

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560485
 研究課題名 (和文) P-S 波変換地震動の H/V 特性による広帯域ローカルサイト効果の
 解明と設計への導入
 研究課題名 (英文) A PRACTICAL STUDY ON THE BROAD-BAND SITE EFFECTS USING THE H/V
 CHARACTERISTICS OF STRONG MOTIONS TRANSFORMED FROM P TO S WAVES
 研究代表者
 神山 眞 (KAMIYAMA MAKOTO)
 東北工業大学・工学部・教授
 研究者番号：50085461

研究成果の概要 (和文)：地震動は大きく地震の震源の特性，地震波の伝播特性，地表近くの局所的な地盤特性の 3 要因によって支配される。特に，3 番目の要因はローカルサイト効果と呼称され，最も支配的な要因である。本研究では地震動および常時微動（諸々の自然ならびに人工的な振動源による微小な地盤振動）の二つの異なる振動を取り上げ，それらの振動の水平動 H と鉛直動 V の比である H/V 特性によりローカルサイト効果を評価する新たな手法を導いた。

研究成果の概要 (英文)：Strong ground motions are due to the three main factors: the source, propagation path and local site effects. Among the three effects, the third one is most important in light of damage potential. This research has developed a new method for estimating the local site effects by means of the H/V spectrum, which is the ratio of spectral amplitudes of horizontal motions with the one of vertical motions, dealing with both of strong motions and microtremors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：地震工学

科研費の分科・細目：土木工学・地震工学

キーワード：地震動，ローカルサイト効果，耐震設計，P-S 変換地震動，アレー観測

1. 研究開始当初の背景

(1) これまでの幾多の研究が行われているにも関わらず、地震被害の発生が繰り返されている。とりわけ、被害が特定の地域へ集中する傾向が強い。このことは構造物の強度におけるバラつきもさることながら、入力となる地震動のサイト依存性（ローカルサイト効

果）が地震被害の実態を決定付けてしまうことを示唆しているものと考えられる。確かに、現行の多くの耐震設計基準（例：道路橋示方書・耐震設計編、日本道路協会、平成 14 年 3 月）はローカルサイト効果の影響を考慮して、設計地震動にその影響係数を規定している。しかし、いずれの設計基準もローカルサイト

効果の導入を地盤種別という大系化で対処していることに加えて、その影響度倍率も最大で1/3~3の範囲(ファクター3)に規定しているのが実態である。過去の地震被害の経験に照らして、「この程度のローカルサイト効果の配慮だけで良いのか?」「これまでの地震被害の多くは場所による地震動の違いを軽視し過ぎたことにあるのではないのか?」という素朴な疑問から本研究課題は着想された。

(2) 上記の素朴な疑問を解決する手がかりを求めて、本研究課題代表者らは1998年から仙台市圏を対象にアレー強震観測網(Small-Titanと命名された仙台市圏約400km²に種々のサイト条件をもつ全部で20観測点を展開)を構築して、観測を継続している。この観測システムは観測点の展開に関して地盤条件に配慮した入念な配置設計が行われた観測網である。このサイトは期待通り、大変にサイズミシティが高く、本研究課題が開始されるまで500を越える各種タイプの地震による記録が得られている。その観測結果によれば、同一地震の条件でも地震動特性は観測点により大幅に変動して、その変動幅は種々の設計基準で規定している係数を大きく凌駕していることを発見している。また、個々の観測点における地震動の個性は極めて強く、単に第1種地盤、第2種地盤あるいは第3種地盤のように割り切った大系的な扱いは困難であることも把握している。例えば、第1種地盤に分類されると考えられる観測点間でもファクター3程度の増幅度の差が生じており、地盤種別の大系化に伴う問題が頻繁に観測された。これは、地盤種別の大系を細分化すれば解決される特性ではないことも確認されている。さらに、それらの膨大な強震記録を用いて各観測点における個性的な地震動増幅の程度を増幅スペクトルとその統計的変動という形で半経験的に算定していた。本研究課題はこれらSmall-Titanによる強震記録とその解析成果を基礎に、耐震設計法の充実に建設的に資するべく構想されたものである。

2. 研究の目的

(1) 本研究課題では、大きく次の三つの目的を設定している。一つには、ローカルサイト効果をもたらす地震応答メカニズムを実測と理論に基づき詳細に解明することである。二つには地点条件に即したサイト増幅を定量的に算定・評価する新たな簡易手法を開発し、その妥当性を実測地震観測に基づき確認することである。さらに、現行の耐震設計基準類で規定されている方法に代り、設計地震動への新たなローカルサイト効果の導入法を提案すること第三の目的としている。

(2) 第1のローカルサイト効果のメカニズム解明では仙台市圏20観測点をもつアレー観測システムSmall-Titanの記録を改めて洗い直して増幅スペクトルの統計的平均と地震によるバラツキの周期変動を算定する。ここでは、Small-Titanの記録を加速度、速度、変位と幅広く扱い、広帯域のローカルサイト効果による増幅特性の算定に努める。

(3) 上記のSmall-Titanの記録を利用した経験的な増幅特性を与えるローカルサイト効果のメカニズムを明らかにするため深さ500m程度までの不整形性を考慮した各観測点の地盤構造により実体波、表面波による応答計算を実施する。そのためには、地盤構造を詳細に把握する必要があるが、そのため変位記録により走時分析を進めるとともに常時微動のH/Vスペクトル解析およびアレー観測による分散解析を利用する。

3. 研究の方法

(1) アレー強震観測システムの利用

本研究課題ではこれまでの設計体系の強震動処理におけるサイト依存性の不十分性を実測の記録に即して明らかにすることを第一の目的としている。このための格好の観測システムとして本研究課題代表者が1998年から仙台市圏を対象に進めているアレー強震観測網Small-Titanを利用する。図1はその観測点配置を標高分布とともに示したものである。図1に示すように、この観測システムは種々の地盤条件をもつ20観測点から構成されており、観測開始以来、異なるタイプと位置の500を越える地震による加速度記録を得ている。本研究ではこれらの加速度記録から広帯域のローカルサイト効果を抽出するため速度、変位記録を数値積分により求

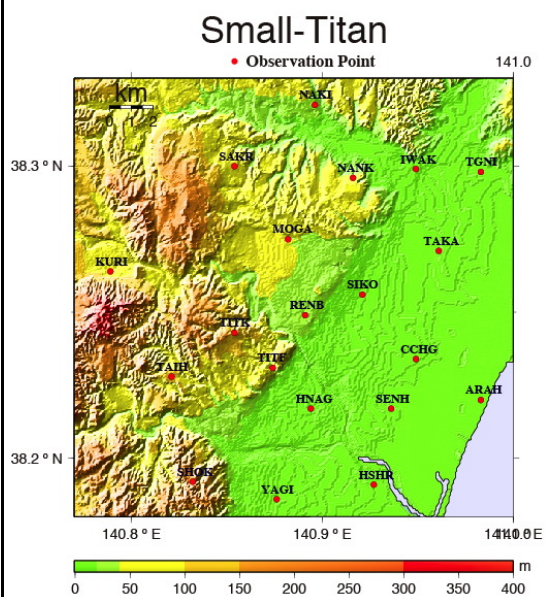


図1 アレー観測 Small-Titan の観測点

める。さらに、フーリエスペクトルや応答スペクトルなどの各種のスペクトルを算定して、それらに統計解析を施し、スペクトル比法によりローカルサイト効果に起因するサイト増幅スペクトルを抽出する。併せて、これらの波形、スペクトルの解析に加えて、強震動の大きさを決定する単一パラメータの代表として計測震度を取り上げ、ローカルサイト効果による計測震度の変動幅を定量的に算定する。以上の強震観測システムの記録に加えて、全 20 観測点において常時微動の観測を 1 点 3 成分観測法、3 角形アレー観測法により行なう。これらから、常時微動観測結果と強震アレー観測によるローカルサイト効果を比較して、常時微動により強震動のローカルサイト効果を推定する簡易な方法の案出をはかる。

(2) 地震応答シミュレーションの実施

ローカルサイト効果のメカニズム解明をはかるため、上記のように経験的に求められる仙台市圏 20 観測点の増幅スペクトルの統計的平均と地震によるバラツキの周期変動に焦点を合わせ、深さ 500m 程度までの不整形性を考慮した各観測点の地盤構造により実体波、表面波による応答計算を実施する。その前提として深さ 500m 程度までの深部構造、100m 以浅の浅部構造を共に把握するために周期 5 秒程度までの特性を反映することが期待される変位記録と微動アレー観測の表面波分散曲線の逆解析を両方利用する。理論応答計算は既に研究代表者が開発している擬似スペクトル法による計算コードを更に高度化して準三次元応答解析を試みる。このような理論的な考察により、Small-Titan の実測から得られている増幅度スペクトルがどの程度まで説明できるかを実体波、表面波などの波動論に即して明らかにする。

(3) H/V スペクトルの利用

ローカルサイト効果による増幅特性を評価する簡易手法として地表における 1 点 3 成分記録の H/V スペクトルが多用される。この手法は常時微動を対象とした場合、Rayleigh 波の水平動と鉛直動を利用した手法として解釈される。一方、地震動に対しては明確な理論的な背景のないまま、暗黙のうちに S 波主要動を対象とした水平動スペクトルの鉛直動スペクトルに対する比として用いられることが多い。サイト増幅評価のための本来の H/V スペクトルの応用はレシーバー関数の周波数領域表現に根拠を置いたものであるから、基盤への入射波の厳密な波動識別が必要である。図 2 に示すように、P 波、SV 波各々が地震基盤に入射したとき P-SV 変換波、SV-P 変換波が発生して複雑な重複反射が表層内で起きる。従って、それぞれの変換

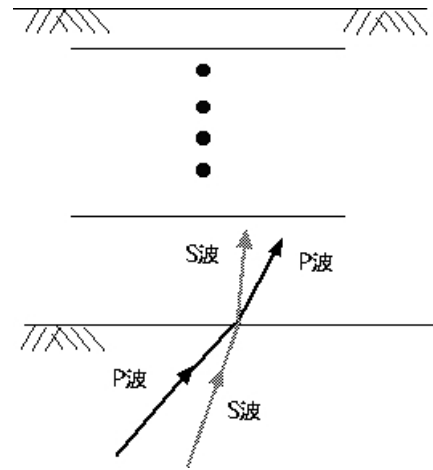


図 2 基盤への地震波入射との模式図

波の発生状況によっては基盤入射波の性質とは無関係のサイト増幅特性が地表の H/V スペクトルに現れることがあり得る。つまり、基盤に SV 波が入射したときの地表での位相の H/V スペクトルが必ずしも SV 波を対象としたサイト増幅特性とはならない。本研究では、この観点から基盤入射波の波動変換を考慮して、P 波初動における H/V スペクトルの有効性を理論、実測の両面から明らかにするとともに、P-SV 波変換地震動に焦点を合わせて、地震記録の初動位相から簡易に観測点の増幅スペクトルを算定する方法を検討する。

4. 研究成果

(1) 経験的増幅スペクトルの算定

Small-Titan 観測システムの全 20 観測点で全て地震記録を得た 49 地震を対象にスペクトル法により増幅スペクトルを算定した。こ

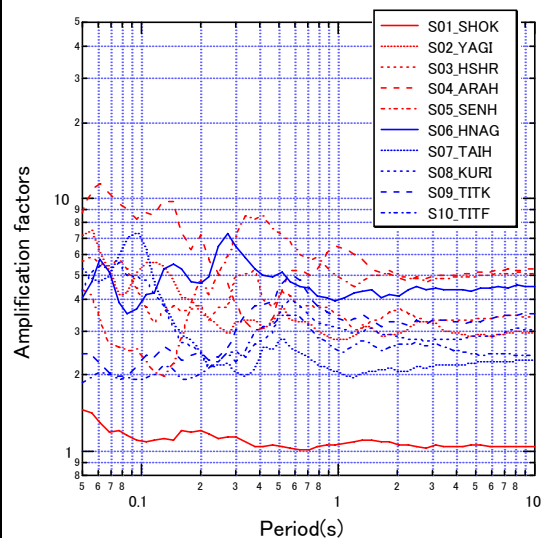


図 3 各観測点における水平動の増幅スペクトル (その 1)

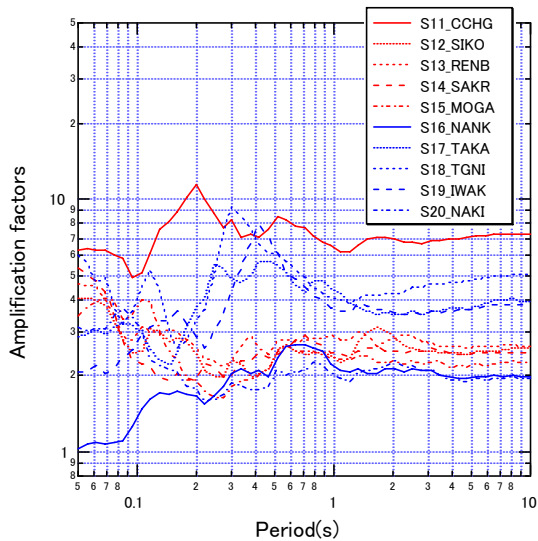


図4 各観測点における水平動Hの増幅スペクトル (その2)

ここで対象としたのは減衰定数 0.05 の速度応答スペクトル (水平動のみ) である。全 20 観測点の増幅スペクトルを図 3, 図 4 に示す。図 3,4 から明らかなように増幅スペクトルは各観測点のローカルサイト効果を反映して大幅に異なることがわかる。ここでの観測点は約 20km×20km の領域に分布するものであるが、この程度の領域広さであっても増幅度が周期ごとにローカルサイト条件により 10 倍程度差異で変動することが明らかとなった。このような増幅度の違いを実記録に従い定量的に明らかにしたことは本研究課題の大きな成果と考えられる。

(2) 震度と増幅スペクトルの関係

増幅スペクトルと同様に気象庁方式により算定した計測震度を対象にローカルサイトによる変動を統計的に求めた。これは設計震度のように地震動の大きさを単一パラメータで表現したときのローカルサイト効果の影響を被害に直結する計測震度を介して求めたものである。ここでは 49 地震において

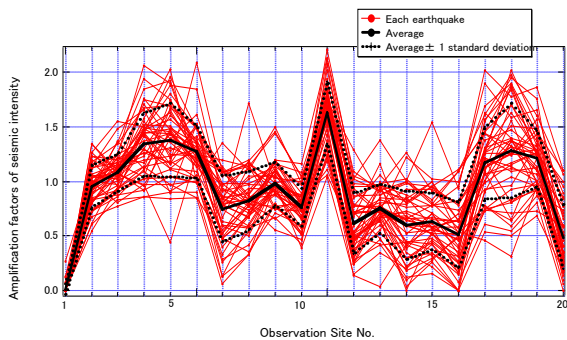


図5 震度増幅度の観測点変動(各地震の変動, 平均, 標準偏差)

Small-Titan

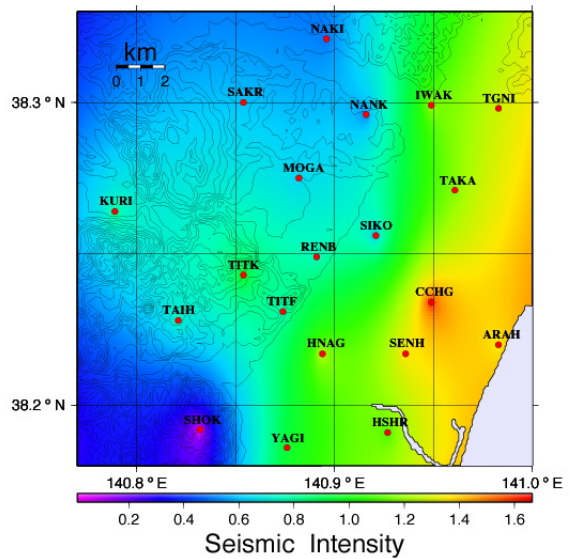


図6 震度増幅度の分布マップ

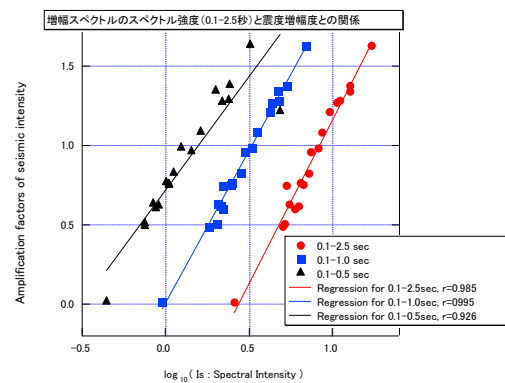


図7 震度増幅度と増幅スペクトル強度との相関

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。これらの算定された震度増幅度は地震ごとにバラツクが、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。その結果が図 5 に示されている。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。図 5 の観測点による震度変動 (平均値) を分布として示したのが図 6 である。これによりローカルサイト効果により震度がどのように変動するかがわかる。図 6 の分布を図 1 の地形分布と比較することにより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瞭然

である。次に、増幅スペクトルと震度の両者の相関について考察した。ここでは、増幅スペクトルを単一パラメータとして表現するため三つの周期帯域を対象としてスペクトル強度を算定して、そのようなスペクトル強度と震度増幅度との相関を検討した、この結果を図7に示す。図7に示すように、それぞれの周期帯域でよい相関が得られたが、ここで検討対象の周期範囲では0.1~1.0秒の周期帯域でのスペクトル強度が震度増幅度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ここでの検討対象では周期帯域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。

(3) 震度増幅度と常時微動 H/V スペクトル Small-Titan の20観測点において常時微動観測を実施して常時微動 H/V スペクトルを求めた。さらに、常時微動 H/V スペクトルから0.1~1.0秒の周期帯域でスペクトル強度を求めて、震度増幅度との相関を検討した。その結果、両者にはバラつきはあるものの相関係数0.785程度の正の相関が認められる。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。

(4) 常時微動による増幅スペクトル推定 Small-Titan の約10年にわたる観測から上記のように全20観測点の増幅スペクトルが経験的に求められた。これらから、ローカルサイト効果は諸耐震基準で定める設計震度のサイト係数よりも大幅に大きいことが判明したが、問題はこのようなローカルサイト効果の影響を観測によらず任意の地盤で簡単に事前予測が可能かどうかである。本研究課題の基本目的はこの検証にある。本研究では最初に上記に示した全20観測点の経験的なサイト増幅スペクトルとそれぞれの観測点で得られた常時微動 H/V スペクトルを統計的に比較して、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持つことをつきとめた。さらに、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導いた。この方法は簡単な割にはかなりの一致度を示す予測を与えることが確認された。この方法により常時微動の観測から推定されたサイト増幅スペクトルと地震観測によるサイト増幅スペクトルとの比較例(3観測点)を図8に示す。

(5) P-S 変換地震動による地盤構造 P-S 変換地震動により地盤構造を推定して地

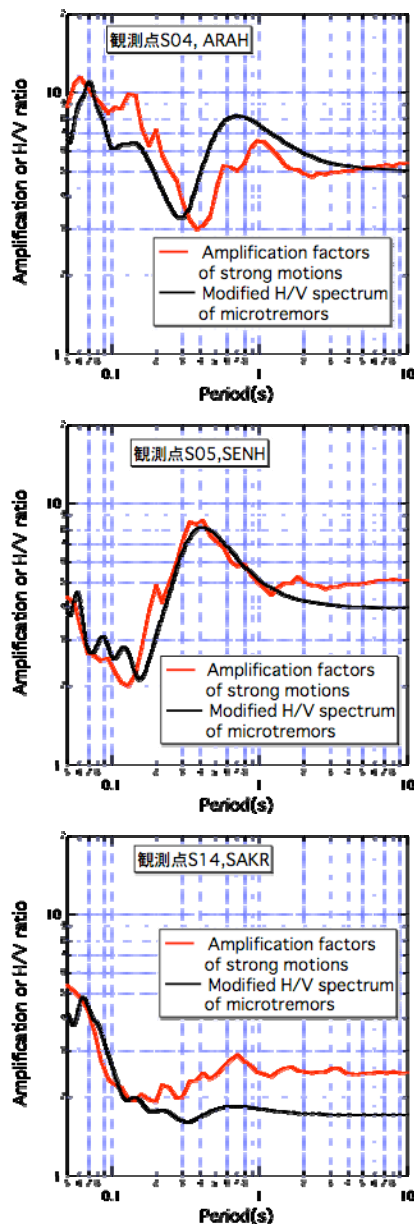


図8 地震動増幅スペクトルと常時微動による増幅スペクトル比較

震応答シミュレーションを実施した。Small-Titan20観測点における多くの地震による加速度、速度、変位記録のそれぞれについて震央距離に応じた走時解析を行なった。これらを見ると加速度、速度、変位記録に応じて観測点変動が異なる様相がみられる。その例を変位記録について示したのが図9である。図9に示すように変位記録には加速度記録には目立たない後揺れの振幅が顕著に見られ、しかもこれが観測点により大きく異なり、加速度記録で振幅が大きい沖積層地域よりも洪積層の観測点で後揺れ振幅が大きい傾向が観察される。変位記録では主要動と後揺れ時間帯での変動に明確な違いが見られ

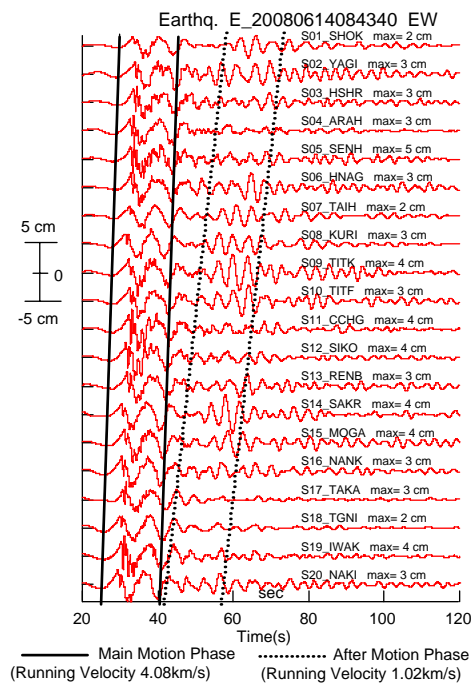


図9 変位記録の走時解析

る。主要動の変動では沖積層地域での震動が大きく水平方向での分布は観察されないのに対して、後揺れ部ではむしろ洪積層地域で震動が大きく、水平方向の伝播現象が顕著である。そこで、このような変位地震動における現象をペーストアップされた変位記録により走時解析を行った。この結果は図9に実線、点線でプロットされている。図9では主要動と後揺れを対象とした位相の走時がそれぞれ実線と点線で示されている。それぞれの伝播速度は主要動で4.08km/s、後揺れで1.02km/sと求まる。これから主要動は地殻のS波速度にほぼ等しいので地殻を伝播するS波に起因すると推定される。一方、後揺れはこのような地殻を基盤とする二次的に発生される表面波(Love波)と推定される。後揺れのLove波の特性を明らかにするためLove波の理論分散解析を行った。このような分散解析から推定される仙台市圏における地殻から表層にいたる地盤構造を推定して、このような深部までの地盤構造を対象に擬似スペクトル法により応答計算を行ない、表面波が周期2秒程度より長周期帯域においてローカルサイト増幅を大きく支配することを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① 神山 眞, 松川忠司, 片岡俊一: アレー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, 土木学会地震工学論文集, 査読有, Vol.30, 2009, 38-51

- ② Makoto Kamiyama and Tadashi Matsukawa: A new method for analyzing the period-time variations of strong ground motions, Proceedings of the 14-th World Conference on Earthquake Engineering, 査読有, CD-ROM Vol.1, 2008, 1-11

- ③ 神山 眞, 長内優也, 松川忠司, 地盤一建物アレー観測による震度の設置環境変動, 日本地震工学学会論文集, 査読有, 第7巻, 2007, 17-36

- ④ 中村 晋, 澤田純男, 吉田望: 多層構造を有するは斜面の地震時永久変形の簡易評価手法とその適用性, 土木学会論文集C, 査読有, Vol.63, 2007, 26-284

〔学会発表〕(計25件)

- ① 戸村光晶, 石崎和博, 神山 眞, 松川忠司: 変位による仙台市圏における長周期地震動特性, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2010年3月6日, 日本大学工学部

- ② 神山 眞, 松川忠司: 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, 第30回土木学会地震工学研究発表会, 2009年5月19日, 東京大学地震研究所

- ③ 板橋広輝, 寛 武, 中村 晋: 常時微動と地盤調査データに基づく道路盛土の振動性状, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2010年3月6日, 日本大学工学部

〔その他〕

ホームページ等

<http://smweb.tohtech.ac.jp/smalltitan/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神山 眞 (KAMIYAMA MAKOTO)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号: 50085461

(2) 研究分担者

松川 忠司 (MATSUKAWA TADASHI)

東北工業大学・工学部・助手

研究者番号: 00165789

(3) 連携研究者

中村 晋 (NAKAMURA SUSUMU)

日本大学・工学部・教授

研究者番号: 40307806

(H19: 研究分担者)