

深層地盤構造を考慮した臨海部の ゾーニング手法に関する研究

Seismic zoning of coastal area in view of deep subsurface profile

長尾 毅¹, 山田雅行², 野津 厚³

Takashi Nagao, Masayuki Yamada and Atsushi Nozu

¹工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²工修 株式会社ニュージェック (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

³工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

Seismic fragility is influenced not only by subsurface profiles above engineering bedrock but also by deep subsurface profiles below engineering bedrock. We aim at presenting the method of seismic zoning in view of deep subsurface profile by use of both microtremor and strong motion record. The method employs the horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremor to classify the deep subsurface structures and site amplification factor by the spectral inversion of strong motion. We showed an example of seismic zoning for Mikawa port by the proposed method. It was also shown that frequency characteristic of site amplification factors and horizontal-to-vertical spectral ratios were in good agreement.

Key Words: Site amplification factor, Strong motion, Microtremor

1. はじめに

地盤構造は地震時の構造物の危険度を左右する主要な因子の一つであるため、地盤構造の正確な把握が防災工学上重要である点は周知のところである。この地盤構造については、これまでは主に工学基盤よりも浅い表層地盤の構造が議論されることが多かった。しかしながら、工学基盤から地震基盤に至る深層地盤構造についても地震動への影響が考えられることから、深層地盤構造の把握に関する重要性も認識が深まりつつある。例えば、地震調査研究推進本部においては「地震調査研究の推進について - 地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策」をとりまとめ、全国を概観した強震動予測地図を作成することとしているが、そのためには地震基盤から地表までの速度構造の収集・推定が不可欠である¹⁾としている。

しかしながら、深層地盤の構造に関する情報は非常に少ないのが現状であり、特に強震動の予測に必要な 3 次元の深層地盤構造が把握されている地点は

数少ない。深層地盤構造をボーリングにより把握しようとすることはその費用を考えると現実的ではない。

簡易に地盤構造を把握する手段として、常時微動の活用が考えられる。常時微動の活用による地盤構造の面的な把握に関する研究事例は数多く、常時微動の 3 成分観測により得られる水平成分と鉛直成分のスペクトル比（以下、H/V スペクトル）に着目したものや²⁾、アレー観測より得られる平均 S 波速度に着目したものがあげられるが³⁾、それらは主に表層地盤構造に関するものである。また、常時微動の活用による深層地盤構造に着目した研究例はアレー観測による位相速度を対象としたものが多い⁴⁾。3 成分観測による H/V スペクトルを対象とした深層地盤構造に関する研究事例は比較的少ないが、例えば佐藤ら⁵⁾は、周期 1 秒以上の帯域に現れる微動 H/V スペクトルのピークは地震基盤までの構造に対するレリー波の H/V スペクトルのピーク周期で説明できることを仙台の観測記録をもとに示している。

常時微動観測のうち 3 成分観測は観測の容易性が

ら地盤構造の面的把握に適していると考えられ、深層地盤構造についても微動 H/V スペクトルの長周期側のピークに注目することにより、ゾーニングを行うことが考えられる。しかしながら、微動 H/V スペクトルのピーク周期により得られる情報は基盤深さに関する間接的な情報でしかなく、地盤構造を微動 H/V スペクトルのみから推定することには困難を伴う。微動 H/V スペクトルのみから地盤構造を逆解析により推定する研究事例も存在するが⁶⁾、深層地盤への適用例は皆無である。微動 H/V スペクトルのピーク周期の長短のみによるゾーニングからは相対的な地震危険度の高低しか得られないため、地震被害程度を予測することは困難である。

ところで、近年、強震観測ネットワークが長足の発展を遂げ、日本全国を濃淡の差はあれカバーしていることから、強震記録を用いたスペクトルインバージョンにより深層地盤構造に関する増幅特性を評価することが可能である⁷⁾。スペクトルインバージョンによるゾーニングの問題点は、多くの場合、強震計の設置間隔が数キロ～数十キロメートル離れていることにあり、強震計設置地点の直近地点はともかく、多少離れた地点の評価が困難な点にある。

そこで、本研究においては、被害程度の予測まで可能なゾーニング手法として、強震記録によるスペクトルインバージョンと、常時微動を併用するゾーニング手法を提案する。すなわち、深層地盤による強震計設置地点の増幅特性はスペクトルインバージョンの結果を用い、得られた増幅特性のゾーニングは常時微動 H/V スペクトルの 1 次ピーク周期に着目することにより行うものである。この手法は、既存の強震記録を用いてサイト増幅特性を評価し、ゾーニングには簡易に適用可能な常時微動 3 成分観測を用いるものであるため、経済的かつ精度の高いゾーニングを行えることが期待できる。

以上の背景のもと、本研究では、愛知県三河港を対象サイトとして、微動および強震観測記録を用いたゾーニングを行った。

2. 検討方法

(1) 検討対象地点

本研究で検討対象とした地点は、三河港である。図-1 に平面図を示す。図中、●は微動 3 成分観測地点を示す。また、○は強震観測地点であり、三河-G は港湾地域強震観測点、その他は K-NET 強震観測点である。なお、図には標記していないが、強震観測地点においても微動 3 成分観測を実施している。検討対象地点周辺においては、愛知県によって微動アレ観測が実施されており、観測結果をもとに地震基盤に至る S 波速度構造が推定されている⁸⁾。T1 および T3 における地震基盤の推定深さは図-2 に示すようにそれぞれ 200m、250m 程度であり、ほぼ同程



図-1 検討対象地点

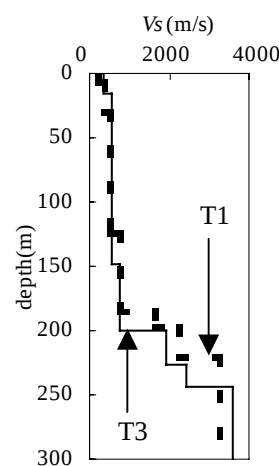


図-2 推定 S 波速度構造

度の深さと見られる。

(2) 常時微動観測

常時微動の観測時間は 3 成分観測を 11 分間とした。サンプリング周波数は 100Hz とした。3 成分観測の結果から、交通などによる擾乱の影響の少ないと考えられる 163.84 秒の区間を 3 区間抽出し、バンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウで平滑化したのち平均して H/V スペクトルを算出した。なお、微動観測に用いたセンサーは東京測振製のサーボ型速度計 VSE-11,12 であり、周期 5 秒まで振幅・位相特性ともにフラットである。

(3) スペクトルインバージョン

スペクトルインバージョンは、サイトで得られた地震観測記録 $A_0(\omega)$ から震源の特性 $A_S(\omega)$ 、伝播

経路特性 $A_P(\omega)$ ，地震観測点であるサイト増幅特性 $A_G(\omega)$ を分離する手法で，式(1)を対数表示した式(2)を，最小二乗法を用いて解くことにより，解(震源の特性およびサイト増幅特性)を得る手法である．ここに， ω は角周波数を示す．

$$A_O(\omega) = A_S(\omega) \cdot A_P(\omega) \cdot A_G(\omega) \quad (1)$$

$$\log(A_O(\omega)) = \log(A_S(\omega)) + \log(A_P(\omega)) + \log(A_G(\omega)) \quad (2)$$

本研究では，スペクトルインヴァージョンの主解析(式(2)を解く処理)を，表-1 に示す条件に基づいて抽出した，249 地震，570 地点の 2455 データ(地震観測記録)を対象として実施した．これにより，震源の特性 $A_S(\omega)$ を求めた後に，表面波等の後続波の影響を考慮することを目的として，初動到達後 163.84 秒区間の観測記録 $A_O(\omega)$ を，主解析で得られた震源の特性 $A_S(\omega)$ ，東海地域を含む東日本を対象とした既往研究⁹⁾から引用した伝播経路特性 $A_P(\omega)$ で除して，サイト増幅特性 $A_G(\omega)$ を求めた(修正解析)．

なお，ある角周波数 ω_0 におけるインヴァージョン結果の増幅特性 $A_G(\omega_0)$ が，最も小さい値を有する地点を，その角周波数 ω_0 に対する岩盤点(増幅特性 = 1.0)とすることを，スペクトルインヴァージョンにおいて必要な拘束条件とした．

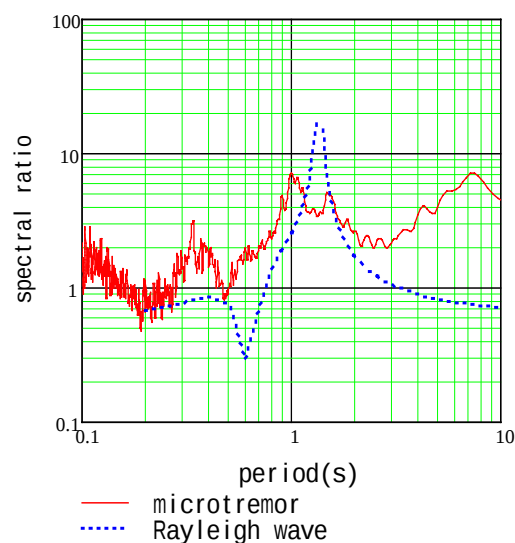
3．解析結果

(1) 三河港のゾーニング

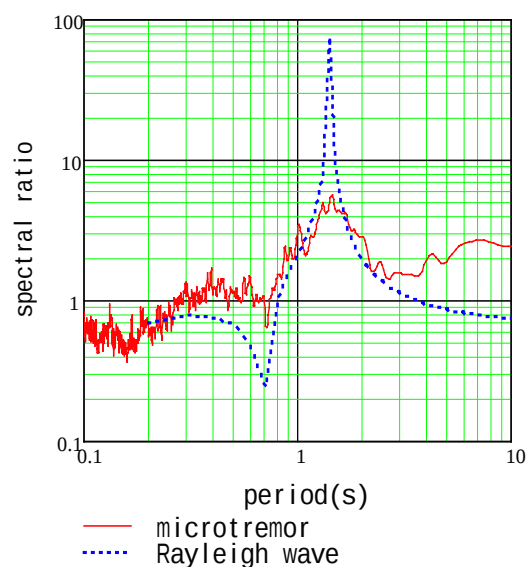
表-1 スペクトルインヴァージョンに用いる地震観測記録の条件

対象地震観測記録		強震観測網 (K-NET) 基盤強震観測網 (KIK-NET) 港湾地域強震観測
対象とする地震観測エリア		中部地域 (静岡, 愛知, 三重およびそれを取り囲む地域)
地震観測記録選定の条件	マグニチュード	4.5 以上 6.0 未満
	震央距離	150km 以下
	震源深さ	60km 以下
	最大振幅	100Gal 以下
	周波数帯域	0.2 ~ 10.0Hz
同時観測		3 地点以上
使用した観測成分		水平 2 成分の合成値
波形の抽出区間		主解析: 主要動部分, 40.96 秒区間 修正解析: 初動到達後, 163.84 秒区間
ウィンドウ		Parzen ウィンドウ (0.05Hz)

本節以降では，三河港において具体的なゾーニングの検討を行う．なお，強震・微動ともに周期 5 秒以上の帯域は信頼度に問題がある可能性があり，以下の議論では 5 秒以上のピークなどは無視する．まず，図-2 に示した T1, T3 地点における愛知県の S 波速度構造推定結果をもとにレーリー波基本モードの H/V スペクトルを算出し，本研究による微動 H/V スペクトルと比較した結果を図-3 に示す．T1 地点において微動 H/V スペクトルのピーク周期および谷周期がレーリー波 H/V スペクトルの周期よりも若干短いものの，両者は概ね良い対応を示しており，微動 H/V スペクトルのピーク周期は地震基盤までの S 波速度構造に対応している．



(a) site T1



(b) site T3

図-3 H/V スペクトルの比較

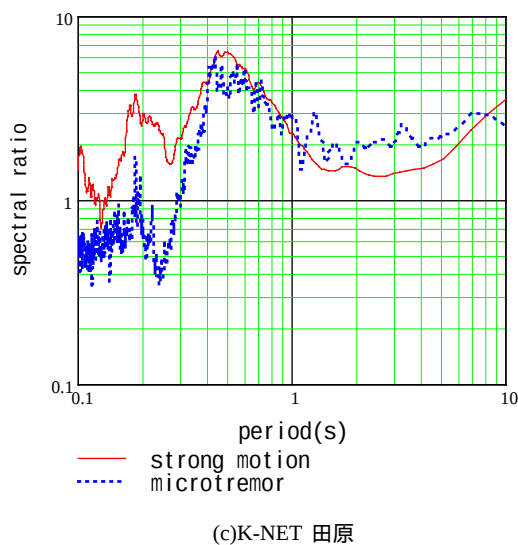
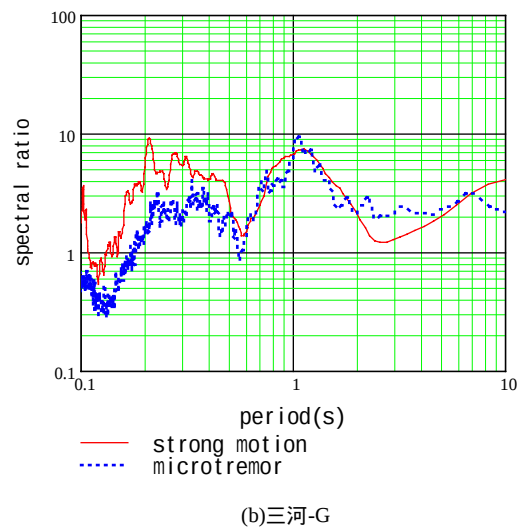
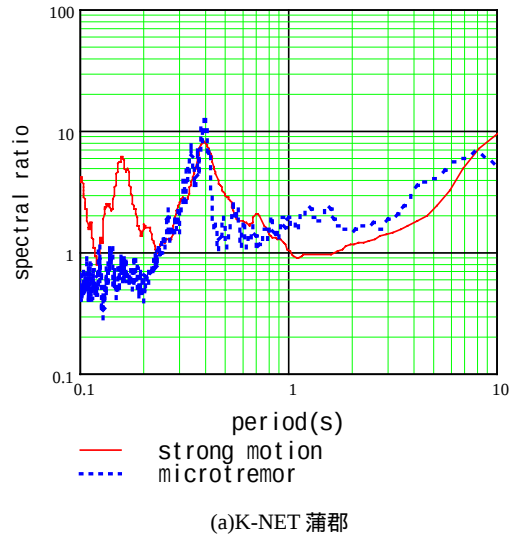


図-4 サイト増幅特性と微動 H/V スペクトルの比較

スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性と微動 H/V スペクトルの比較を図-4 に示す．卓越周期は K-NET 蒲郡が 0.4 秒 K-NET 田原が 0.5 秒，三河-G が 1 秒であり，いずれの地点においても強震記録によるサイト増幅特性と微動 H/V スペクトルのピーク周期はよく一致している．よって，微動 H/V スペクトルの 1 次ピーク周期に着目することにより，ゾーニングを行うことが可能であると考えられる．

次に，サイト増幅特性と，強震計設置地点近傍の微動 H/V スペクトルの比較を行った．まず，K-NET 蒲郡近傍地点については，1 地点を除いて卓越周期は 0.4 秒程度であったため 臨海部についても K-NET 蒲郡と同じゾーン区分としても良いと考えられる．また，三河-G 近傍についても同様であった．これに対して K-NET 田原のサイト増幅特性と近傍の臨海部地点の微動 H/V スペクトルを比較すると，図-5 のようになり，近傍臨海部地点のピーク周期は 1 秒に近く，K-NET 田原のサイト増幅特性のピーク周期とは明らかに異なっていることが分かる．これら臨海部のゾーン区分としては 1 秒にピークを有する三河-G のゾーンに分類すべきであるといえる．この理由としては，当該地点近傍で盆地構造に起因する深層地盤の急激な変化があることが示唆される．また，このことは，物理的に近いというだけの理由で基盤の浅い地点のサイト増幅特性を他の地点に適用することは危険側の評価となる可能性があることを示唆するものであり，強震と微動の併用による本方法の有効性を示すものである．

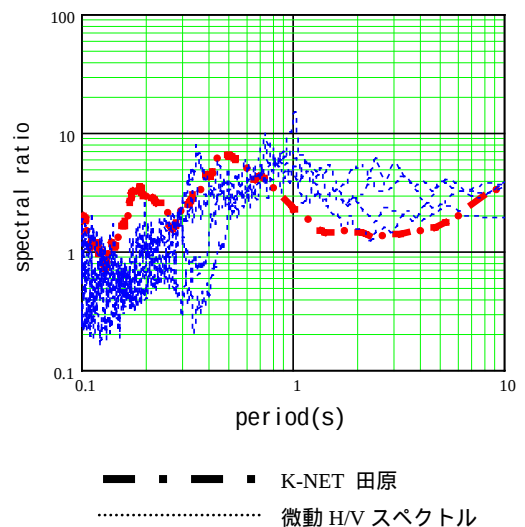


図-5 K-NET 田原周辺のスペクトルの比較

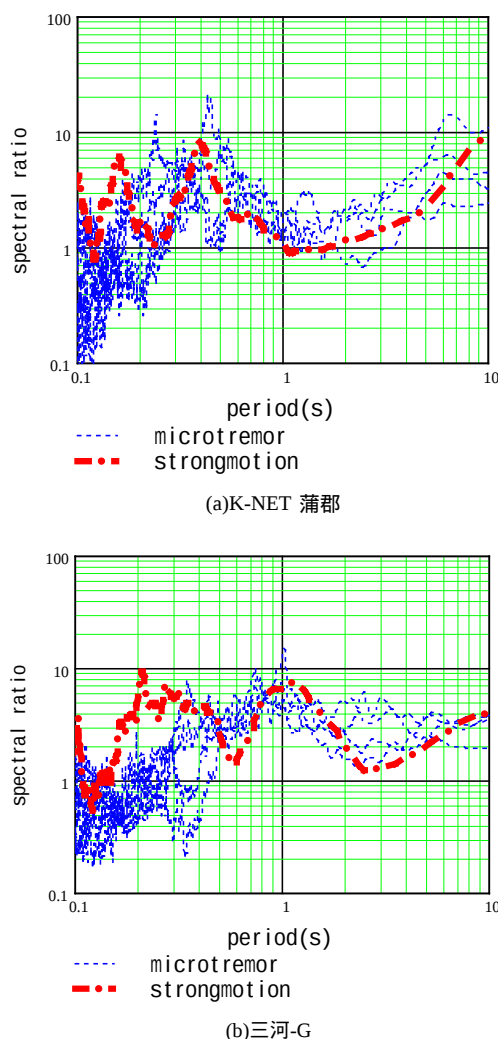


図-6 サイト増幅特性と微動H/Vスペクトルの比較

これより三河港については、K-NET 蒲郡近傍を除いては三河-Gのゾーン区分とすることが適切と考えられる。図-6に、ゾーン区分ごとのサイト増幅特性と微動H/Vスペクトルの比較を示す。また、図-7には、三河港におけるゾーニングの結果を示す。なお、T1、T3地点のような内陸部については、図-3に示したように微動H/Vスペクトルのピーク周期がT3地点で1.4秒であり、三河-Gの1秒の特性を当てはめると危険側の評価となる可能性がある。このように、強震計が対象エリアの中で相対的に地震基盤の浅い地点にだけ設置されている場合には、本研究の方法は適用範囲が限られることになる。この問題の対処方法については今後の課題である。

(2) ゾーニングの精緻化に向けた今後の課題

ここまでの検討により、微動H/Vスペクトルと強震記録を用いたスペクトルインヴァージョンを併用することにより深層地盤構造に関するゾーニングを行うことが可能であることが示された。しかしなが

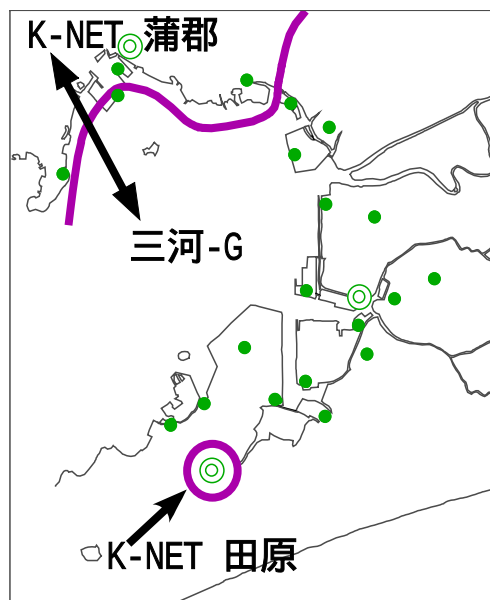


図-7 三河港ゾーニング

ら、強震計の設置されている地点は限定されているのが現状であり、今後も大幅な増加は見込めないと考えられる。

微動結果を併用することにより、微動観測地点において、あるサイト増幅特性を割り付けることの妥当性の判断は可能であるが、強震計の設置されているサイトの地盤条件によっては、過大に安全側もしくは危険側の評価となる場合が生じることも考えられる。このため、今後は、ゾーニングの精緻化に向けて、サイト増幅特性の空間的な変動や、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の調和性についての更なる検討が必要であると考えられる。さらに、表層地盤構造も反映したゾーニング手法についても検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、三河港を対象に、微動および強震記録を用いて深層地盤構造に関するゾーニングを行った。本研究の主要な結論は以下の通りである。

強震記録のスペクトルインヴァージョンによるサイト増幅特性を用いることにより、強震計設置地点の強震動予測に基づいた被害程度の予測まで可能なゾーニングを行うことが可能である。

地震基盤に至るS波速度構造に対するレーリー波基本モードのH/Vスペクトルと微動H/Vスペクトルの1次のピーク周期は調和的であり、微動H/Vスペクトルの1次のピーク周期は当該地点の地震基盤の深さに対応している。

以上により、強震記録のスペクトルインヴァージョンにより得られるサイト増幅特性と、常時微動観測により得られるH/Vスペクトルの長周期側のピー

ク周期に着目することにより，深層地盤に関するゾーニングを合理的に実施することが可能である．

本方法によるゾーニングは，相対的な地震危険度の高低のみならず，強震動予測に基づいた定量的な地震危険度の評価にも有効である．また，微動と強震動の両者を併用することにより，特に基盤深度の急変部が含まれる場合に，物理的に近いというだけの理由で危険側のゾーニングを行ってしまう危険性を回避することができる．

本研究で対象としたサイトにおいては，スペクトルインヴァージョンによるサイト増幅特性と，微動 H/V スペクトルの短周期側の周波数特性は調和的である．なお振幅特性についても，微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性は調和的であった．

謝辞：微動観測の実施にあたっては，国土交通省中部地方整備局・名古屋技術調査事務所のご支援をいただきましたことを感謝します．K-NET 強震観測記録については独立行政法人防災科学技術研究所のホームページ(<http://www.k-net.bosai.go.jp>)より入手しました．また，港湾地域強震観測網の記録については国土技術政策総合研究所のホームページ(<http://www.ysk.nilim.go.jp>)より入手可能である．

参考文献

1) 文部科学省地震調査研究課：地震調査研究推進本部の

活動と地下構造調査，第 2 回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集，pp.1-3，2001

- 2) 例えば，森 伸一郎，俵 司：常時微動測定による松山平野の三次元地盤構造の推定，構造工学論文集，Vol.47A，pp.529-538，2001
- 3) 例えば，足立雅樹，川名 太，長尾 毅，紺野克昭：常時微動観測を用いた名古屋港の S 波速度構造に関する検討，第 27 回地震工学研究発表会，CD-ROM，2003
- 4) 例えば，山中浩明，山田伸之：微動アレイ観測による関東平野の 3 次元 S 波速度構造モデルの構築，物理探査，第 55 巻，第 1 号，pp.53-65，2002
- 5) 佐藤智美，川瀬 博，松島信一：微動と S 波，P 波，coda から求められる地盤特性の違いとその理論的解釈，地震第 2 輯，第 51 巻，pp.291-318，1998
- 6) 砂田尚彦，澤田 勉，三神 厚，辻原 治：微動記録を用いた地盤各層の S 波速度の同定と妥当性の検討，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.445-448，2001
- 7) 岩田知孝，入倉孝次郎：観測された地震波から，震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震 2，Vol.39，No.4 pp.579-593，1986
- 8) 文部科学省：2003 年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集，2003
- 9) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，No.556，pp.15-24，2002