

横浜市における常時微動および強震観測記録によるH/Vスペクトル比特性の比較検討 Study on comparison of H/V spectral characteristics between microtremor and seismic motion record in Yokohama

荻本孝久¹, 山本俊雄¹, 石井 匠¹, 杉本 実², マニユエル ナバロ³
Takahisa ENOMOTO¹, Toshio YAMAMOTO¹, Takumi ISHII¹, Minoru SUGIMOTO² and Manuel NAVARRO³

¹ 神奈川大学工学部, Faculty of Engineering, Kanagawa University

² 元横浜市環境研究所, Former Yokohama Environmental Science Research Institute

³ アルメリア大学理学部, Department of Applied Physics, Almeria University

SUMMARY: Recently, inland type earthquake at capital region is predicted and several disaster mitigation measures are considered. Investigation of site effect due to surface soil structure is basically important for the estimation of damage distribution. Usually, H/V spectrum obtained from microtremor is used for the estimation of site effect. In Yokohama City, a dense seismic station network was installed constituted by 150 seismic stations. So, we observed microtremor at 150 sites. The soil structure at each site is quite different and was identified from SPT and PS Logging Test and we can confirm the difference of soil structure. In this paper, we would like to present the applicability of microtremor characteristics by comparing the H/V characteristics between microtremors and seismic motions.

1 はじめに

近年, 首都圏直下型地震の発生が危惧されており, 様々な地震防災対策の検討が行われている。中でも対象地域の表層地盤構造や地震動伝播特性を詳細に把握することは基礎的な地震防災上重要な課題となっている。震度分布や地震動特性を評価する方法として, 多数のボーリング調査データの収集を行って検討するのが望ましいが, 経費や時間, 社会条件や自然条件からも全ての場所で調査データの収集を行うことは困難である。それに対し, 常時微動観測は簡便でコストもかからないため多く活用されている。しかし, その解釈や適用限度に関しては依然として曖昧な点が残されているため, 有用性や適用性を明確にすることにより, 精度の高い評価方法として利用できるようにする必要があると考えられる。

横浜市においては, 150地点の高密度な地震観測網[1]が整備されており地震観測記録が公開され, 各観測点の地盤調査結果の情報についても整備されている。また, 地質・地形区分による増幅特性を用いて震度分布を予測した地図[2]が公表されている。一方, 大町らは横浜市内の公立小学校において常時微動観測を行い, H/Vスペクトルの特性から地盤構造の特性の推定が可能であり常時微動の有用性を示した[3]。V. H. S. Rodriguezらは, 横浜市の地震観測網により観測された地震記録と常時微動観測記録のH/Vスペクトルの特徴を分析し, 地盤区分法の提案を行っている[4]。本研究では横浜市の地震観測網を構成する150地点で常時微動観測を実施し, 同一地点で観測された強震観測記録と常時微動観測記録を解析し, H/Vスペクトル比での比較を行った。また, 各観測地点の地盤情報から地盤構造モデルを作成し, 1次元地盤振動解析による地盤の周波数伝達関数を算定した。これらの相関性を考慮して, 横浜市における常時微動観測結果により得られるH/Vスペクトル比の有用性について検討した。

2 横浜市の地形・地質

横浜市の地形・地質について, Fig.1に示すように西側の丘陵部から東側に標高が低くなり, 台地・丘陵地から

低地に移行する。台地・丘陵地を開析する樹枝状の河川沿いの低い段丘や谷底低地は軟弱な地盤を構成し, 水害を受けやすい地域となっている。また, 東部の海岸沿いの臨海地域には広く埋立地が分布している。表層地質は台地・丘陵地では関東ローム層が分布し, 低地は沖積層等から成り, 臨海部の低地に分布する沖積層は軟弱で, 最大50m程度の層厚を有しており地震動を増幅させたり液状化現象を引き起こす可能性が指摘されている。

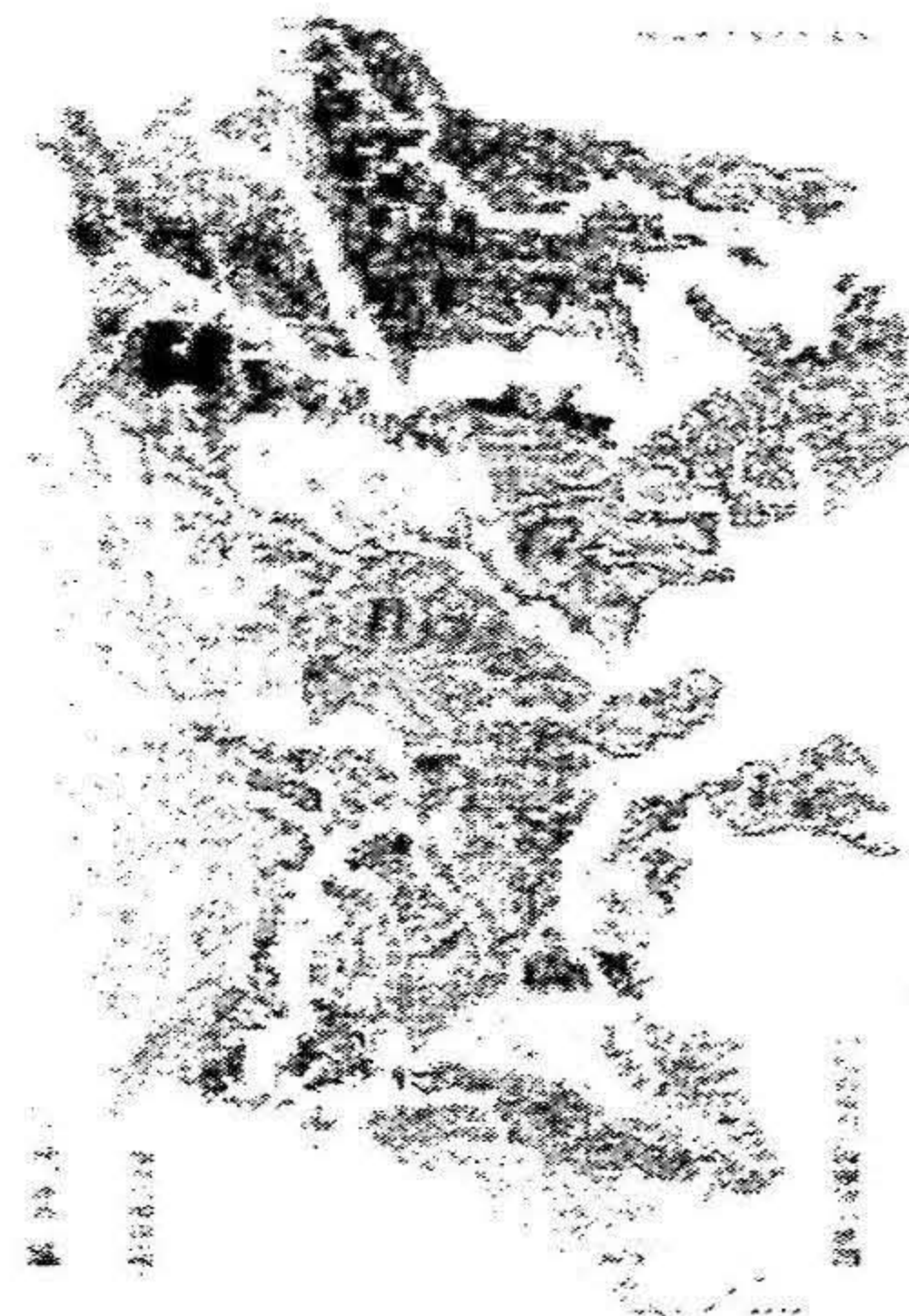


Fig.1 Geological Map of Yokohama City [5]

3 常時微動および強震記録のスペクトル解析

3.1 常時微動観測

横浜市が, 地震による災害応急対策を目的として構築した「高密度強震計ネットワーク」の強震計設置箇所150地点は Fig.2に示されている。本研究では, これら150地点において強震計の直近(半径約5m程度以内)で常時微動観測をおこなった。観測は, 2001年から2004年度にかけて実施し, 2001年度12地点(神奈川区), 2003年度に111地点, 2004年度に新たに27地点の合計150地点で常時微動観測を行い観測記録の解析を行った。



Fig.2 Distribution of seismic stations constituted by the Yokohama City Dense Accelerometer Network

3.2 観測方法

常時微動観測には SPC-51K (東京測振) を使用した。微動センサーは強震計設置位置から 5m 以内に設置し、水平動 2 方向 (NS, EW 成分), 上下動 1 方向 (UD 成分) の合計 3 方向成分について、サンプリング周波数 100Hz で 180 秒間観測を行った。観測記録の波形およびフーリエスペクトルの 1 例 (tt06) を Fig.3 に示した。

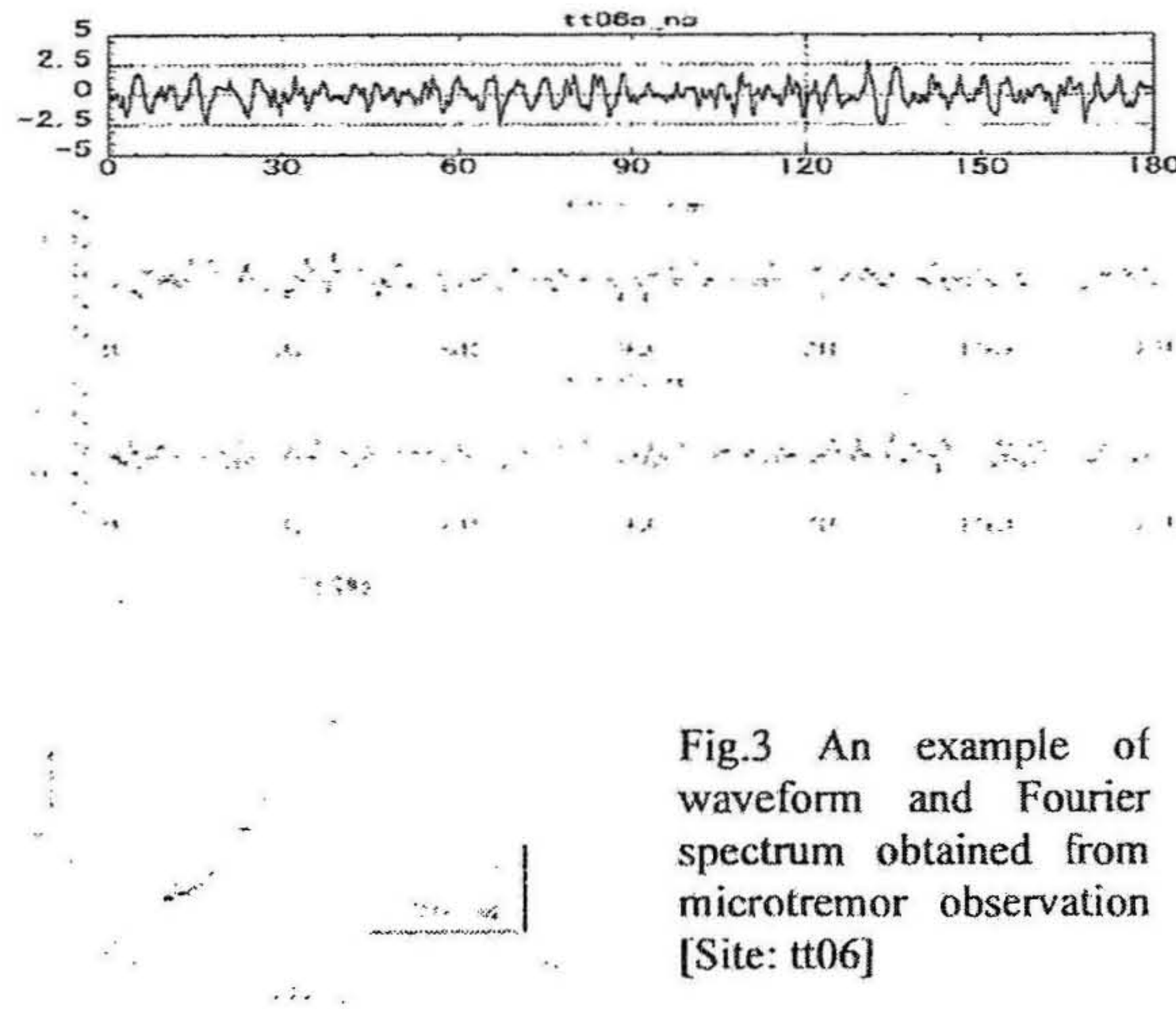


Fig.3 An example of waveform and Fourier spectrum obtained from microtremor observation [Site: tt06]

3.3 強震観測記録

横浜市の高密度強震計ネットワークでは、過去に起きた地震の震源情報及び強震計によって記録されたデータをインターネットより公開している。本研究で解析に用いた強震記録は、2001 年 1 月～2004 年 6 月までに発生した地震の中で、M5 以上で震源深度が深く、横浜地域より比較的遠い遠地地震であることを選定基準として 8 地震を選定した。8 地震の地震情報を Table 1 に示す。

3.4 H/V スペクトル比の解析

強震記録の解析に当たって、比較的表面波成分が多くなると考えられるコーダ部に着目し、公開されている 3 成分の個別のデジタルデータファイルを 1 つにまとめ、物理値 (加速度値) に変換した。観測記録の波形およびフーリエスペクトルの 1 例 (tt06) を Fig.4 に示した。次に、この時系列波形 (NS 成分) から、振幅絶対値による累積曲線を求め、累積値が 80% に達した部分の時刻から 20.48 秒を抽出し、FFT 法によりフーリエスペクトルを算定した。

Table 1 Basic information concerned to 8 earthquakes used in this study

No	発生日時	震源位置	規模	震央の位置	No	発生日時	震源位置	規模	震央の位置
1	2002年 2月12日 22時44分	北緯 35度59分 東経 141度08分 深さ 49km	M5.5	茨城県北東部	5	2002年 9月20日 12時35分	北緯 35度22分 東経 140度30分 深さ 70km	M5.8	千葉県南部
2	2003年 5月12日 0時57分	北緯 35度37分 東経 140度08分 深さ 47km	M5.2	茨城県南部	6	2003年 10月15日 16時30分	北緯 35度51分 東経 140度06分 深さ 74km	M5.1	千葉県北部
3	2003年 5月17日 23時33分	北緯 35度33分 東経 140度35分 深さ 47km	M5.1	千葉県北東部	7	2003年 10月31日 10時05分	北緯 37度38分 東経 142度20分 深さ 33km	M5.8	宮城県東部
4	2003年 5月25日 18時24分	北緯 38度35分 東経 141度38分 深さ 71km	M7.0	宮城県北部	8	2003年 11月15日 3時44分	北緯 35度43分 東経 141度17分 深さ 49km	M5.8	茨城県東部

スペクトル解析に当たっては、常時微動、強震記録とも同様にバンド幅 0.3Hz の Parzen Window により平滑化を行った。さらに NS 成分, EW 成分のスペクトルを相乗平均して水平 2 次元成分 (H) を求め、それを上下成分のスペクトル (V) で除して H/V スペクトル比を作成した。

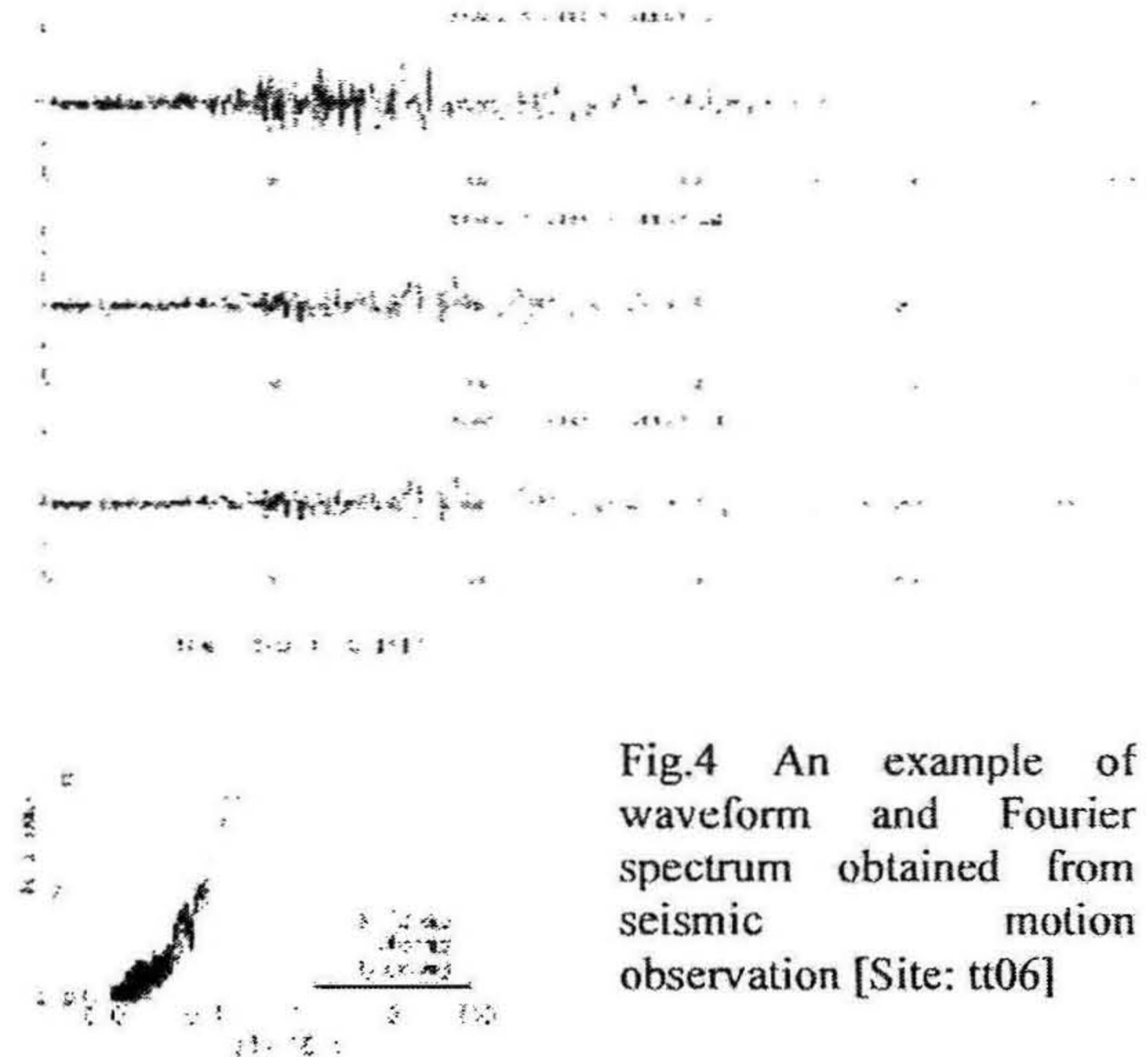


Fig.4 An example of waveform and Fourier spectrum obtained from seismic motion observation [Site: tt06]

4 H/V スペクトル比の比較

4.1 強震記録と常時微動の比較

観測地点 150 地点ごとに観測された 8 つの強震記録の H/V スペクトル比を重ね合わせ、それを常時微動の H/V スペクトル比と比較しつつ、平均の H/V スペクトル比を作成した。その際に明らかに特異なケースは削除した。そして最終的に強震観測記録による平均 H/V スペクトル比と常時微動観測記録による H/V スペクトル比を重ね合わせて比較検討した。1 例 (tt06) として Fig.5 に両者の H/V スペクトルを重ね合わせた結果を示した。

また、両者の観測記録の H/V スペクトル比から個別に抽出される卓越周期 T とその周期に対応する H/V の比を増幅率 R として個別に抽出した。さらに周期 0.1 秒から 2.5 秒の周期範囲で H/V スペクトル比の曲線が囲む面積をスペクトル面積 S として個別に算定し、これら 3 つの値 (T, R および S) について常時微動観測結果に基づく値と強震観測記録に基づく値について両者の相関性を検討した。それぞれの結果を Fig.6 (T), Fig.7 (R) および Fig.8 (S) に示した。

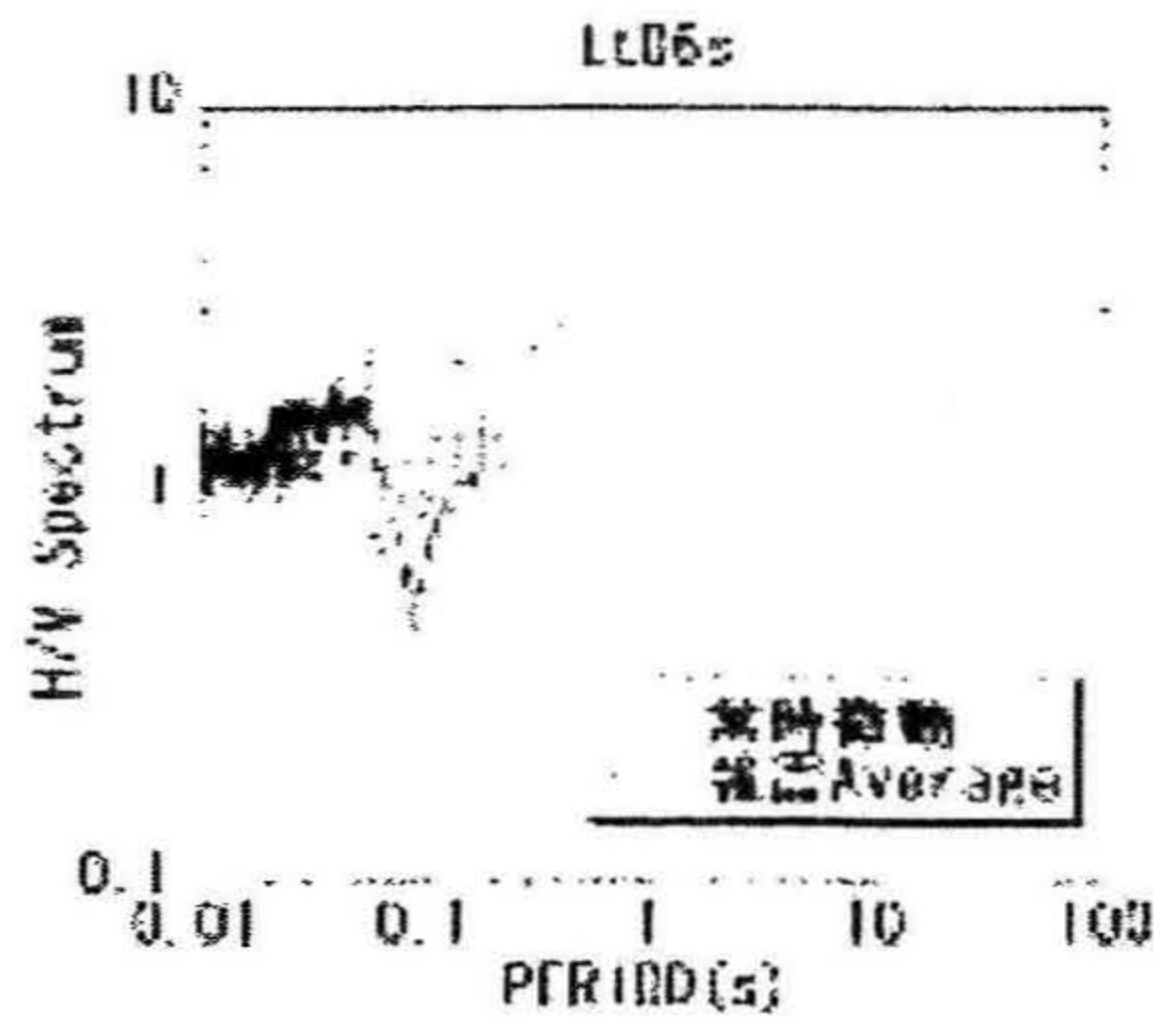


Fig.5 Comparison of H/V spectral characteristics between microtremor and seismic motion observation record [Site: tt06]

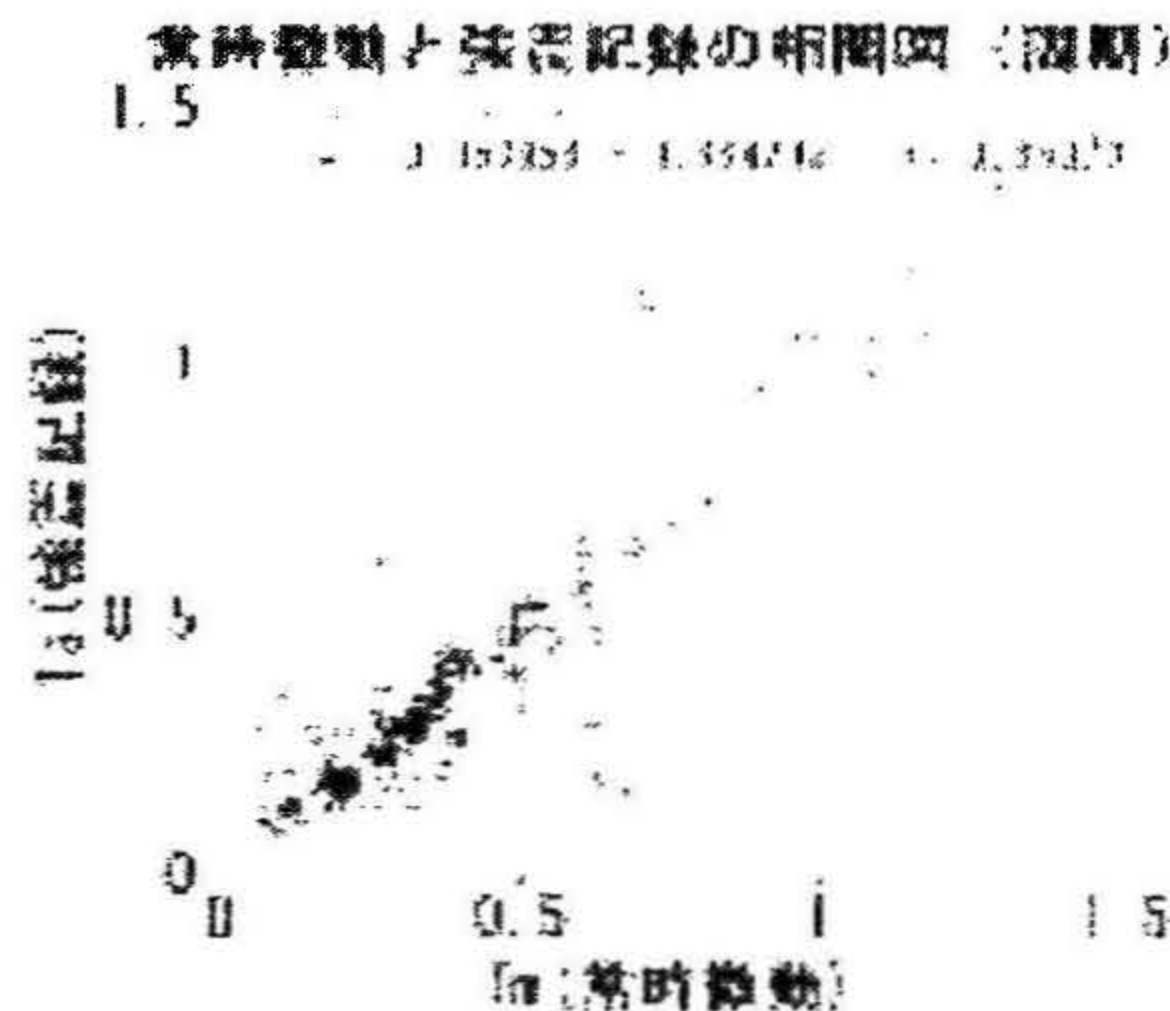


Fig.6 Comparison of predominant period value (T) between microtremor and seismic motion observation record

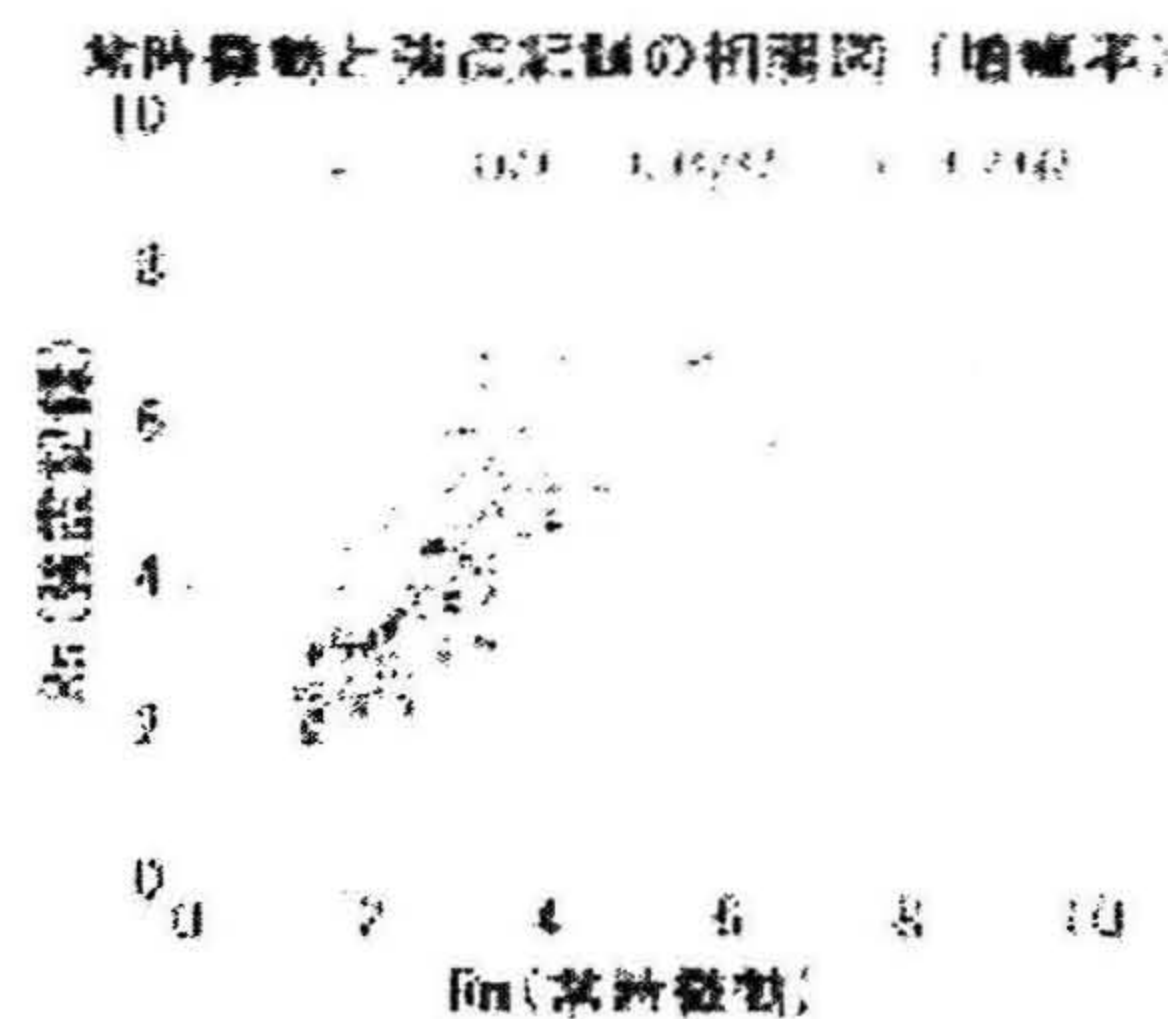


Fig.7 Comparison of amplification factor value (R) between microtremor and seismic motion observation record

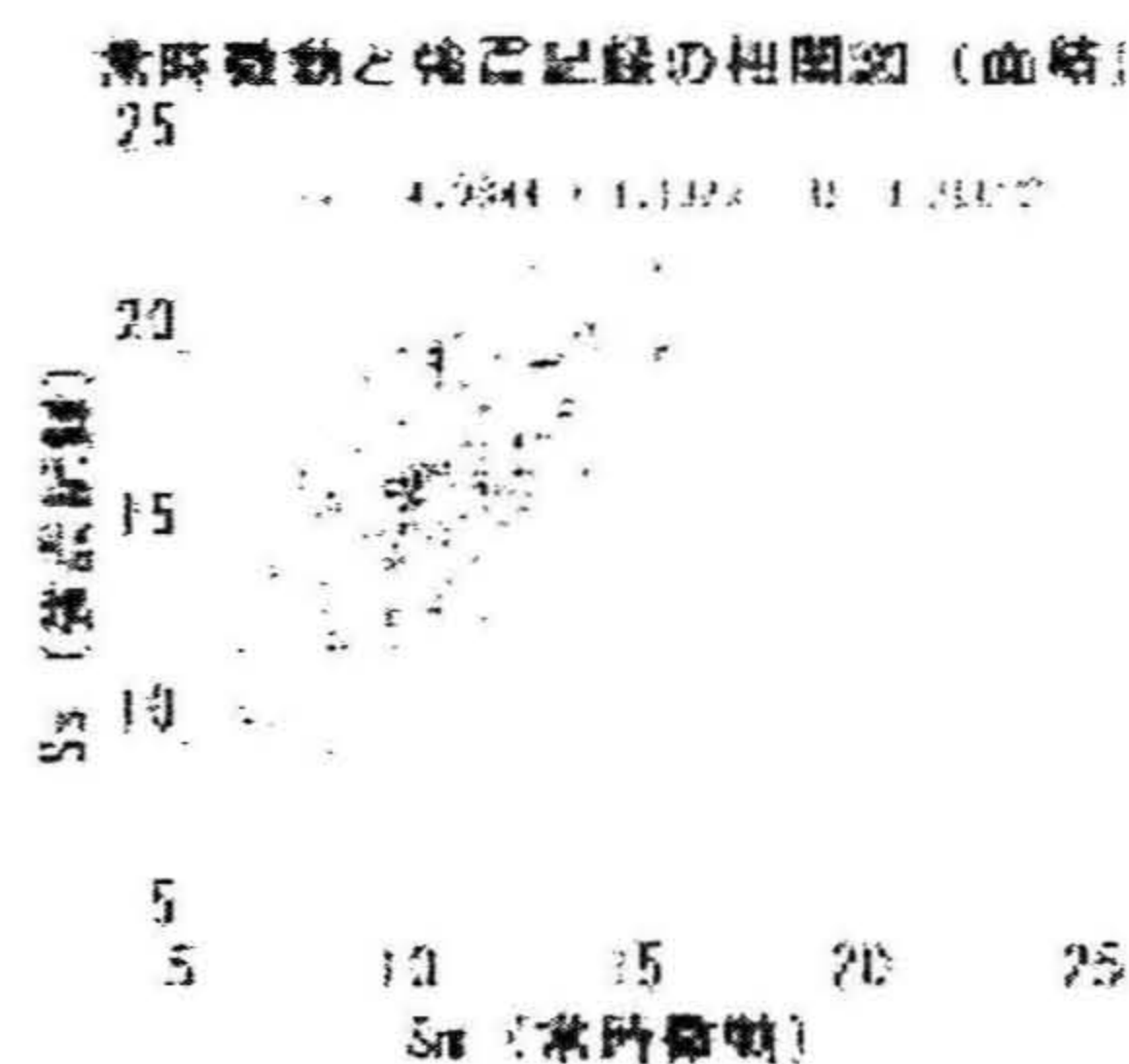


Fig.8 Comparison of spectral area value (S) between microtremor and seismic motion observation record

4.2 比較結果

常時微動と強震観測記録のH/Vスペクトル比の卓越周期 (T), 増幅率 (R), スペクトル面積 (S) の3者の相関性について総合的に比較を行い, 最終的な整合性に関する評価結果を分布図として Fig.9 に示した. 常時微動と強震観測記録が一致した観測地点 (○印) は132箇所, 一致しなかった観測地点 (◆印) は15箇所, 強震観測記録のデータが得られなかった地点 (★印) は3箇所であった. この結果, 常時微動と強震観測記録のH/Vスペクトル比の特性が一致した地点は, 全体の約88%に当たるという結果が得られた. また, 横浜市150地点における周期 (T), 増幅率 (R), スペクトル面積 (S) の相関図の結果より, 周期 (T) と増幅率 (R) に関しては, 比較的よい相関性を示したが, スペクトル面積 (S) の相関性は, あまり良好な相関性を示していない.



- 常時微動と強震記録が一致
- ◆ 常時微動と強震記録が不一致
- ★ データなし

Fig.9 Distribution of site classification result about agreement of H/V spectral characteristics between microtremor and seismic motion observation record

5 地盤震動特性の検討

5.1 地盤震動特性の理論解析の概要

横浜市の強震計設置箇所のボーリングデータおよびP-S検層結果から, 層厚 H(m), S波速度 Vs(m/sec)および密度 $\rho(g/cm^3)$ を抽出して各観測地点の地盤構造モデルを作成した. このモデルを用いて, 1次元地盤構造モデルによる地震応答解析を行った. その結果より周波数伝達関数を求め, 地震観測結果によるH/Vスペクトル比との比較を行った. なお, 本研究では地盤の減衰定数を10%, 基盤 (主に, 第三紀上総層群で形成される工学的基盤相当) のS波速度を700m/secと設定した.

5.2 伝達関数と強震観測記録のH/Vスペクトルの比較

1次元地盤構造モデルの地震応答解析で求められた周波数伝達関数と8地震の強震観測記録の平均H/Vスペクトル比の比較を行った. Fig.10(a)に両者の1次卓越周期のピーク値が一致した地点の例 (as02) を, Fig.10(b)にピーク値に誤差が見られた地点の例 (iz05) を示す. Fig.11には, 強震観測記録による平均H/Vスペクトルおよび周波数伝達関数による1次卓越周期のピーク値に関する相関図を示す.

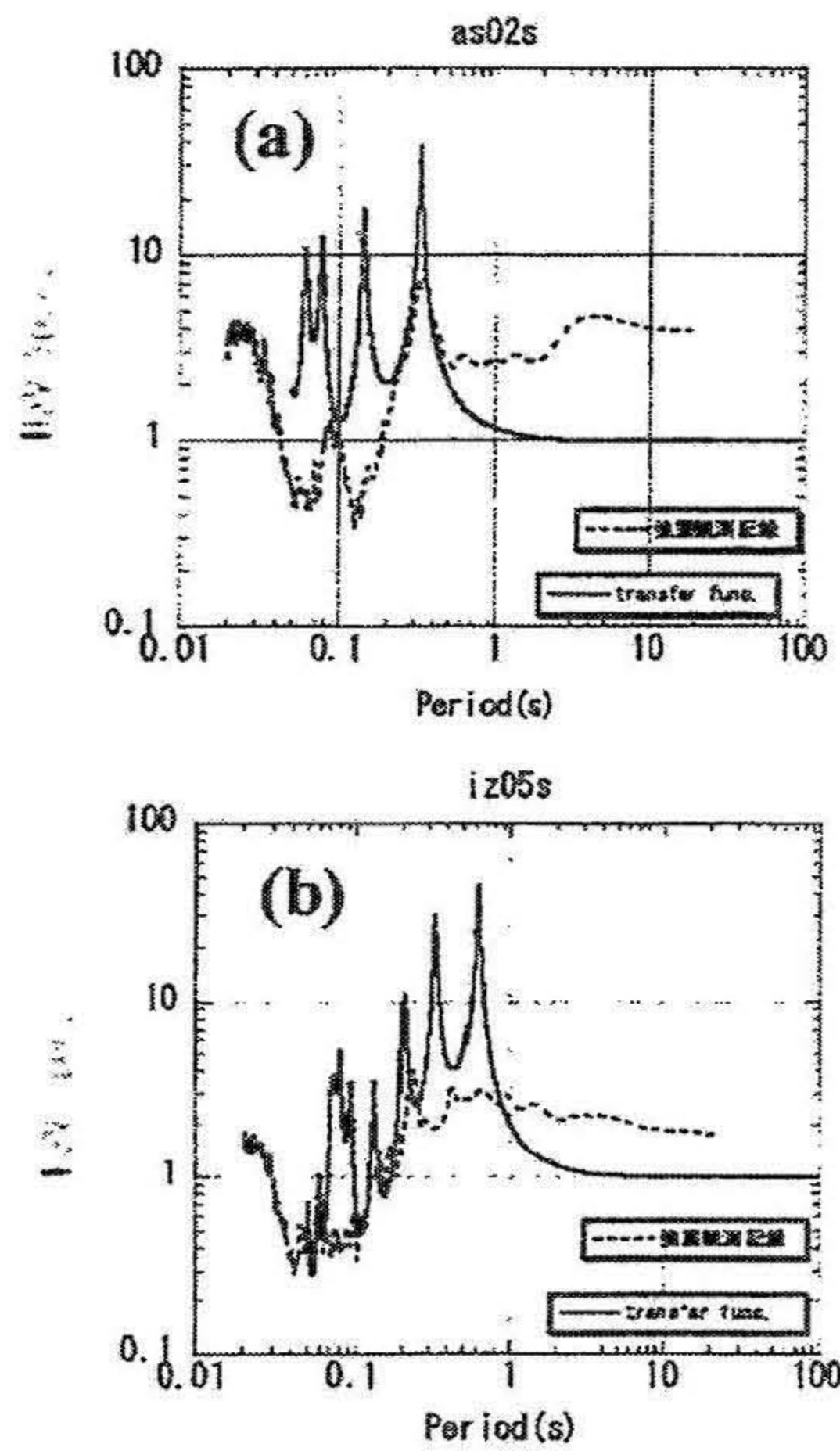


Fig.10 Examples of agreement between H/V spectral characteristics obtained from seismic motion record and transfer function calculated by theoretical 1-D response analysis. [(a)Up: Good agreement(Site:as02) and (b)Down: No good agreement (Site:iz05)]

両者を比較した結果、強震観測記録の平均 H/V スペクトル比と周波数伝達関数のピーク値における整合性は、比較が可能であった全体の観測点 147 地点中 113 地点(約 78%)においてピーク値が、ほぼ良好に一致した。ピーク値に差異が確認される観測点、ピーク値が確認されない観測点は 32 点であった。

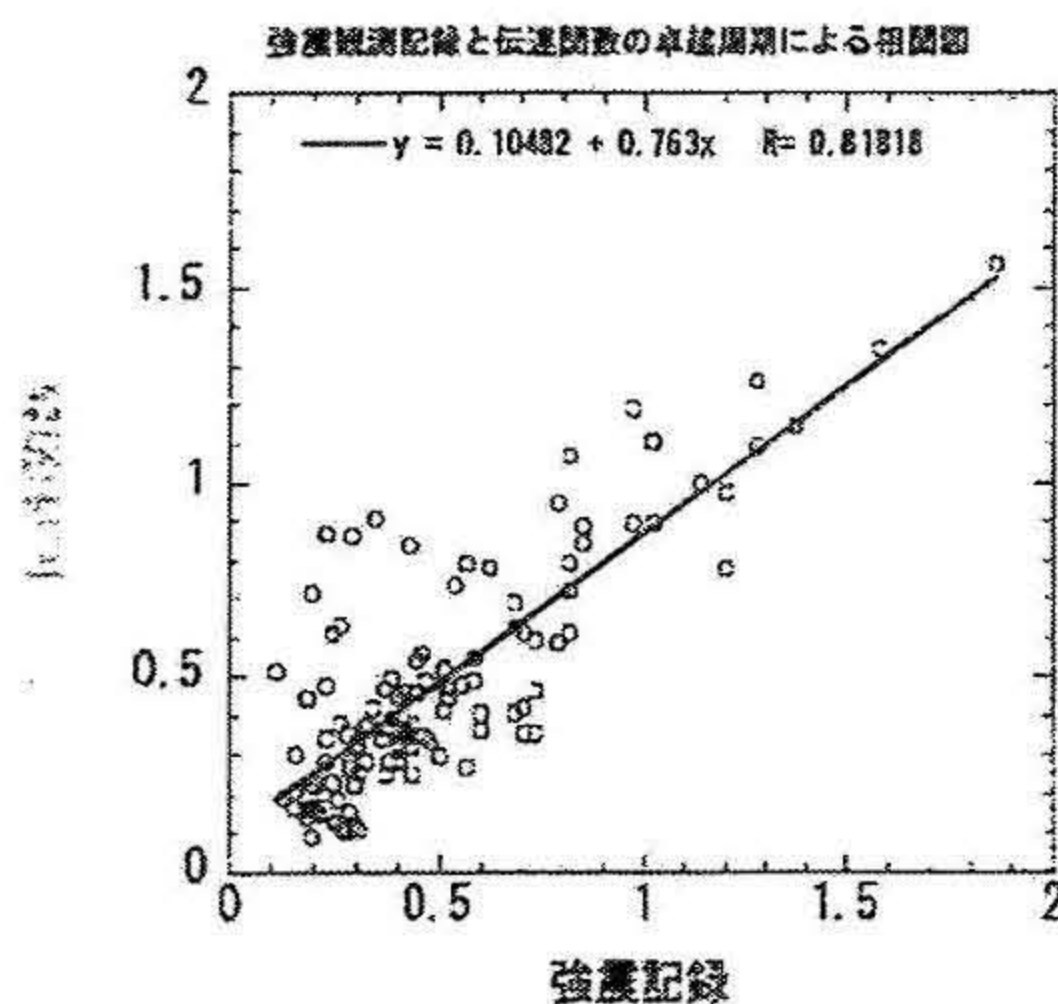


Fig.11 Comparison of predominant period value (T) between H/V spectral characteristics obtained from seismic motion record and transfer function calculated by theoretical 1-D response analysis

5 地盤構造との関連性

常時微動観測と強震観測記録による H/V スペクトル比の比較結果について、強震計が設置されている地点のボーリング柱状図から地盤構造を以下のように 4 区分 (A~D) して両者の整合性について考察した。結果を Fig.12 に示す。この結果、H/V スペクトル比の特性が比較的良く一致した観測地点は、基盤面とのコントラストが明瞭な地点(地盤区分 A, C) ものが多く確認された。また、良い整合性が認められなかった観測地点は、基盤

面が浅いものや、コントラストが不明瞭な地点や複雑な多層地盤構造となっている地点に多く見られた。

- ・A: 基盤面が浅く、インピーダンス比が 0.35 未満
- ・B: 基盤面が浅く、インピーダンス比が 0.35 以上
- ・C: 基盤面が深く、インピーダンス比が 0.35 未満
- ・D: 基盤面が深く、インピーダンス比が 0.35 以上

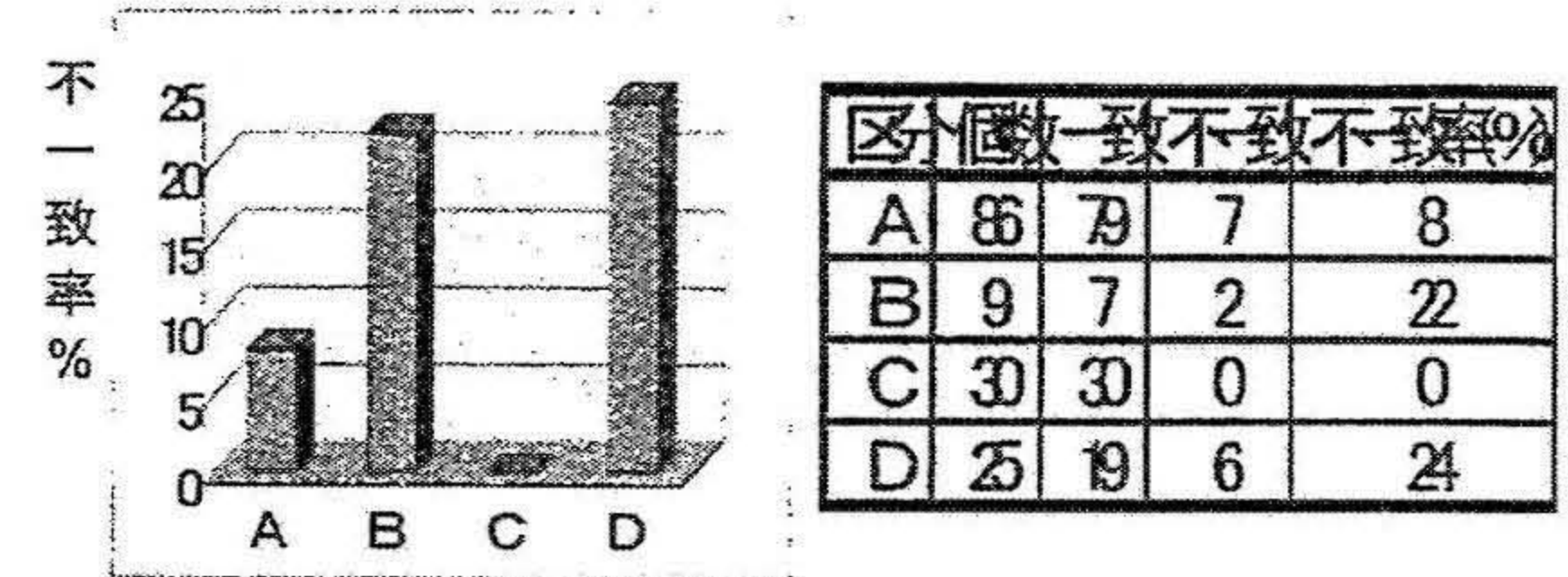


Fig.12 Classification of soil structure at each seismic station site by geotechnical information and non-agreement ratio of H/V spectral characteristics between microtremor and seismic motion record

5 まとめ

本研究では、横浜市強震計設置点において常時微動と強震記録の H/V スペクトル比特性の比較により、常時微動の評価・適用限界の考察を行った。その結果、横浜市においては全体的に両者の H/V スペクトル比特性が比較的良く一致する傾向を示すことが確認された。また、H/V スペクトル比のスペクトル面積(S)については、良好な相関性を示さなかったが、卓越周期(T)と増幅率(R)に関しては良好な相関性が得られた。これは、強震記録のコーダ部においても S 波成分による高次モードの周期成分が含まれることによるものと考えられる。

また、地盤構造については従来からの指摘と同様に基盤とのコントラストが明瞭な地点においては、常時微動の H/V スペクトル比から表層地盤の特性が比較的明確に把握可能であるが、コントラストが明瞭でない地点においては H/V スペクトル比の特徴が明確でない場合が多く、常時微動の H/V スペクトル比から表層地盤の振動特性が十分に把握できず適用限界が認められた。

謝辞

本研究では、横浜市高密度強震計ネットワークで観測された強震記録を使用させて頂いた。記して感謝致します。また、本研究は、神奈川県における文部科学省学術フロンティア研究プロジェクト「災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントシステムの構築に関する研究(研究代表者: 荏本孝久)」の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] 横浜市:「横浜市高密度強震計ネットワーク」:横浜市安全管理局危機管理室ホームページ (<http://www.city.yokohama.jp/me/bousai/eq/>)
- [2] 横浜市立大学地震研究センター監修:「横浜市地震マップ」:横浜市総務局災害対策室防災技術課, 2001. 3
- [3] 大町達夫他:「常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用」:土木学会論文集, No489/I-27, pp.251-260, 1994. 4
- [4] V. H. S. Rodriguez et al.:Site Classification Based on Spectral Amplification Patterns for Microtremor H/V Ratio; Res. Rep. on Earth. Eng., No.85,pp1-22, Feb. 2003
- [5] 杉本 実他調査・編集:「横浜市地盤図集・横浜の地形地質図」:横浜市, 1996. 9