) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来 ←例: 東北地方太平洋沖地震の再来
- (b) 活断層の活動による地震 ↓ 例: 岩手沖以北の巨大地震
- (c) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
- (d) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
- (e) 地域防災計画の想定地震
- (f) M6.5の直下地震

を考慮する。

(a)-(f)の中には重複するものもあり得る。

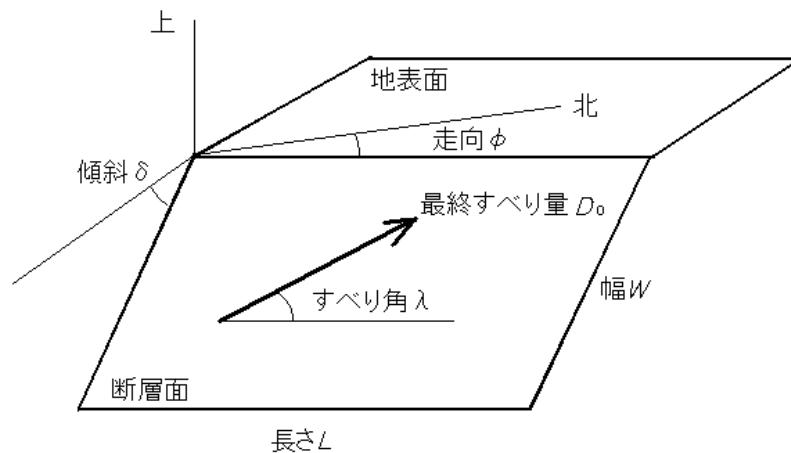
その中で、対象港湾に最大級の強さの地震動をもたらしうる地震をレベル2対象地震として選定する。

## レベル2地震動の評価において指定すべき震源パラメタ

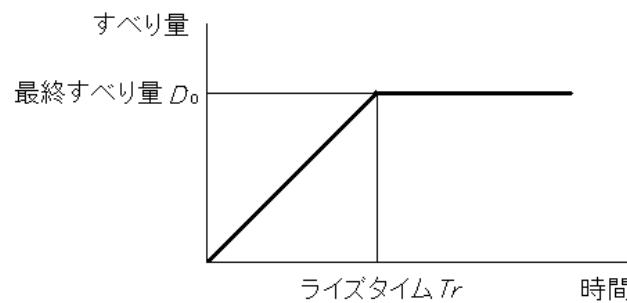
★**巨視的震源パラメタ**(断層全体のパラメタのこと)

★**微視的震源パラメタ**(アスペリティのパラメタのこと)

★**その他のパラメタ**(破壊開始点, 破壊伝播速度など)



(a) 断層パラメタの説明(その1)



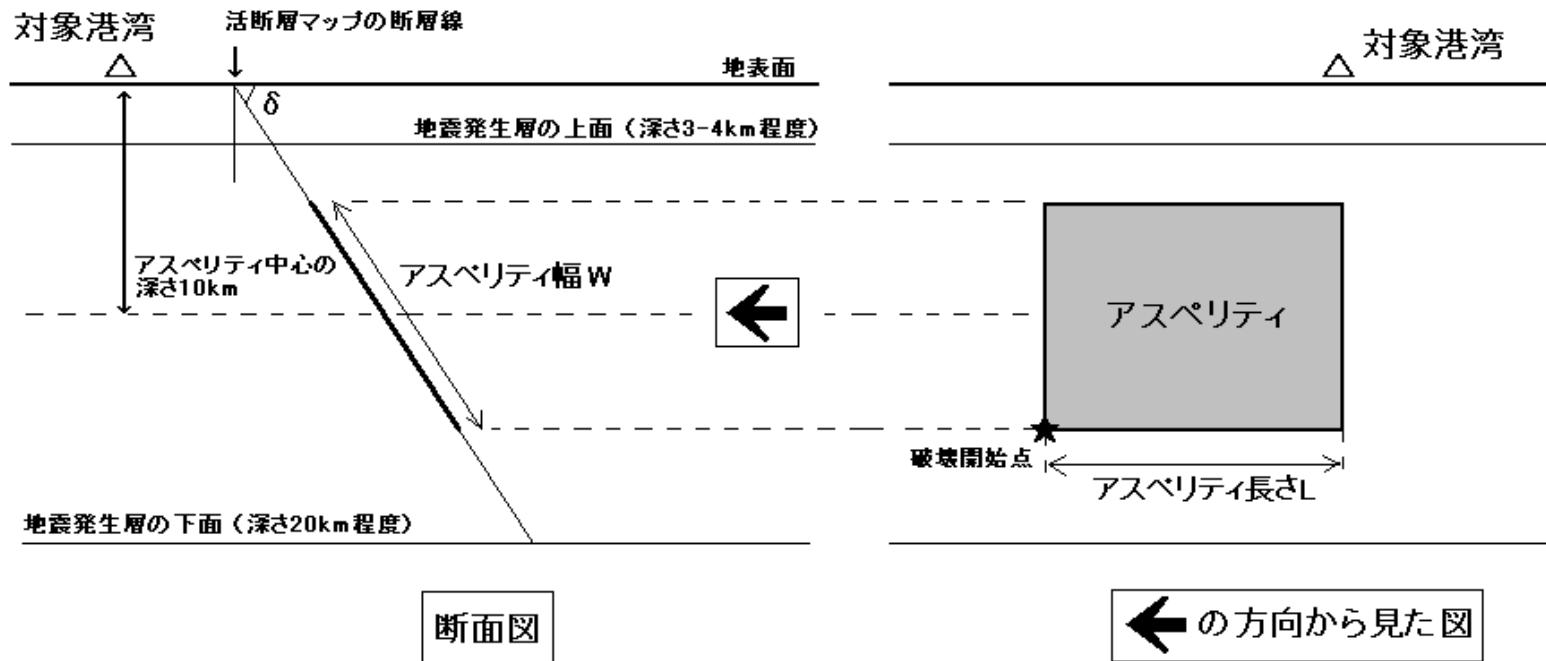
(b) 断層パラメタの説明(その2)

## 震源パラメタの設定

- 1) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来を考える場合
- 2) 活断層の活動による地震を考える場合
- 3) M6.5の直下地震を考える場合

## アスペリティの配置:

- ・深さは平均的なものを考える.
- ・破壊が対象港湾に近づいてくるケースを考慮する.



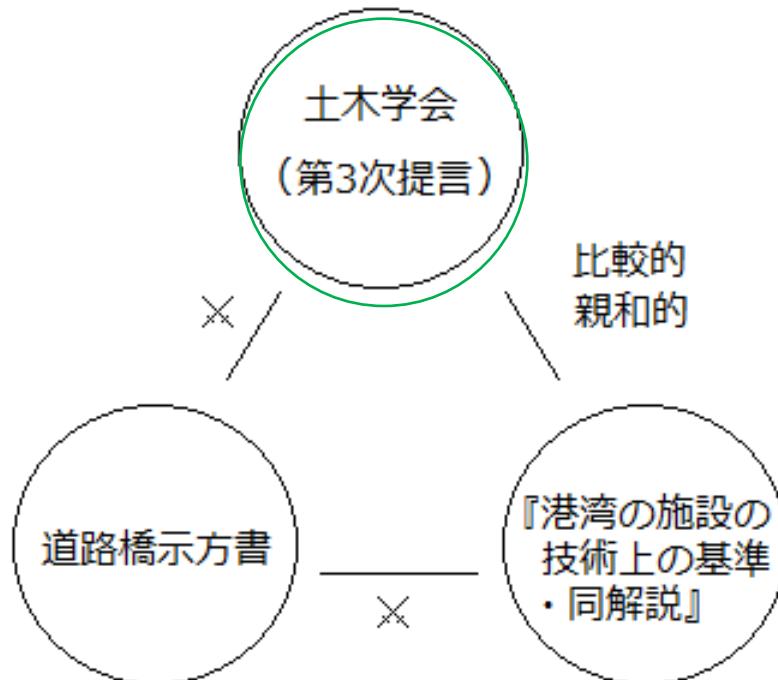
## 目 次

1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

- ◎構造物の設計にどの程度直接的に強震動研究の成果が取り入れられるべきであるか(建築分野・土木分野)？
- ◎筆者は強震動研究の成果をできるだけ構造物の設計に活かすべきであるとの立場で研究を行っているが、土木分野において筆者のような立場が必ずしもメインストリームとは言えない。
- ◎むしろ入力地震動はどのみちよく分からないものだから、その部分を精緻に検討しても、設計の改善につながらないのではないかといった考え方の方が、土木分野の耐震の専門家の間では、むしろ支配的。
- ◎こうした中で、強震動研究の成果がより幅広く理解され活用されるためには、筆者を含め強震動研究者による説明の仕方にも工夫の余地がある。

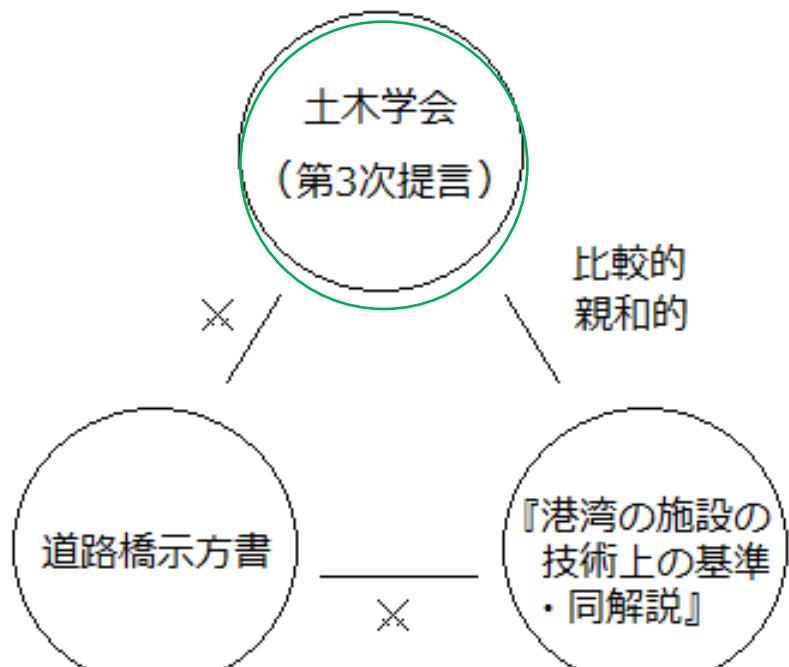
- ・土木学会から過去に出版されている提言や共通示方書は、設計地震動の設定に強震動研究の成果をとりいれることに対して比較的積極的。
- ・土木構造物の耐震基準等に関する提言(第一次提言～第三次提言)(1995～2000)は、兵庫県南部地震以前の設計荷重は過小評価であったとの認識から、レベル1地震動(兵庫県南部地震以前の設計荷重)とレベル2地震動による二段階の設計を提案したもの。

(第一次提言～第三次提言については<http://www.jsce.or.jp/committee/earth/>参照)



土木分野における設計地震動に関する様々な立場

- ・第三次提言(2000年)では「レベル2地震動は、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動であり、内陸および海溝で発生する地震の活動履歴、震源断層の分布と活動度、活断層から当該地点に至る地下構造、当該地点の地盤条件、および強震観測結果などに基づいて設定する」と述べられており、設計地震動の設定において強震動研究の成果を取り入れることに対し極めて前向き.

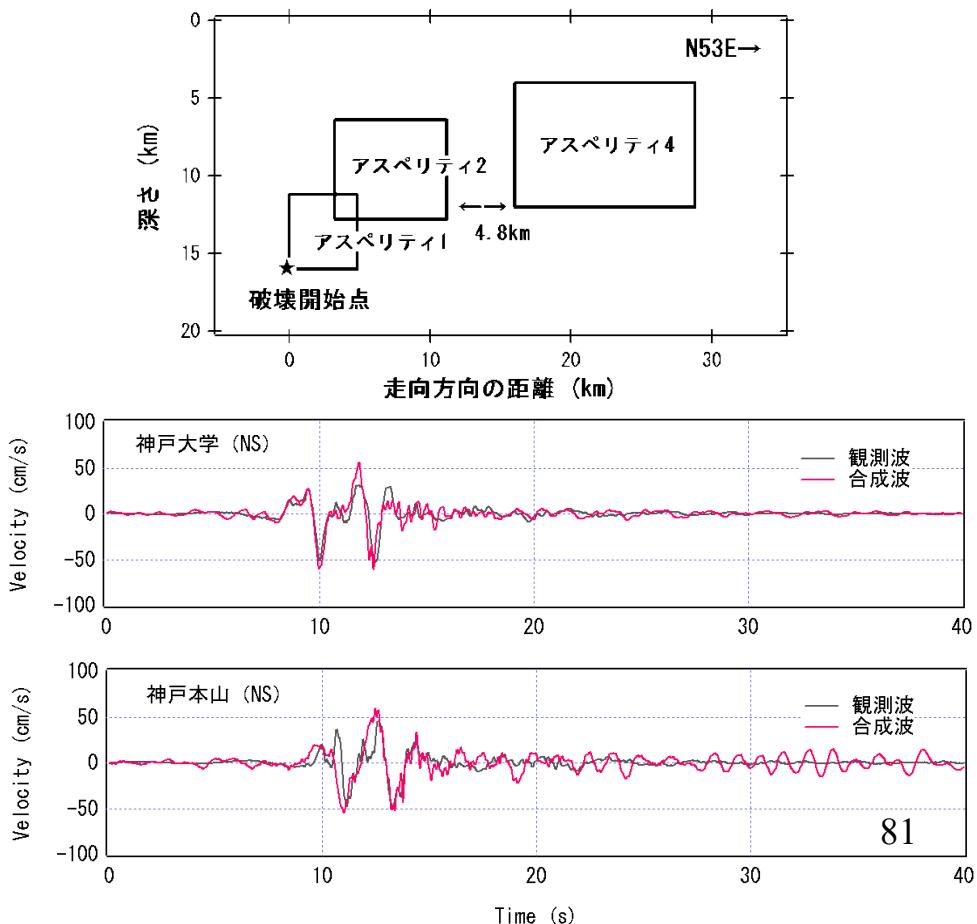
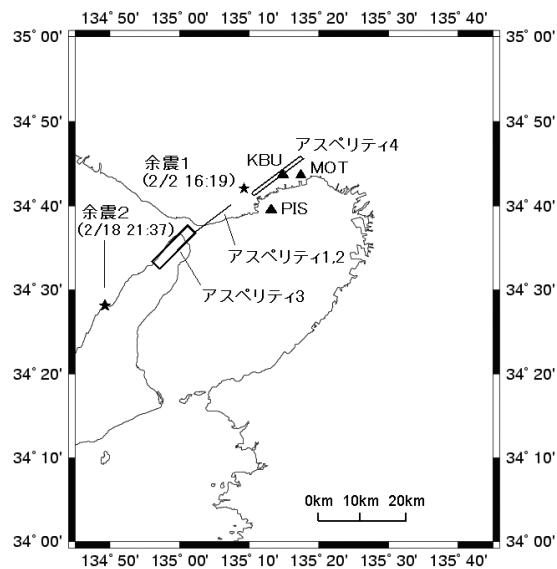


土木分野における設計地震動に関する様々な立場

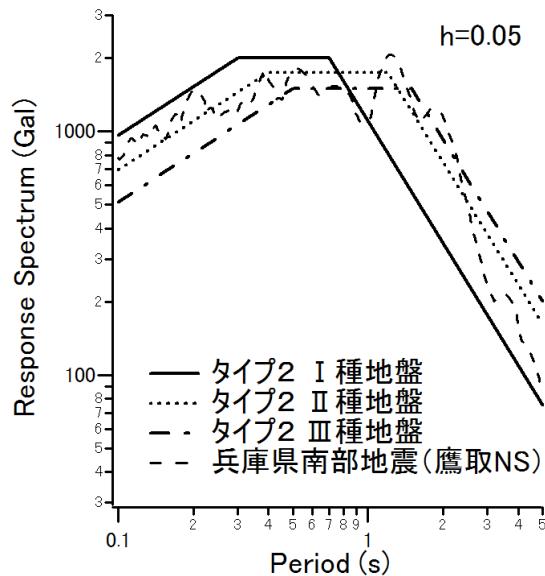
(以下は筆者の私見)

「第三次提言」において、強震動研究の成果を積極的に取り入れていこうとする強い意欲が感じられるのは、当時、兵庫県南部地震の直後で、神戸市内の地震動の観測結果や、入倉先生による解析結果が土木技術者に対して強い印象を与えていた時期であったため、強震動研究の成果に対する土木技術者の期待が特に高まっていたという時代背景もあるのではないかと考えている。

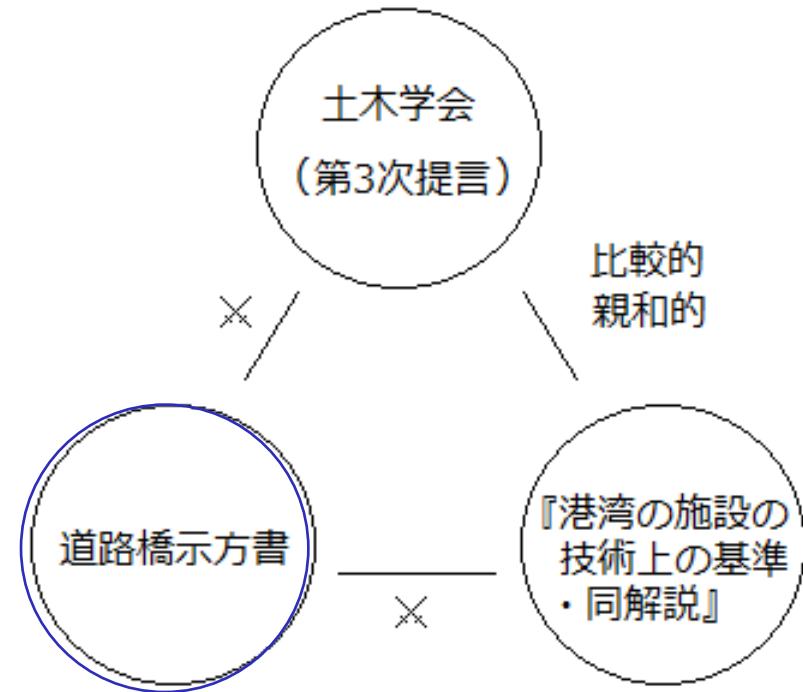
震源モデル：山田他(1999)のモルタルー釜江・入倉(1997)の改良版ーの神戸側部分



- ・実際の設計が土木学会の提言に基づいて行われるわけではない。
- ・実際の設計は、道路橋示方書をはじめとする構造物毎の指針類に基づいて行われる。
- ・それらの多くは強震動研究の成果を設計地震動の設定に取り入れることに対して必ずしも前向きではない。



道路橋示方書に示されたレベル2地震動の標準加速度応答スペクトル（タイプ2）（これに地域別補正係数を乗じたものが用いられる）



土木分野における設計地震動に関する様々な立場

←支間長200m以下の橋である限り、このように定められたスペクトルに基づいて設計すればよいので、強震動研究の成果が活用される余地は無い。

## ◎道路橋示方書について

- ・平成14年版の道路橋示方書には

「レベル1地震動及びレベル2地震動は、それぞれ、4.2及び4.3の規定により設定するものとする。ただし、建設地点周辺における過去の地震情報、活断層情報、プレート境界で発生する地震の情報、地下構造に関する情報、建設地点の地盤条件に関する情報、既往の強震記録等を考慮して建設地点における設計地震動を適切に設定できる場合には、これに基づいて設計地震動を設定するものとする」

と記載されていたが、この記述は平成24年版および平成29年版では消えている。

・このように、強震動研究の成果を設計地震動の設定に積極的に取り入れていこうとする機運は、土木分野全体としてはさほど高くない状況にあると言える。

- ◎この状況の背景には強震動研究の成熟度に対する疑念があると筆者は考えている。
- ◎例えば高橋他(2016)は「地震や津波などの将来予測には、依然として圧倒的な不確実性を伴っており、現状の技術レベルでは、これらに対して確かな安全を保証することはできない」と述べている。
- ◎川島はその著書(2019)の中で「まだよくわかっていない強震動の特性」という節を設け、「強震動の推定には多くの未知の領域が残されている」と述べている。
- ◎別な専門家の方からは、「M9.0地震の発生を予測できないのになぜ強震動予測の結果を設計に使えるだろうか」という趣旨の意見をいただいたこともある。
- ◎これらはいずれも強震動研究の成熟度に対する疑念の表明であると言える。

◎このように、強震動研究の成果を耐震設計に積極的に活用していこうとする機運が土木分野全体としてさほど高くない中で、強震動研究の成果の活用を今後どのように促していくべきであろうか？



◎我が国は地震国であり、少しでも地震に強い社会を作ること、そして、できればそれを少しでも小さなコストで実現することは、土木分野の専門家の共通の願いである。したがって、今後、強震動研究の成果の一層の活用を促すためには、強震動研究の成果の活用がこのような目標の実現に確実に寄与するものであることを、もう少し説得力を持って説明していくしかないであろう。

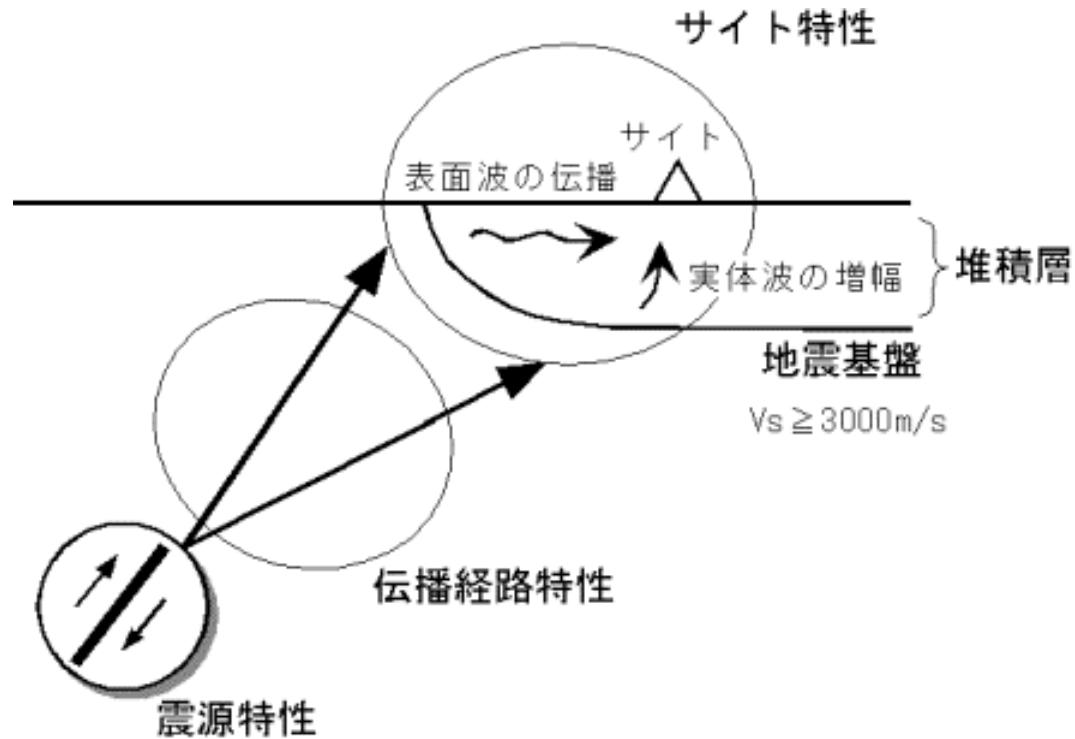
◎背景として強震動研究の成熟度に対する疑念があるのだから、強震動研究の成果を「これを丸ごと使って下さい」と言って引き渡すだけではだめで、地震動に関して確実に言えることは何であり、まだまだわからないことは何であるかを丁寧に説明することが必要。

## 目 次

1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

# 地震動に影響を及ぼす要因

- 震源特性
- 伝播経路特性
- サイト特性



①地震基盤が露頭  
→あまり揺れない



②地震基盤上に薄い堆積層  
→短周期地震動



③地震基盤上に厚い堆積層  
→長周期地震動



④地震基盤上に堆積層があり →継続時間の長い揺れ  
地形的に閉じている。

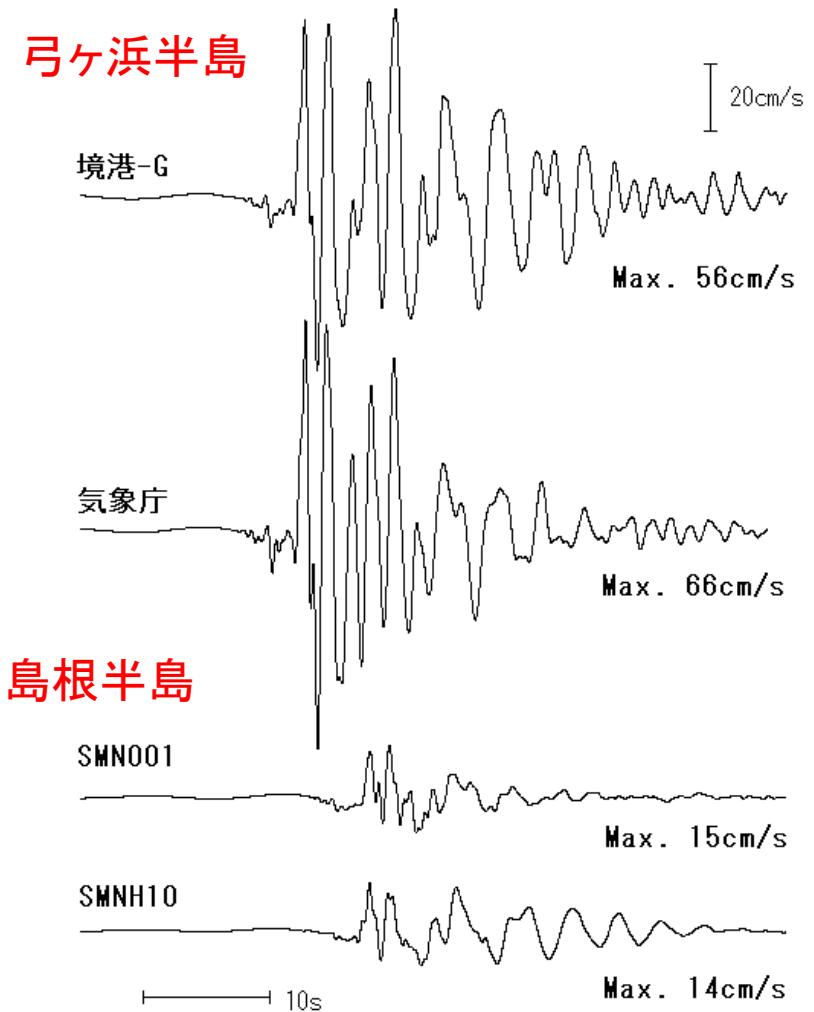


## サイト特性の重要性を示す例(その1)地震動の振幅への影響



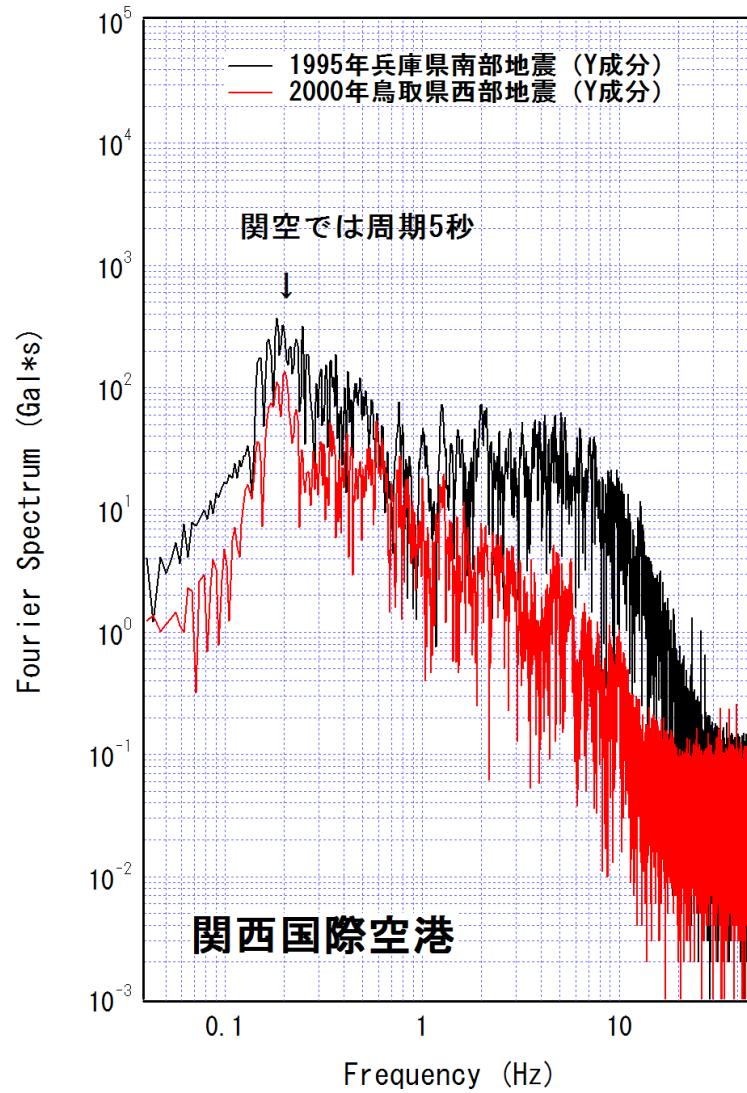
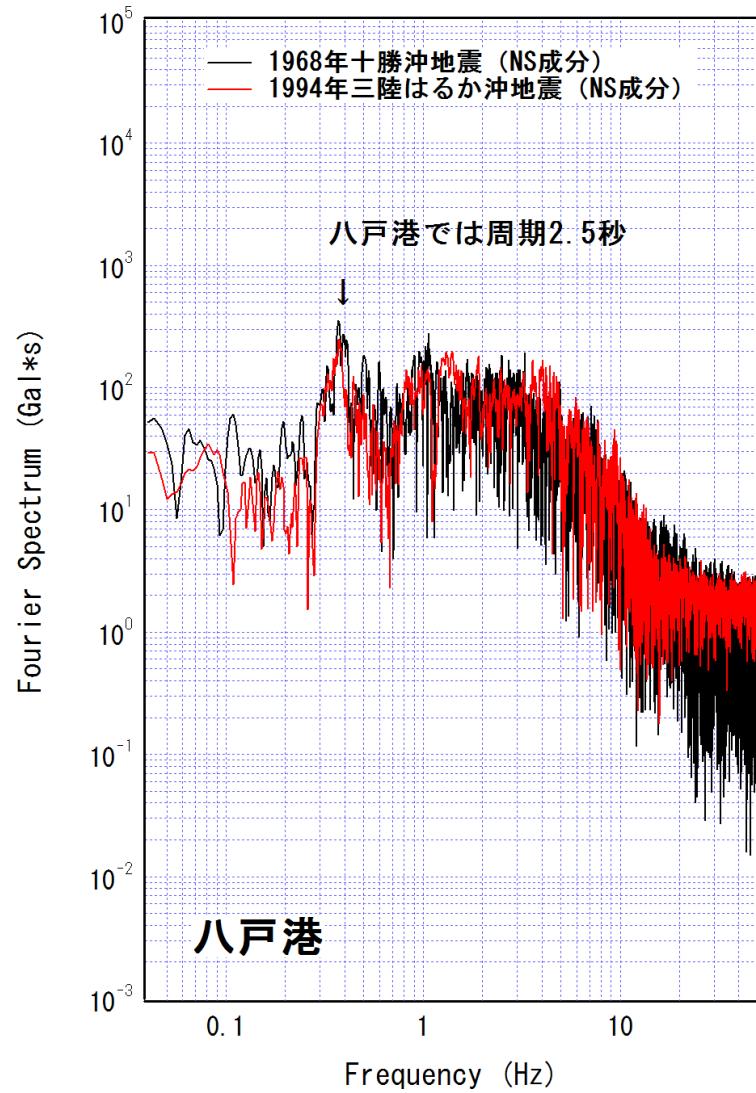
(写真は第八管区海上保安本部提供)

このように、サイト特性の影響で、同じ地震に対しても揺れやすい場所と揺れにくい場所が存在し、かつ、その振幅の違いはかなり大きい。

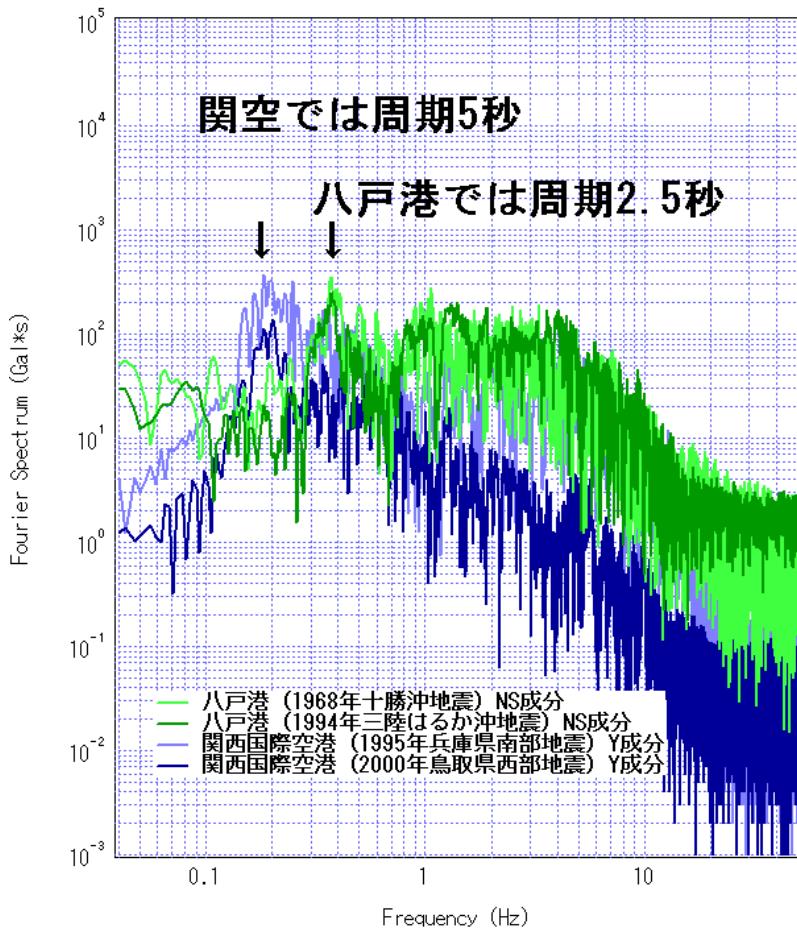


(鳥取県西部地震の記録)  
89

## サイト特性の重要性を示す例(その2)地震動の周期特性への影響



## サイト特性の重要性を示す例(その2)地震動の周期特性への影響



◎特定の場所で特定の周期の地震波が卓越しやすいのは堆積層の厚さが関係している。

◎止むに止まれぬ事情がない限り、八戸港(の強震計付近)では固有周期2.5秒の構造物を建設することは避けるべきであり、関西国際空港では固有周期5秒の構造物を建設することは避けるべきである。

以上のように、

地点間の相対的な揺れやすさ

地点毎に卓越しやすい地震動の周期

については、かなりのことが言えるようになってきている。

一方で、

振幅レベルの将来予測

が大きな不確実性を伴うことは、事実として認めなければならないであろう。

これは、どのような規模の地震がどこで発生するかという点に大きな不確実性があるからである。

2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2005年福岡県西方沖の地震(M7.0)、2007年能登半島地震(M6.9)、2007年新潟県中越沖地震(M6.8)、2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)などはいずれも事前に「その規模の地震がその場所で起る」とは考えられていなかった地震

## 目 次

1. 地震波と地震動
2. 強震動評価手法
3. サイト特性の評価
4. 港湾におけるレベル1地震動・レベル2地震動
5. 土木分野における設計地震動に関する様々な立場
6. 地震動に関して確実に言えることは何で、まだまだわからないことは何か？
7. 強震動研究の成果はどのように寄与できるか？

以上のような強震動研究に関する現状認識を踏まえ、その成果をどのように活用すれば先に述べた目標「少しでも地震に強い社会をできれば小さいコストで」に寄与することができるだろうか？

地震動の振幅レベルの将来予測が大きな不確実性を伴にも関わらず、土木構造物の耐震設計に用いる地震動をサイトスペシフィックな地震動とすることが、「少しでも地震に強い社会をできれば小さいコストで」という目標に寄与すると考えられる。そのように考える理由は次の2点。

この部分を以下においてより詳しく説明

- (a) 地震動の振幅レベルの将来予測が大きな不確実性を伴うとしても、対象地点の揺れやすさをきちんと把握し、それを反映して、揺れやすい場所では大きめの設計地震動、揺れにくい場所では小さめの設計地震動を設定すれば、設計地震動を超える地震動を受けて構造物が要求性能を満足できない事態を回避できる可能性が高まる。
- (b) サイトスペシフィックな設計地震動を選択することにより、設計地震動の周期特性が対象地点における地震動の卓越周期を反映したものとなる。それにより、対象地点により適した構造形式を設計者が選択できるようになる。

## 現状の設計標準スペクトルのレベル

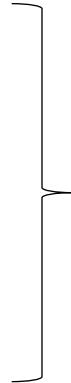
---



揺れやすい  
地点



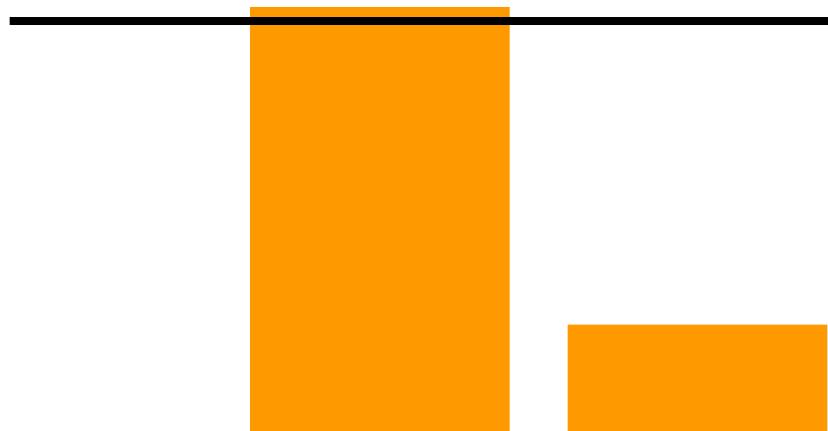
揺れにくい  
地点



ごく普通に想定で  
きる大地震による  
地震動(一般的な  
震源パラメタの下  
での地震動)

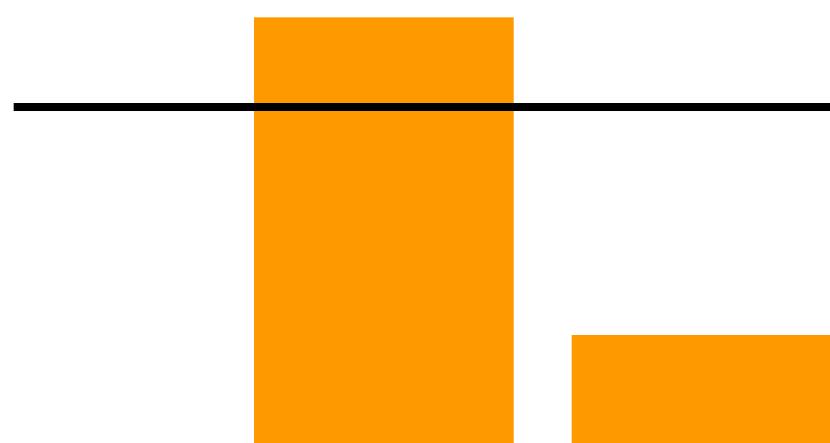
現状の設計標準ス  
ペクトルのレベル

想定外  
その1



揺れやすい  
地点      揺れにくい  
地点

想定外  
その2



揺れやすい  
地点      揺れにくい  
地点

現状の設計標準ス  
ペクトルのレベル

想定外  
その3



揺れやすい 地点      揆れにくい 地点

現状の設計標準ス  
ペクトルのレベル

## 現状の設計標準ス ペクトルのレベル

---



揺れやすい  
地点



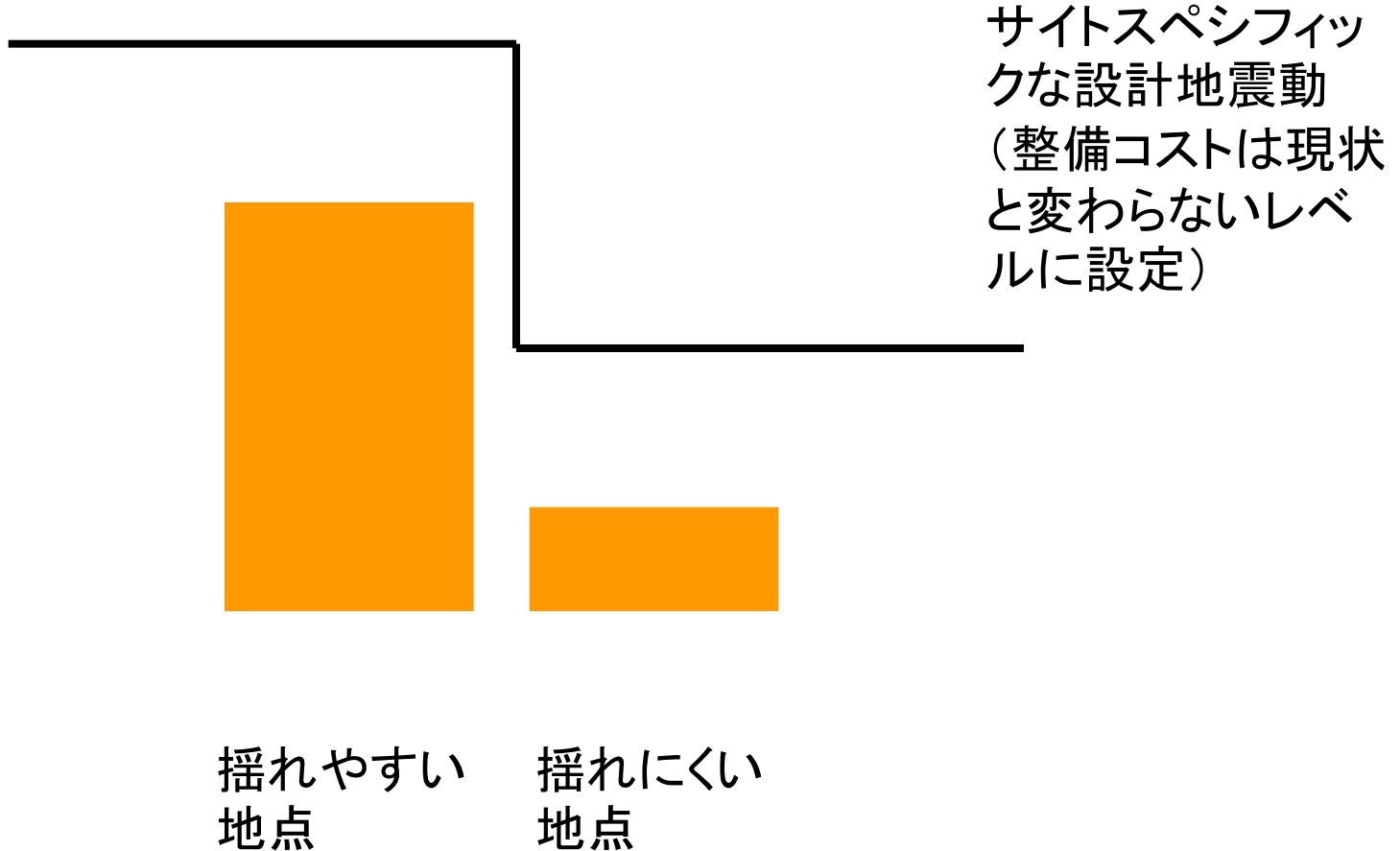
揺れにくい  
地点

サイトスペシフィックな設計地震動  
(整備コストは現状と変わらないレベルに設定)



揺れやすい  
地点      揺れにくい  
地点

想定外  
その1



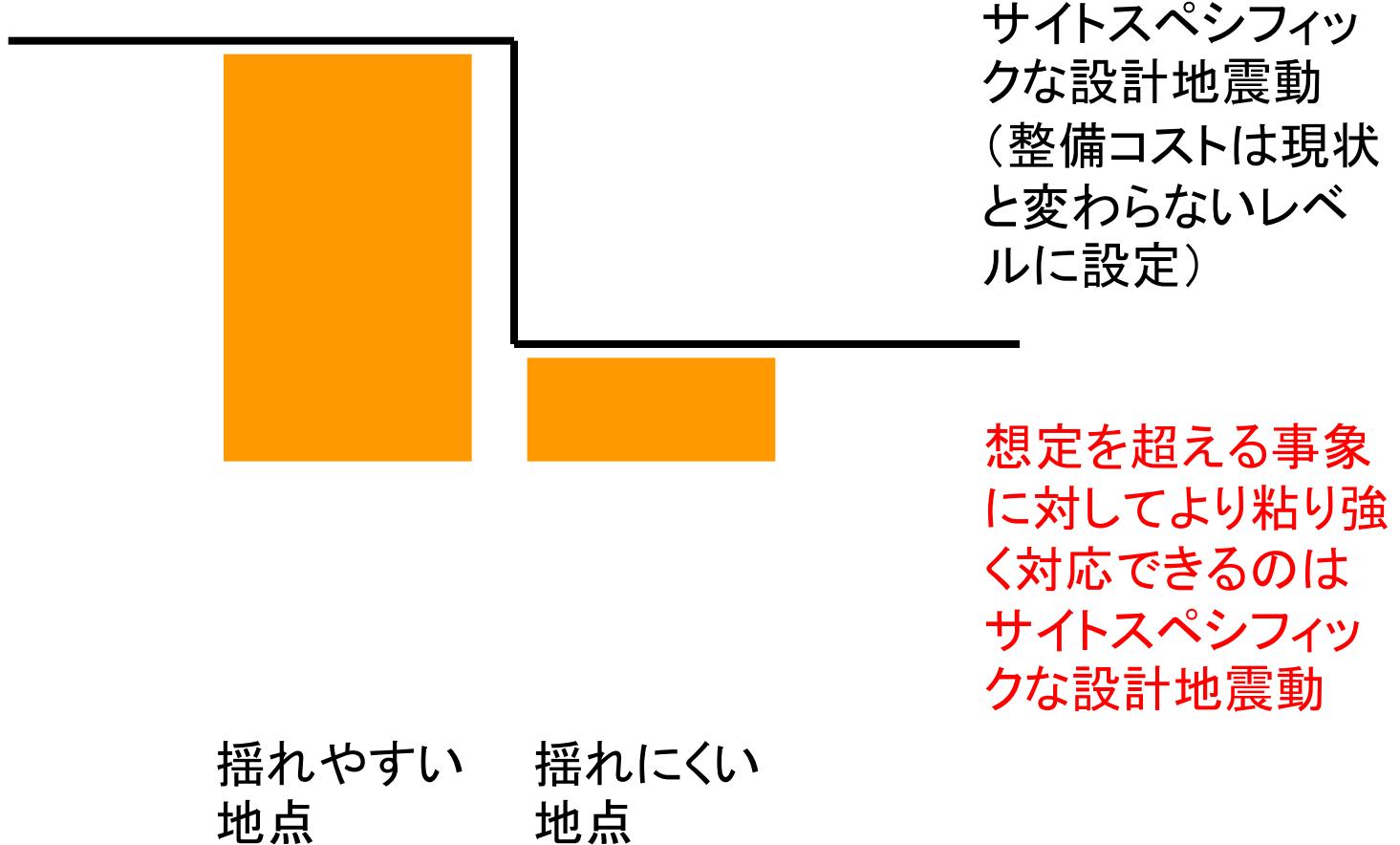
想定外  
その2



揺れやすい　揺れにくい  
地点 地点

サイトスペシフィックな設計地震動  
(整備コストは現状と変わらないレベルに設定)

### 想定外 その3



★このように、サイトスペシフィックな設計地震動を選択することにより、耐震強化のための限られた予算の範囲内で、構造物が要求性能を満たさない事態を回避しやすくなり、「少しでも地震に強い社会をできれば小さいコストで」という目標に寄与することができる。

## 今後 何が大事か

1. 国土をカバーする地震観測網を維持し、揺れに関する知識を増やす。
2. 大規模な橋や建物を設計するときには、現地で地震観測を行い、そこでの揺れの性質を把握してから、設計する。
3. 地震の揺れについての知識を広め、国土計画や防災に活用していく。
4. 石油タンクは長周期地震動の出にくい場所に造る。
5. 病院のように防災上重要な施設は揺れにくい場所に造る。
6. 耐震補強は揺れやすい場所で優先的に推進する。