

アレー強震観測システムを利用した ローカルサイト増幅に関する研究

神山 眞¹・松川忠司²・片岡俊一³

¹東北工業大学環境情報工学科教授
(〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: mkamiyaam@tohtech.ac.jp

²東北工業大学環境情報工学科助手 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: matukawa@tohtech.ac.jp

³弘前大学理工学研究科准教授 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

E-mail: kataoka@cc.hirosaki-u.ac.jp

仙台市圏で展開されているアレー強震観測システムSmall-Titanにより約10年間にわたり記録された強震記録を利用したローカルサイト増幅特性が分析される。同観測システムにおける20観測点における地震動増幅スペクトルがスペクトル比法により求められる。同様に計測震度を対象とした増幅度も経験的に求められ、増幅スペクトルとの相関が算定される。さらに、これらの強震記録による増幅特性は常時微動観測による増幅特性、地盤の平均S波速度パラメータと比較考察され、強震動の増幅特性は常時微動により算定されるローカルサイト特性と高い相関を有することが述べられる。また、常時微動のH/Vスペクトルにより強震動の増幅スペクトルを推定する簡易手法がこれらの比較考察に基づき提案される。

Key Words : Array observation system, Small-Titan, local site, amplification factors, microtremor, S-wave velocity, H/V spectra

1. はじめに

地震動は大別して震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト効果の3要因に依存する。このうち、ローカルサイト効果は地震被害の程度を強く支配することが知られており、耐震設計の観点からは観測点による地震動のサイト増幅スペクトルとして評価され、その事前把握が重要となる。地震動の「揺れの強さ」を単一パラメータとして表現する計測震度（震度）もローカルサイト効果により大きく影響を受けることが指摘されており¹⁾、震度によるサイズミックゾーニングの構築、震度計の設置環境検討などの種々の視点から震度に及ぼすローカルサイト効果の把握は重要である。このように、地震動のサイト増幅スペクトルや震度の増幅度に及ぼすローカルサイト効果の定量的な把握が求められるが、本論文はアレー強震観測システムによる地震記録を用いて増幅スペクトルと震度の増幅度を算定した事例を述べるとともに、これらのパラメータを常時微動により事前評価する方法を検討したものである。

地震動と常時微動の相関に関する研究は金井²⁾に始まり、最近では常時微動のいわゆるH/Vスペクトルと地震動の増幅スペクトルの関係に焦点をあわせた

研究が多くなされている³⁾。本研究では約20km×20kmの範囲の種々の地盤条件に20個の観測点を配置したアレー強震観測システムSmall-Titan⁴⁾を利用して、地震動のサイト増幅スペクトルと常時微動H/Vスペクトルの関係を考察する。また、増幅スペクトルに加えて、震度に関する観測点依存を同観測システムの記録を用いて震度の増幅度として定量的に算定して、同パラメータと地震動増幅スペクトル、常時微動特性との相関を検討する。ここでは常時微動特性としてH/Vスペクトルとともに位相速度算定による地盤の平均S波速度パラメータの利用可能性についても論じる。最後に、常時微動パラメータと地震動の増幅スペクトル、震度増幅度との関係について経験則を導き、常時微動によるローカルサイト増幅スペクトルの簡易手法を提案する。

2. アレー強震観測システム Small-Titan による地震動増幅スペクトル

(1) Small-Titanの概要

本研究では仙台市圏に展開されているリアルタイム・オンライン・アレー地震動観測システム・Small-Titanにより得られた地震記録を利用する。

この観測システムは全部で20地点の観測ステーションとそれらを集中的に監視・収録する観測センターとから構成されている。このシステムの構築目的や全体の特徴などは文献4) に詳しく述べられている。図-1にSmall-Titanの観測点の配置を標高分布とともに示す。仙台市圏の地質地盤の大きな特徴は、南東部が沖積低地、北西部が洪積台地と明確な対照を有していることにある。このことは、図-1に示されている標高の違いからも理解できる。なお、南東部の沖積低地と北西部の洪積台地との境界に概ね沿う形で長町-利府構造線という活断層が存在している。

(2) Small-Titanによる地震記録

Small-Titan は、1998 年 6 月から観測体制に入っているが、これまで少なくとも 1 観測点で地震記録を得ている地震は約 470 個に及ぶ（2007 年 10 月 10 日現在）。ただし、各観測ステーションのトリガーレベルはそれぞれの地点のノイズレベルに応じて設定されているので、これらの 470 個の地震すべてで全観測ステーションにおいて地震記録が得られているものではない。現在まで、すべての観測ステーションで同時記録を得ている地震は 60 個である。これらの地震のうち代表例として 2003 年 5 月 26 日発生の宮城県沖の地震（M7.1）の代表的な成分（EW 成分）の加速度記録を図-2 に示す。この地震は、Small-Titan の観測開始以降で最大級規模の地震であり、近い将来その発生が懸念される宮城県沖地震の震源域の近傍で発生した地震である。これらの記録を通覧しただけでも、例えば同一の地震であっても加速度波形が観測点により大幅に異なり、ローカルサイト効果の地震動に与える影響の大きさを伺い知ることができる。

(3) 増幅スペクトルの算定とそのサイト依存性

図-2 にみられるように地震動特性は観測点ごとに大幅に異なり、加速度記録におけるローカルサイト効果の影響は著しい。一方、このような地震動の地点変動は地震ごとに異なることも考えられる。したがって、より厳密に地震動のサイト依存性、特にサイトによる地震動増幅スペクトルの違いを検討するためには震源特性の異なる多くの種類の地震による地震動を系統的に考察することが必要である。そこで、これまで Small-Titan の全観測点で地震記録の得られている地震のうち仙台市圏の中心部（JR 仙台駅）から震央距離が 70km 以上の 49 地震による記録を対象にサイト変動を検討する。この条件を設定した理由は、ここでの観測点がおおよそ 20km の圏内に存在するので、観測点間の震央距離の差が近似的に無視できると考えたことによる。この条件設定により地震動の距離減衰の影響を考慮しなくてよいと考えられる。図-3 に対象とした地震の震央分布を地震規模の大きさを付して示す。

Small-Titan の地震記録を用いた各観測点のサイト増幅スペクトルは一般化逆解析法を用いて震源、

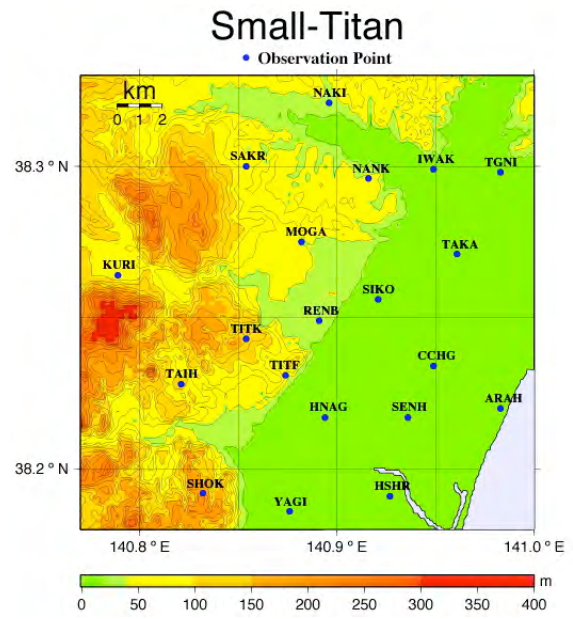


図-1 Small-Titan 観測点配置

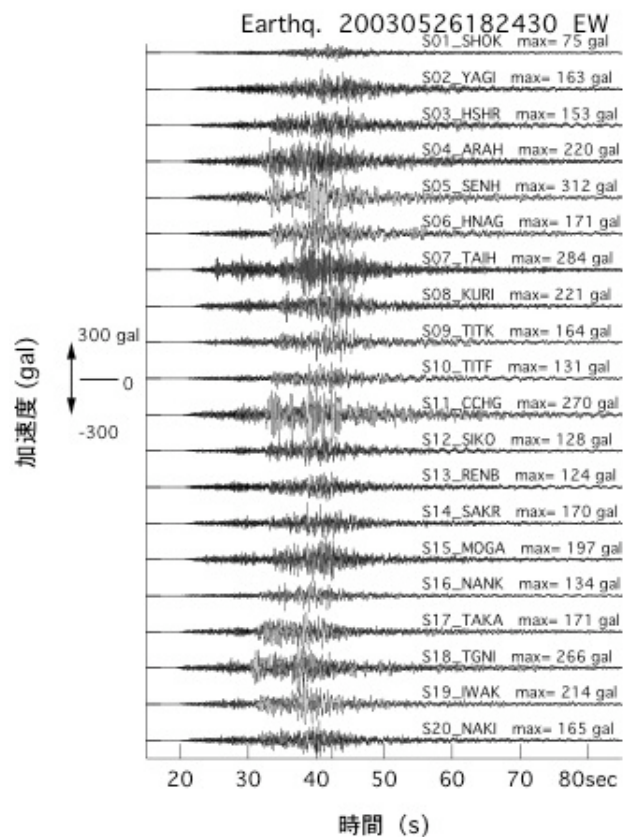


図-2 Small-Titan による代表的な記録例
(2003 年 5 月 26 日宮城県沖の地震 (M7.1)
の EW 成分)

伝播経路、サイトの 3 要因のスペクトル依存を分離して求められている⁵⁾。その算定では S 波主要動を対象にスペクトル振幅の増幅度の最小値を 1 とした拘束条件を設けている。ここでは、後述の震度増幅度との相関を検討することに合わせて、これとは違

った方法であるいわゆるスペクトル比法によりサイト増幅スペクトルを改めて求めてみた。

既述のように、ここでの地震動データは観測点による距離減衰の違いが近似的に無視できるように震央距離 70km 以上の条件の地震を解析対象としている。そこで、一つの地震で得られた全 20 観測点のスペクトルについて、各周期の最小スペクトル振幅に対する比を求めて、それをスペクトルの増幅度とした。ここでは、このように算定されるスペクトル振幅の増幅度をスペクトル増幅度およびそのスペクトルを増幅スペクトルと仮称する。対象としたスペクトルは地震記録の継続時間内のすべての位相のスペクトル振幅を総合的に算定する意味から、減衰定数 0.05 の速度応答スペクトルとした。速度応答スペクトルは記録の成分に応じて 3 成分得られるが、水平成分については 2 成分応答をベクトル合成して算定される水平動応答として、鉛直動の応答スペクトルと合わせて二つの方向の応答スペクトルを求めた。なお、ここでの増幅スペクトルや後述の震度の増幅度のように「増幅」と表現するとき、物理的な解釈としては、例えば地震基盤のようなあるものに対する相対的な大きさとしての意味が大きいと考えられる。その意味での相対的な基盤となる地盤として、本論文では 20 観測点で最も小さな振幅を与える観測点 S01-SHOK の地盤（S 波速度で 400～500m/s の硬い地盤）が具体的に該当する。

図-4 と図-5 は図-2 で地震記録を示した 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震の水平動、鉛直動応答スペクトルを全観測点について示したものである。また、図-6 と図-7 はそれぞれ図-4 と図-5 の応答スペクトルの各周期の最小スペクトル振幅に対する比として算定した全観測点のスペクトル増幅度を重ねてプロットしたものである。図-6 および図-7 にみられるように、水平動、鉛直動とも増幅スペクトルは観測点ごとに大きく異なり、スペクトル増幅におけるローカルサイト効果が顕著である。ただし、水平動と鉛直動の両者の増幅を比較すると前者の方が後者よりも相対的に変化幅が大きく、鉛直動よりも水平動においてローカルサイト効果が大きく影響することを指摘できる。

図-6 および図-7 のような増幅スペクトルは地震ごとに変動すると考えられる。そこで、全地震の増幅スペクトルを算定して、それらを平均してそれぞれの観測点固有のサイト増幅スペクトルとした。この算定の様子を代表的な観測点として S05_SENH および S15_MOGA を例に水平動、鉛直動それぞれについて図-8～図-11 に示す。それぞれの図にみられるように、スペクトル増幅度は地震ごとにバラつくが周期に応じた変動は観測点固有の性状が明らかである。地震ごとの変動は観測点の卓越周期と見なされる周期よりも長周期帯域においてそれより短い周期帯に比較して顕著な傾向がある。これはローカルサイトの地震応答における本質を反映した結果と考えられる。すなわち、一般に長周期帯域の応答は空間的に広いサイトの効果が現れるが、広空間ほどサイ

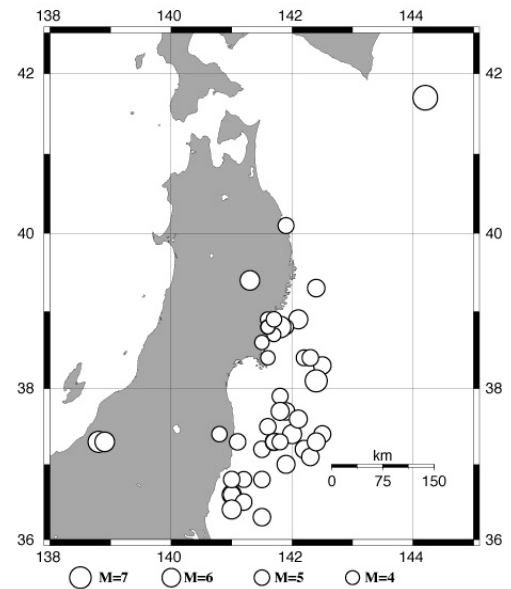


図-3 対象地震の震央分布

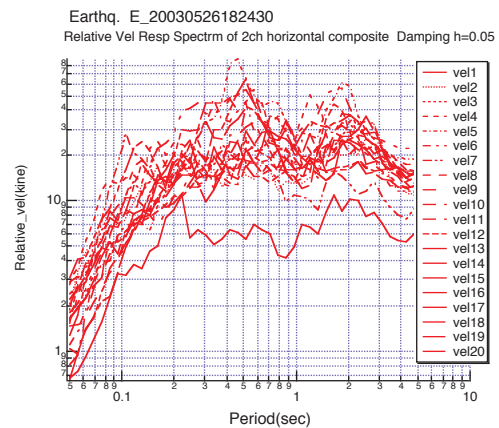


図-4 水平動応答スペクトル（2003 年 5 月 26 日 宮城県沖の地震）

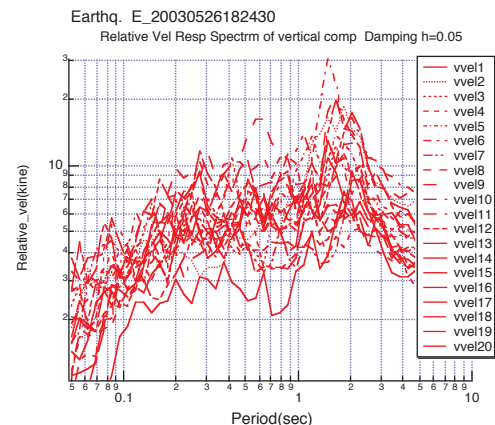


図-5 鉛直動応答スペクトル（2003 年 5 月 2 宮城県沖の地震）

トのローカル性が失われるとともに地震波動も表面波の影響が相対的に強調される現象に対応したものであると考えられる。

以上のように求められる各観測点の平均的な増幅スペクトルを比較して示したのが図-12～図-15 である。ここでは全 20 観測点を 1 枚の図に重ねると

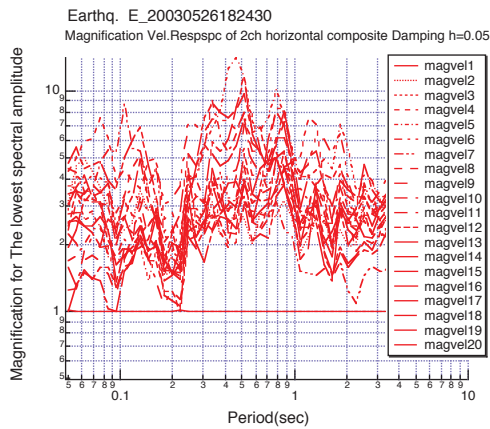


図-6 水平動応答スペクトルの増幅度
(2003年5月26日宮城県沖地震)

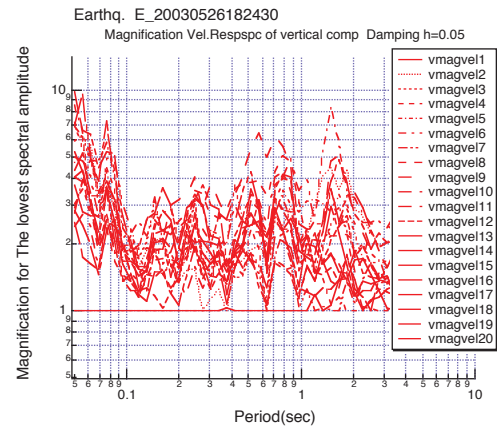


図-7 鉛直動応答スペクトルの増幅度
(2003年5月26日宮城県沖地震)

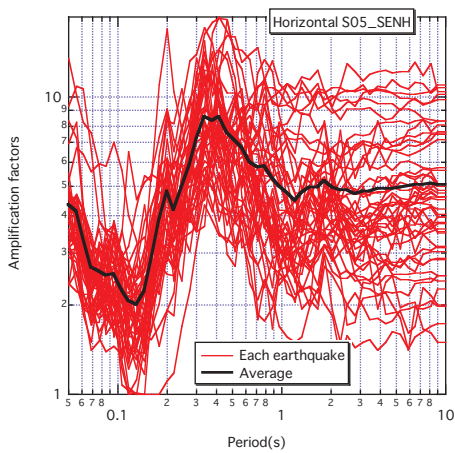


図-8 観測点 S05_SENH の増幅スペクトル
(水平動)

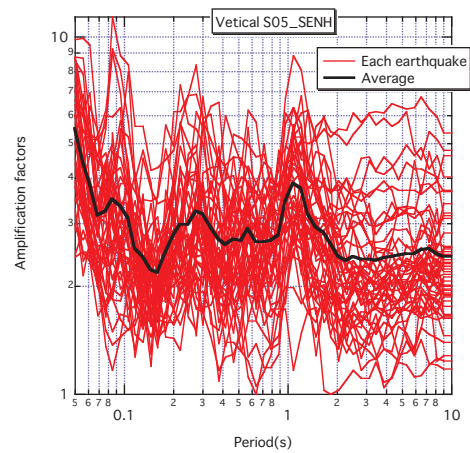


図-9 観測点 S05_SENH の増幅スペクトル
(鉛直動)

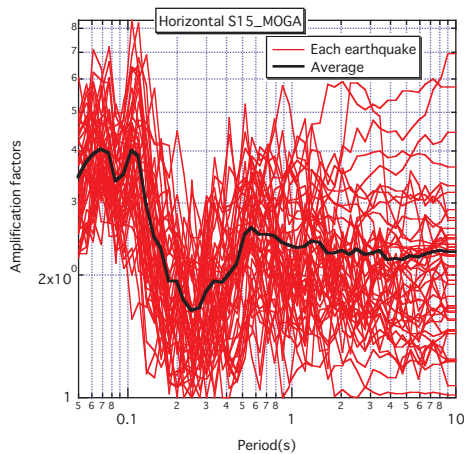


図-10 観測点 S15_MOGA の増幅スペクトル
(水平動)

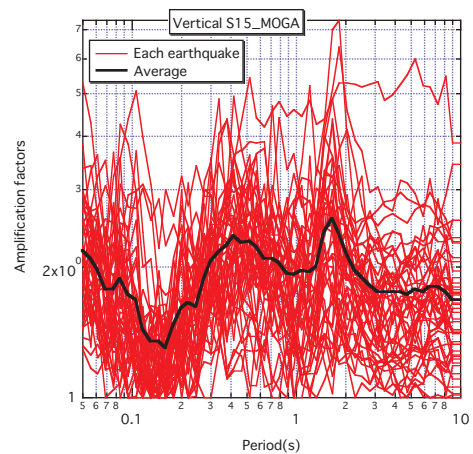


図-11 観測点 S15_MOGA の増幅スペクトル
(鉛直動)

紛らわし過ぎるので、10 観測点ごとに分けて水平動、鉛直動それぞれ 2 枚の図として重ねてプロットしてある。これらの図に明らかなように、水平動、鉛直動とも増幅スペクトルは観測点のローカルサイト特性に応じて大きく異なること、水平動の増幅スペクトルは鉛直動のそれよりもサイト効果が顕著で

あることがわかる。

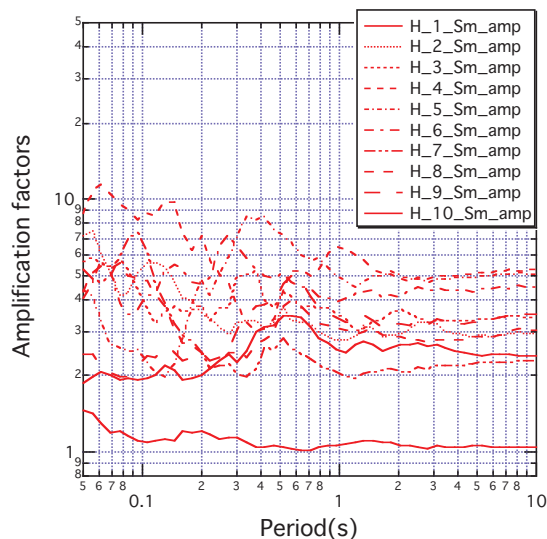


図-12 各観測点における水平動の増幅スペクトル (その1)

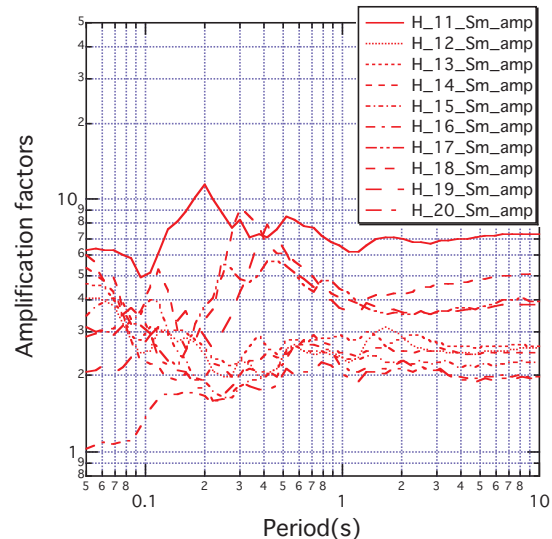


図-13 各観測点における水平動の増幅スペクトル (その2)

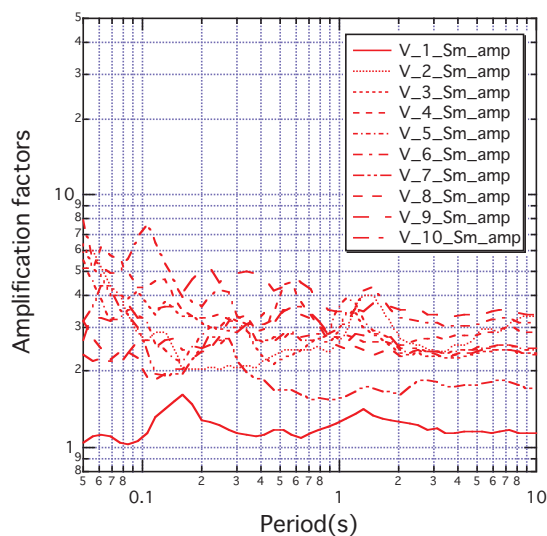


図-14 各観測点における鉛直動の増幅スペクトル (その1)

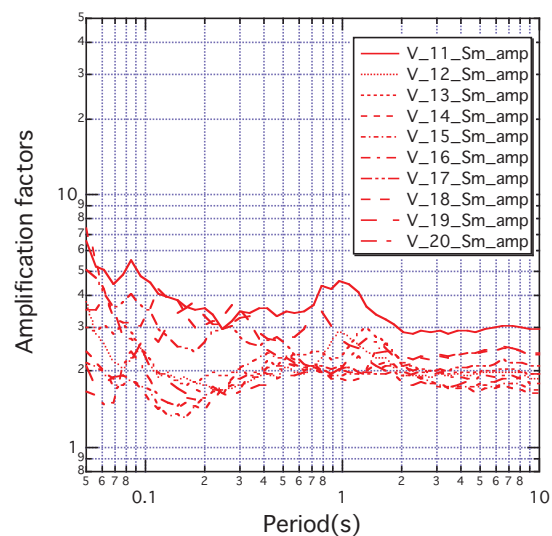


図-15 各観測点における鉛直動の増幅スペクトル (その2)

3. アレー強震観測システム Small-Titan による計測震度のサイト依存性

(1) 計測震度のサイト依存性

震度（計測震度）は多くの地震動パラメータのうち一般市民にとって最も身近な量といえよう。この観点から、サイスミックゾーニングは震度を対象としてなされる場合が多い。しかし、震度のローカルサイト効果への依存メカニズムを含めて、震度がローカルサイト効果のどのような要素に、いかに影響を受けるかの定量的評価は十分に確立されているとは言いがたい。震後対応の第一次情報を早急に提供する目的から、容易に得られるサイト特性としての国土数値地理情報を取り入れた震度評価も試行されているが⁶⁾、ローカルサイト地震応答の複雑性を考えれば、震度とローカルサイト効果の関係は今後さらなる研究が待たれる分野といえよう。

一方、震度計の設置環境検討という視点からも震度に対するローカルサイト効果は重大な関心事である。提供される震度情報が震後対応への決定を左右する重要性をもつことを考慮すれば、震度計の設置場所は特種の地形、地盤、構造物の影響のないサイトを選定するなどローカルサイト効果に対する特段の配慮が望まれる。また、このように得られるデータの重要性から、そのデータが当該地点のローカルサイト効果により、どの程度の定量的影響を受けるか事前に承知しておくこともデータ利用の観点から望ましいことであろう。

図-2 に示したように Small-Titan による地震動特性は観測点ごとに大幅に異なる。この事情は、ここで検討対象とする計測震度についても同様である。ここでは Small-Titan による3成分の加速度地震記録を対象に気象庁方式により計測震度を算定して、震度のサイト依存性を考察した。図-16 はその一例として図-2 で示した2003年5月26日発生の宮城

県沖の地震（M7.1）の測震度の分布を描いたものである。図-16 にみられるように震度は地点ごとに大きく変動してサイト効果が非常に大きいことがわかる。しかも、この震度分布を図-1 の地形分布と比較すれば明らかなように、計測震度は仙台市圏の南東部に分布する沖積低地で大きく、逆に北西部の洪積台地で相対的に小さく、地形、地盤種別と明瞭な相関を有することが一目りょう然である。

(2) 計測震度のサイト依存性に関する統計分析

前述のサイト増幅スペクトルと同様に震度の地点変動は地震ごとに異なる。そこで、観測点固有の震度のサイト依存度を定量的に求めるため、サイト増幅スペクトルの算定を行った 49 地震の地震を対象に計測震度の統計分析を試みた。ここでの検討の主目的は震度の観測点ごとの変動を異なる地震に対して求めることであるが、異なる地震間の変動を共通の尺度で測定する何らかの基準化が必要である。種々の基準化が考えられるが、ここではそれぞれの地震において全 20 観測点の最低震度からの差を求めて、それを各観点における震度増幅とした。以下では、このような最低震度からの差を震度増幅度と仮称する。上述の 49 個の全地震の震度増幅度を 20 観測点に対してプロットしたのが図-17 である。図-17 に示されるように、震度増幅度は地震ごとにバラつくが、観測点変動は地震によらない性質をもつ。そこで、49 地震について震度増幅度の平均値と標準偏差値を観測点ごとに求めた。このように求められた震度増幅度の平均値および平均値±標準偏差は図-17 に重ねてプロットされている。このような平均的な震度増幅度から仙台市圏における震度のローカルサイト効果に対する依存が定量的に把握できる。少なくとも、仙台市圏では計測震度はローカルサイトにより平均的に 1.6 程度の違いが存在する

ことを指摘できる。

(3) 計測震度のサイト依存性と増幅スペクトルのスペクトル強度との相関

上述のように、震度のサイト依存性を表わす震度増幅度および地震動スペクトルのサイト依存性を表現する増幅スペクトルが各観測点において得られた。これら二つのパラメータには強い相関が存在すると予想されるが、震度の物理的な性質の解釈に合わせて、震度が地震動スペクトルのどのような周期帯の特性に関係するかは興味深いテーマである。そこで、

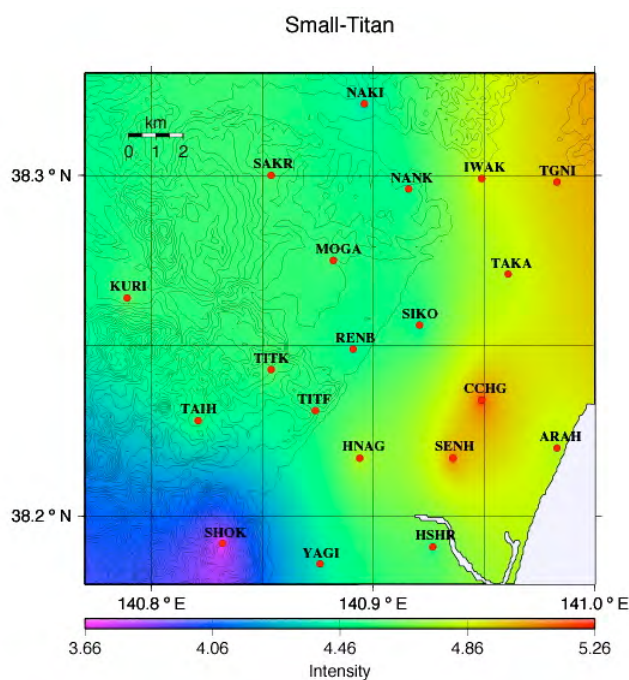


図-16 計測震度分布（2011 年 3 月 11 日宮城県沖の地震）

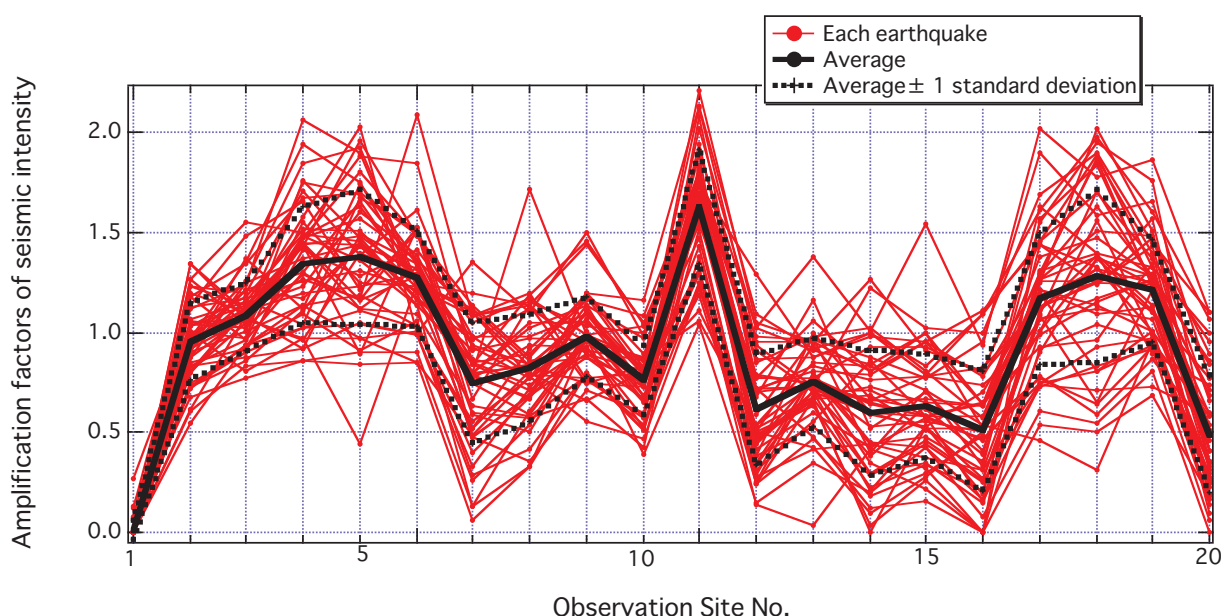


図-17 震度増幅度の観測点変動（各地震の変動，平均，標準偏差）

本節ではその一考察として、増幅スペクトルに対して異なる周期帯域幅でスペクトル強度を求めて、震度増幅度との相関を検討する。

ここでは先に算定済みの増幅スペクトルを対象に次式によりスペクトル強度 I_s を求めた。

$$I_s = \int_{T_a}^{T_b} A(t) dT \quad (1)$$

ここに $A(T)$: 増幅スペクトル, T_a : 最小周期, T_b : 最大周期, T : 周期。

スペクトル強度を求める周期帯域を0.1～0.5秒, 0.1～1.0秒および0.1～2.5秒の3ケース設定しておのおのについてスペクトル強度を算定した。そして、こうして算定された増幅スペクトルのスペクトル強度と震度増幅度との相関を検討した。図-18は縦軸に震度増幅度, 横軸にスペクトル強度の常用対数をとり、各観測点の両者の関係をプロットしたものである。

図-18に示すように、震度増幅度とスペクトル増幅のスペクトル強度とはいずれの周期帯域においても高い相関を示す。しかし、図に示されている回帰分析における相関係数の値から明らかなように、0.1～1.0秒の周期帯域でのスペクトル強度が震度増幅と最も高い相関を与えている。この結果から、震度を決定する地震動は周期帯域0.1～1.0秒における振幅特性が最も強く関与することが指摘できる。

4. 常時微動の観測と H/V スペクトルのサイト依存性

(1) 常時微動の観測とH/Vスペクトル算定

Small-Titanの20観測点において常時微動観測を実施した。観測方法は通常の3成分速度観測で携帯用地震計SPC-35E（（株）東京測振）をSmall-Titanの地震計コンクリートベースに設置して観測した。この携帯用地震計の総合周波数特性は0.3～70Hzでほぼフラットである。観測は交通機関のノイズが静かな時間帯をねらい日中に実施した。2分間継続観測を繰り返し、1観測点につき最低約10分間の観測を保障した。スペクトルはノイズの少ない20.48秒を切り出しFFTによりフーリエスペクトルを求めた。なお、フーリエスペクトルは水平2成分、鉛直1成分の3成分について求められるが、ここでは水平2成分のスペクトルのrms値から水平動スペクトル(H)を算定して、これと鉛直動スペクトル(V)に対する比からH/Vスペクトル比（以下ではH/Vスペクトルと仮称する）を評価した。各成分のスペクトル算定では0.2HzのParzenフィルタを施して平滑化した。以上のようなH/Vスペクトルを最低5個の異なる時間区間において求めて、その平均を各観測点のH/Vスペクトルとした。

代表的な観測点としてS05_SENH, S15_MOGAを対象として求められた常時微動H/Vスペクトルを図-19および図-20に示す。これらの図では異なる時間帯で

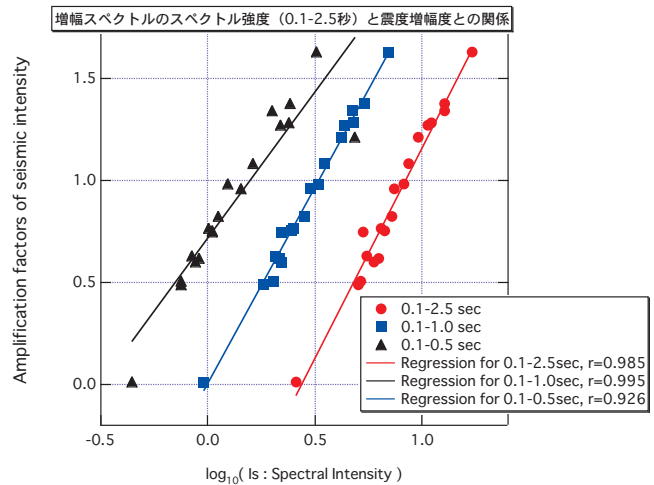


図-18 震度増幅度と増幅スペクトル強度との相関

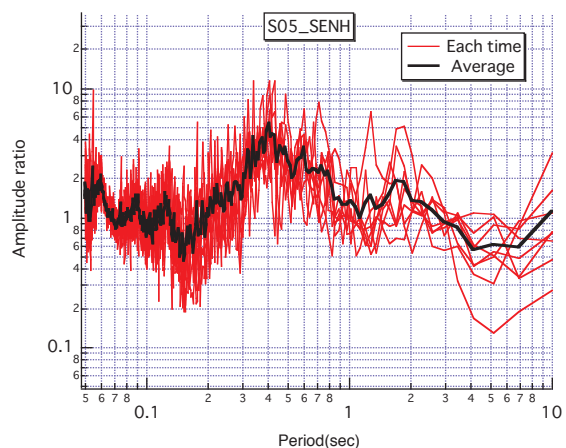


図-19 常時微動 H/V スペクトル (S05_SENH)

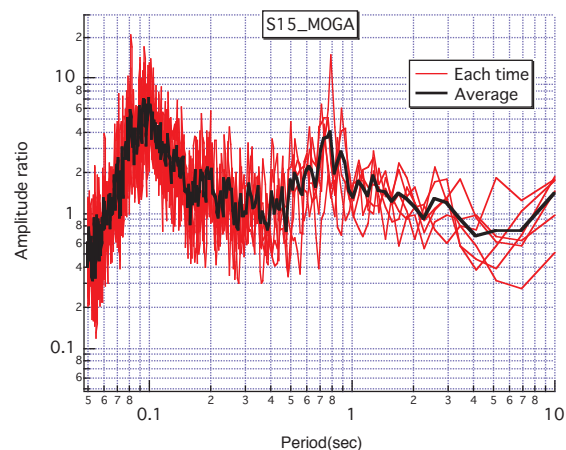


図-20 常時微動 H/V スペクトル (S15_MOGA)

のH/Vスペクトルが重ねてプロットされているとともに、それらの平均も示されている。両図のように異なる時間帯でのH/Vスペクトルは比較的安定している。

以上のような常時微動H/Vスペクトルを全観測点について示したのが図-21および図-22である。全観測点を同一図に重ねてプロットすると煩雑となるの

で、ここでは10観測点ごとにおいて二つの図に示してある。図-21および図-22に示すように、常時微動H/Vスペクトルは観測点のローカルサイト条件を反映して大幅に変化する。

(2) 常時微動H/Vスペクトルと地震動の増幅スペクトルとの相関

前節までに地震動を対象として増幅スペクトル、常時微動を対象としてH/Vスペクトルを各観測点について求めた。これらは何らかの形でローカルサイト特性に基づく振動の増幅をスペクトルとして表わしたものである。前述したように、地震動予測の観点からは、地震動のサイト条件による増幅特性を事前評価することは非常に重要なことであり、仮にこの評価が常時微動のH/Vスペクトルから得られれば極めて有益である。そこで、前節までの処理をまとめて地震動の増幅スペクトルと常時微動のH/Vスペクトルを観測点別に比較した。これを示したのが図-23である。

図-23の全観測点について地震動増幅スペクトルと常時微動H/Vスペクトルの比較を通覧すると両者の定義と尺度が異なるのでスペクトル振幅にレベルの差がある。スペクトル形状については特に水平動増幅スペクトルと常時微動H/Vスペクトルについて相似が認められる。このような特徴は既往の研究で多く指摘されてきたことである³⁾。地震動の鉛直動増幅スペクトルについては常時微動H/Vスペクトルとスペクトル振幅、スペクトル形状とも相関は弱いようである。ここでは紙面の関係から示さないが、むしろ地震動の増幅スペクトルも鉛直動に対する水平動の比をとると常時微動のH/Vスペクトルと振幅と形状とも相似度が強くなる傾向がある。

(3) 常時微動のH/Vスペクトル強度と計測震度の増幅度との相関

既述のように、震度によるサイスミックゾーニングの構築、震度計の設置環境検討などの種々の視点から震度に及ぼすローカルサイト効果の把握は重要である。このように重要な震度へ及ぼすローカルサイト効果が常時微動で事前に評価できるなら工学的に極めて有用である。上述のようにSmall-Titanの観測点を対象に計測震度の震度増幅度が統計的に求められた。一方、常時微動のH/Vスペクトルも算定された。ここで、これらの震度増幅度パラメータと常時微動のH/Vスペクトルとの相関を検討する。震度増幅度は単一の数値パラメータとして表現されているので、常時微動のサイト依存性も同様に単一パラメータで代表できることが工学上の簡略性からも望ましい。常時微動のサイト依存性を単一の数値パラメータで表現するのに種々の方法が考えられるが、ここでは先に行った地震動増幅スペクトルの単一パラメータ化と同じくスペクトル強度を採用した。その際のスペクトル強度算定は常時微動H/Vスペクトルを対象に0.1~0.5秒、0.1~1.0秒および0.1~2.5秒の三つの周期帯域で行ったが、ここでは上述の地

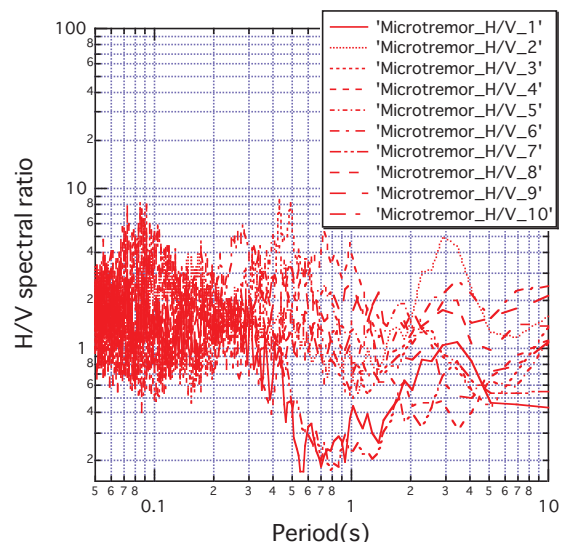


図-21 各観測点の常時微動 H/V スペクトル
(その1, 観測点1~10)

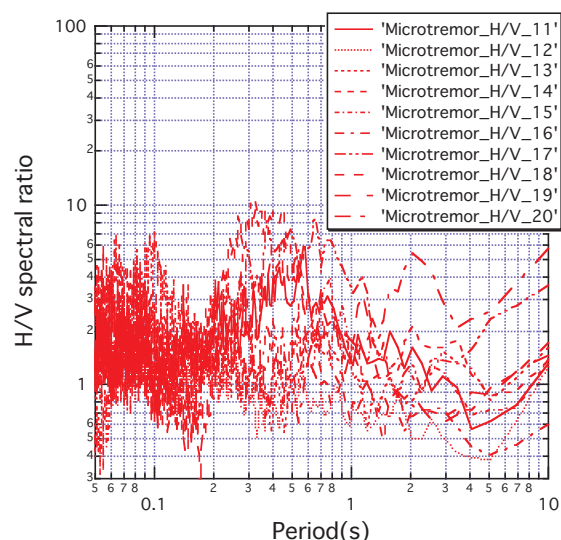


図-22 各観測点の常時微動 H/V スペクトル
(その2, 観測点11~20)

震動増幅スペクトルの検討を参照して0.1~1.0秒の結果を示す。

図-24は0.1~1.0秒の周期範囲のケースの常時微動H/Vスペクトルのスペクトル強度と震度増幅度との相関図である。それぞれ縦軸に震度増幅度、横軸にスペクトル強度の常用対数をとってプロットされている。これらには回帰分析による回帰式と相関係数も与えられている。この図に明らかなように、両者にはバラつきはあるものの正の相関が認められる。周期帯域0.1~1.0秒のスペクトル強度の相関では相関係数0.785のかなり高い相関が得られている。なお、ここでは紙数の関係から示さないが、他の周期範囲と比較して周期帯域0.1~1.0秒が最も大きな相関係数を与えている。これから、周期帯域0.1~1.0秒の常時微動H/Vスペクトルのスペクトル強度はローカルサイトによる震度の増幅度評価において一定の統計的予測法を提供するものと考えられる。

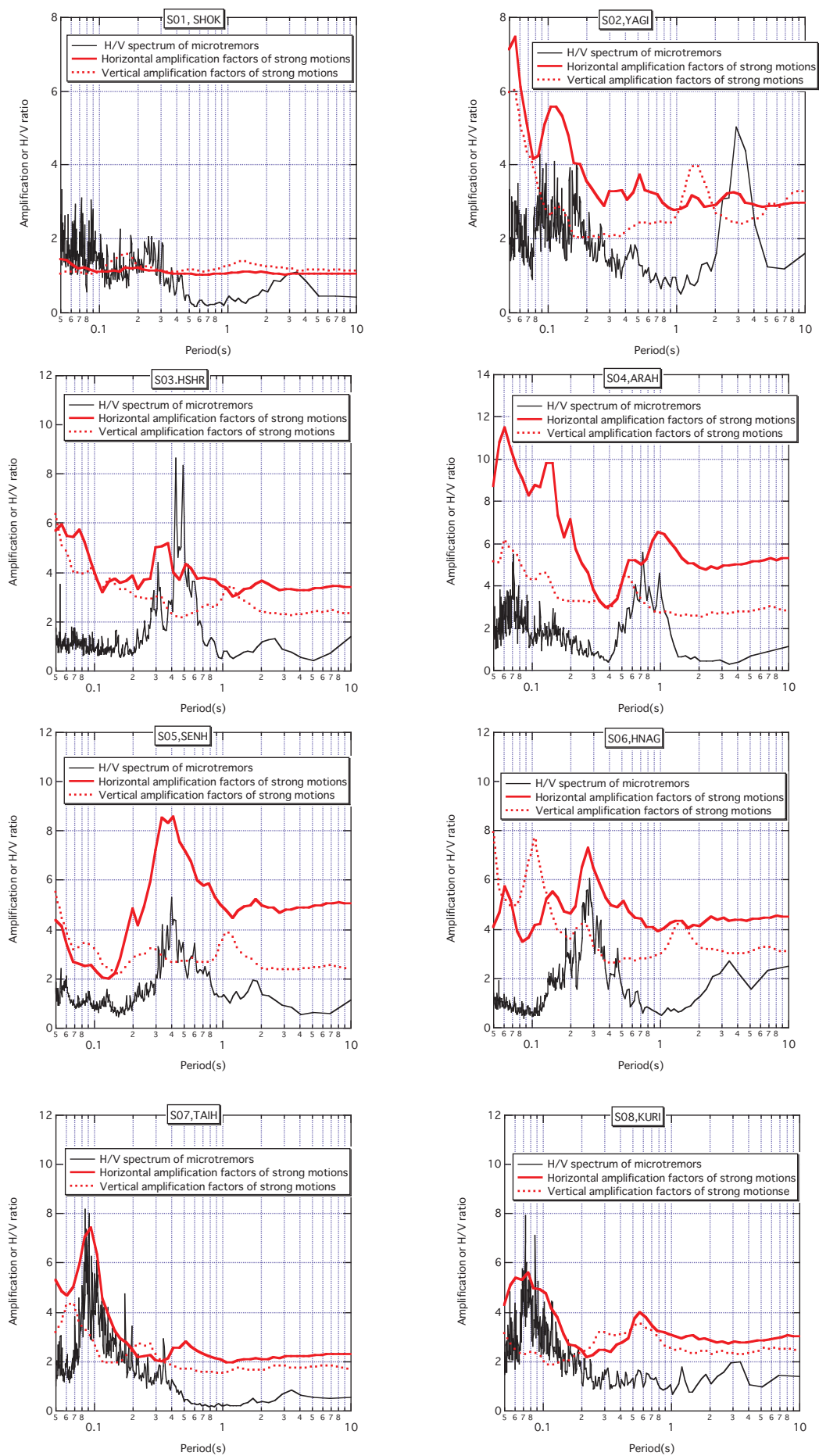


図-23(1) 地震動増幅スペクトルと常時微動 H/V スペクトルの比較

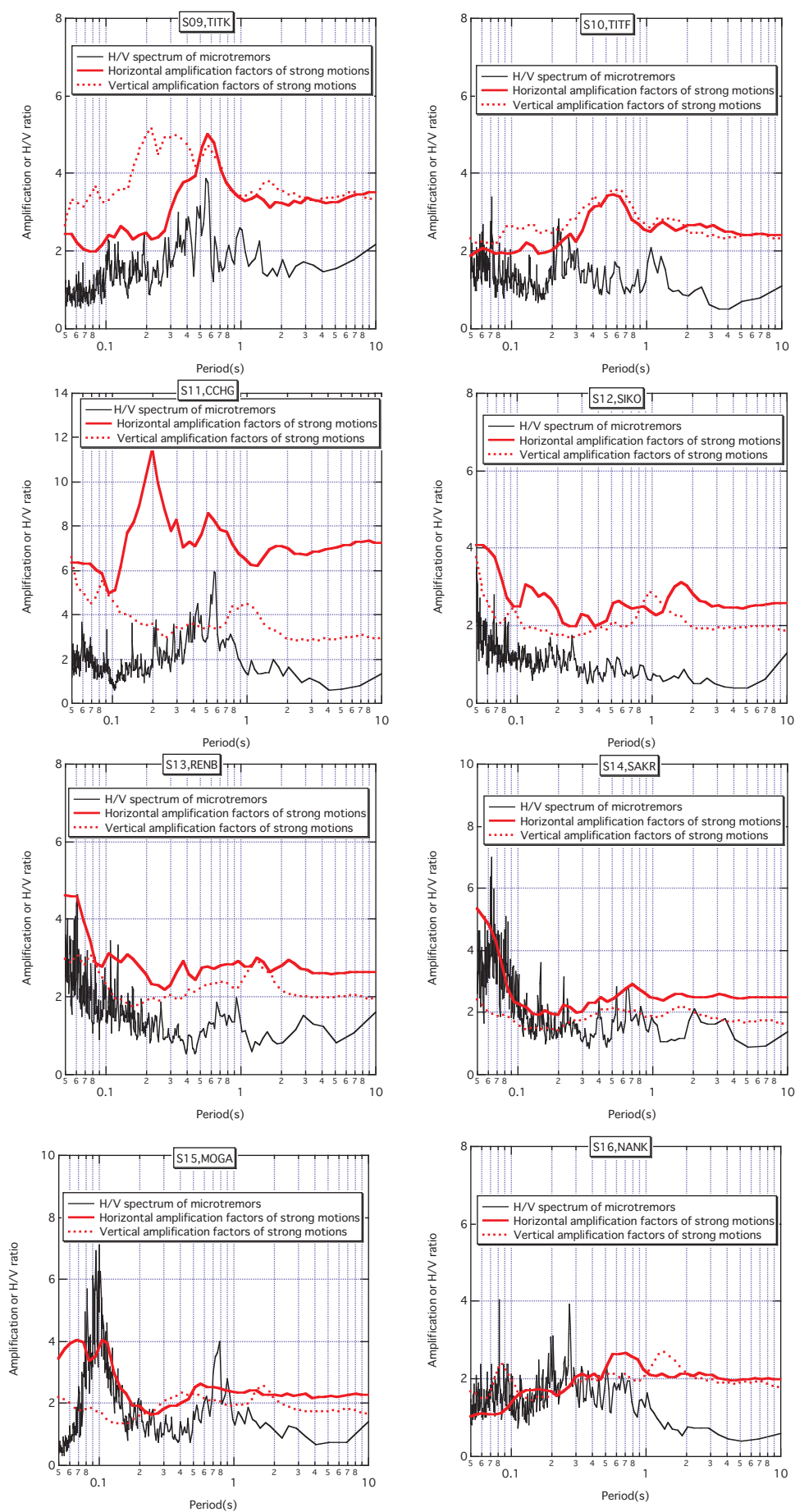


図-23(2) 地震動増幅スペクトルと常時微動H/Vスペクトルの比較

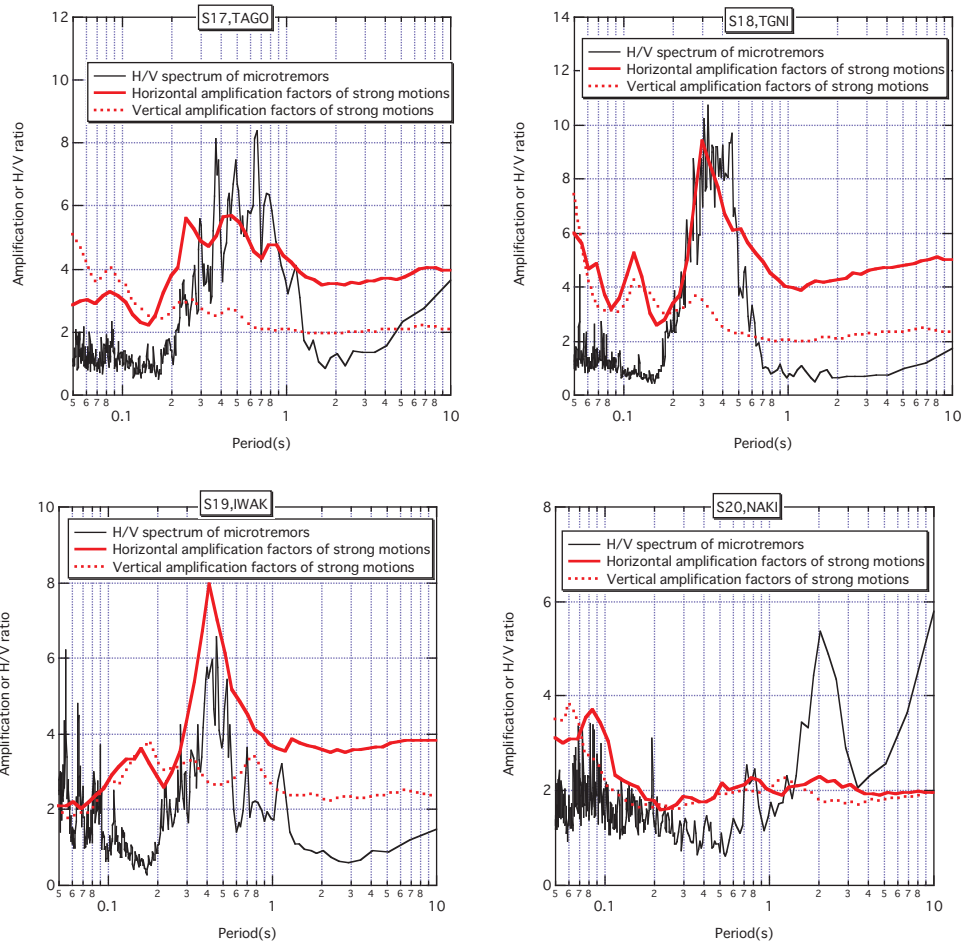


図-23(3) 地震動増幅スペクトルと常時微動 H/V スペクトルの比較

なお、上述の常時微動H/Vスペクトルとは別に常時微動の3点観測を利用した空間相関法により常時微動に含まれるRayleigh波の位相速度分散を算定した。さらに、この算定に基づき、当該地盤の平均S波速度を評価して、震度の増幅度との相関を検討した。この結果、常時微動H/Vスペクトルとほぼ同じ程度の相関を示すことが判明したが、これについては別途の論文で詳細を報告する。

5. 常時微動による地震動サイト増幅スペクトルの簡易的な推定法

上述のように、水平動に関して地震動のサイト増幅スペクトルは常時微動のH/Vスペクトルとスペクトル形状においてかなりの相似性を有する。一方、理論的には常時微動と地震動のローカルサイト効果による増幅メカニズムは本質的に同一ではない。特に、常時微動の主要波動成分が表面波であると仮定すると、S波による増幅が中心と考えられる地震動の増幅スペクトルが常時微動のH/Vスペクトルとスペクトル振幅において異なるのは自明の理となり、地震動増幅スペクトルと常時微動のH/Vスペクトルにスペクトル振幅まで期待した相関は元来、無理であるとの論理も成り立つ。ただ、常時微動に多く含まれるとされるRayleigh波のH/Vスペクトル振幅はS

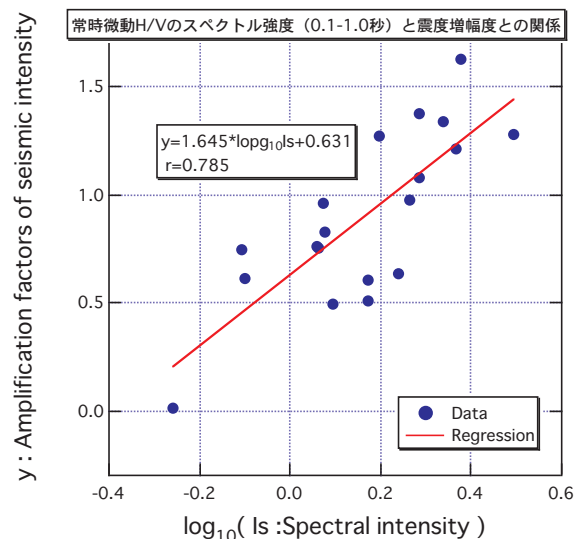


図-24 震度増幅度と常時微動 H/V スペクトル強度 (0.1~1.0 秒) の相関

波による地盤の地震応答の卓越周期で極大となる性質があり、極大値の大きさも地盤構造のS波インピーダンス比に依存する性質があることから³⁾、常時微動H/Vスペクトル振幅の何らかの補正によっては地震動の増幅スペクトルと近似する可能性もあると考えられる。以上から、本論文では常時微動H/Vス

ペクトルが形状のみならずスペクトル振幅においても地震動のサイト増幅スペクトルと一致するような簡易的修正法を考察した．基本的な方法は常時微動H/Vスペクトルをスムージングするとともに，地震動のサイト増幅スペクトルと常時微動H/Vスペクトルのスペクトル振幅の統計的關係を導いて，その係数処理で常時微動H/Vスペクトル振幅を補正するものである．

常時微動H/Vスペクトルのスムージングは試行錯誤の上，項数500の二項式スムージング法⁷⁾を用いた．図-19および図-23で示した観測点S05_SENHの常時微動H/Vスペクトルに適用した結果が図-25に例示されている．図-25にみられるように，スムージングの適用により，H/Vスペクトルのピーク，谷が全体に平滑化されるが，二項式スムージングの安定性により原スペクトルの本質はさほど失われることなく，異常ピークが修正される特性をもつ．このようにスムージングされたH/Vスペクトルでも地震動のサイト増幅スペクトルとスペクトル振幅において大きな違いが相変わらず存在する．そこで，その違いを修正する経験的方法を検討した．

図-23の全観測点の比較でも明らかなように，常時微動H/Vスペクトルはスペクトル振幅のレベルこそ異なれ，全体のスペクトル形状は地震動のサイト増幅スペクトルに相似する．したがって，周期に関係なく，常時微動H/Vスペクトルの振幅に一定の係数を乗ずれば，地震動のサイト増幅スペクトルに近似することが期待できる．この係数を求めるために周期0.05秒～10.0秒の周期範囲での地震動のサイト増幅スペクトルと常時微動平滑化H/Vスペクトルそれぞれの平均スペクトル振幅を求めて，両者の比を検討してみた．この検討をSmall-Titanの20観測点で検討した結果，この比は明らかに常時微動の卓越周期と正の相関をもつことが認められた．ここに，常時微動の卓越周期として上記の周期範囲で最大のスペクトル振幅をもつ周期を機械的に採用した．その相関関係を図示したのが図-26である．図-26では全20観測点の結果に対数線形回帰を仮定した回帰式も与えられている．結局，常時微動観測により卓越周期と平滑化H/Vスペクトルが与えられれば，図-26

の回帰式からスペクトル振幅の増減係数が与えられるので，これを平滑化H/Vスペクトルに乗ずれば，常時微動による地震動のサイト増幅スペクトルが簡易的に予測できることになる．紙面の関係から20観

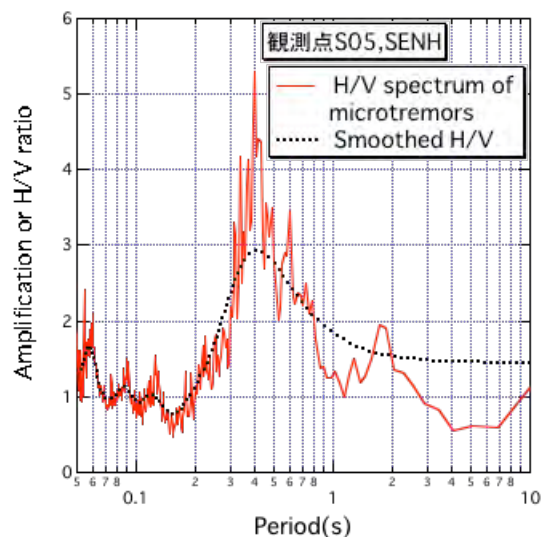


図-25 常時微動H/V スペクトルのスムージング例

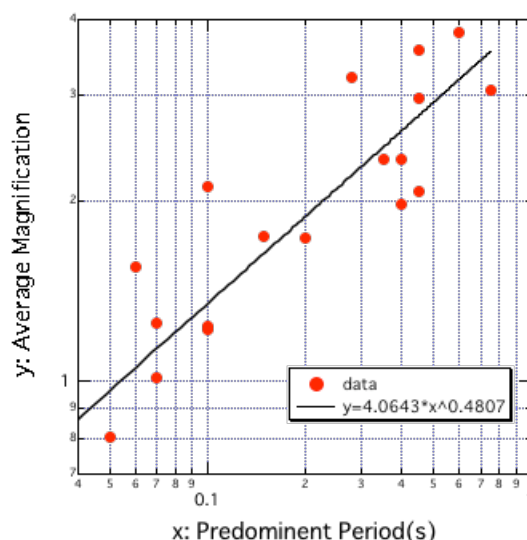


図-26 スペクトル比と卓越周期の関係

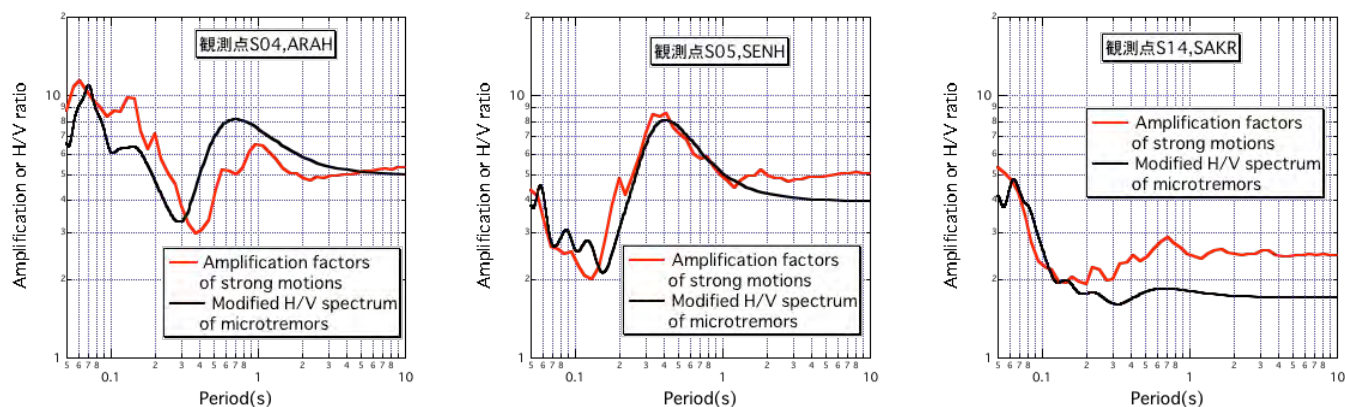


図-27 強震動増幅スペクトルと常時微動の修正H/V スペクトルの比較（代表例）

測点全部の比較は困難であるが、代表的観測点について、このように予測された増幅スペクトルとスペクトル比法により実測記録から求められた地震動のサイト増幅スペクトルの比較結果が図-27に示されている。観測点によるバラつきがあるものの、これらの代表的な観測点の比較から、簡単な方法の割にはスペクトル振幅、周期の両特性の面から実測、予測のサイト増幅スペクトルはよく一致していることがわかる。

6. むすび

仙台市圏で展開されているアレー地震観測システムSmall-Titanによる記録を利用して地震動のサイト増幅スペクトルと震度の増幅度を経験的に評価するとともに、それらのパラメータと常時微動特性との相関について考察した。これらの結果をまとめると以下ようになる。

(1) Small-Titanの全20観測点における地震動のサイト増幅スペクトルと震度の増幅度はサイト条件により大幅に異なる。平均的にみて仙台市圏では1.6程度の計測震度差が観測点により生じることが統計的に指摘できる。仙台市圏は特別に異常な地盤分布を示す地域ではないので、この地点変動は仙台市程度の地方都市での平均的な変動幅を与えるものと考えられる。

(2) 上述の震度増幅度の分布を地盤種別分布と比較すると明瞭な相関が認められる。すなわち、沖積低地でスペクトル振幅、震度とも増幅が大きく、洪積台地で相対的に小さい。

(3) 地震動のサイト増幅スペクトルのスペクトル強度は震度の増幅度と高い相関を有する。特に、周期0.1～1.秒の周期帯域で算定される地震動のサイトスペクトル強度は震度の増幅度と最も相関が高く、これから計測震度の決定因子として、この周期帯域の地震動振幅が大きな役割を果たしていることが推定される。

(4) 地震動のサイト増幅スペクトルと常時微動H/Vスペクトルの比較から両者の定義と尺度が異なるのでスペクトル振幅にレベルの差があるが、スペクトル形状については特に水平動増幅スペクトルと常時微動H/Vスペクトルについて相似が認められる。

(5) 震度の増幅度と常時微動H/Vスペクトルのスペクトル強度にはバラつきはあるものの正の相関が認められる。特に、周期帯域0.1～1.0秒のスペクトル強度の相関では相関係数0.785のかなり高い相関が得られている。これから、常時微動H/Vスペクトルのスペクトル強度はローカルサイトによる震度の増幅度予測に一定の利用が可能と考えられる。

(6) 周期0.05秒～10.0秒の周期範囲での地震動のサイト増幅スペクトルと常時微動の平滑化H/Vスペクトルそれぞれの平均スペクトル振幅は正の相関をもつことが認められた。この相関を与える回帰式による係数を用いることにより、常時微動のH/Vスペクトル振幅を補正して地震動のサイト増幅スペクトルを簡易に予測する方法を提案した。この方法は簡単な割にはかなりの一度度を示す予測を与えることが確認された。

参考文献

- 1) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した広域震度予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.447, pp51-56, 1993.
- 2) Kanai, K. and Tanaka, T.: *On microtremors VIII*, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.39, pp.97-114, 1961.
- 3) Lermo, J. and Chavez-Garcia, F. J.: Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.83, No.5, pp. 1574-1594, 1993.
- 4) 神山眞, 荘司雄一, 松川忠司, 浅田秋江, 中居尚彦: オンラインアレー地震観測システムの構築とその記録の若干の考察, 土木学会論文集 No. 688, pp283-298, 2001.
- 5) 荘司雄一, 神山 眞: Small-Titanの観測記録に基づく震源・伝播経路・ローカルサイト特性の推定, 土木学会論文集 No. 736, pp237-253, 2002.
- 6) 柿下 毅: 気象庁の新しい震度情報—推計震度分布—, 震災予防 No. 186, pp16-20, 2002.
- 7) Marchand P. and Marmet L.: Binomial smoothing, Review of Scientific Instruments, Vol.54, No.8, pp.1034-1041, 1983.

A STUDY ON LOCAL SITE EFFECTS USING AN ARRAY OBSERVATION SYSTEM OF STRONG MOTIONS

Makoto KAMIYAMA, Tadashi MATSUKAWA and Shunichi KATAOKA

The purpose of this paper is to compare spectral characteristics of strong ground motions and microtremors using records obtained at 20 sites of an array observation system. The array observation system is situated in Sendai City, Japan. Using the motion records observed by the system, the authors estimated statistically spectral amplification factors at each observation site. These spectral amplification

factors of strong ground motions are quite different depending on the local soil condition of each site. Microtremors were also observed at all the observation sites. The so-called H/V spectra, which are the spectral ratio of the horizontal component to the vertical one, were obtained from the microtremors. Comparisons between the statistical amplification factors of strong motions and H/V spectra of microtremors showed that they have strong similarity in spectral shape. Although such highly similar shape of spectra was found between the strong motions and microtremors, the absolute spectral amplitudes in both indicated a difference in level, revealing some remarkable offsets of spectral amplitude that are independent of period. Based on the comparisons, fitting analyses between the spectral amplification factors and H/V spectra of microtremors were made to obtain an optimal parameter of offset for the H/V spectra of microtremors. This paper finally concludes that microtremors are useful to obtain amplification factors due to local soil conditions with aid of an offset method of their H/V spectra.