

# 論文目録

常時微動 H/V スペクトル比による地盤ハザード評価に関する研究  
Study on Ground Hazard Evaluation by Microtremor H/V Spectrum Ratio

工学研究科 建築学専攻  
神奈川大学工学部特別助手 落合 努

本論文に関連した発表論文

## 1. 主論文（査読付き）

- 1) 落合努、山本俊雄、服部秀人、荻本孝久：高密度微動観測を用いた相模平野の表層地盤振動特性のゾーニングに関する研究、地域安全学会論文集、No. 5、pp. 21-26、2003.
- 2) Ochiai, T. and Enomoto, T.: Development of Detailed Micro-Land Form Database and Its Application to Site Amplification Characteristics in Kanagawa Prefecture, Japan., Journal of Geographic Information System, Vol. 11, No.1 pp. 66-81, 2019.
- 3) 落合努、犬伏徹志、荻本孝久：常時微動による地域特性を考慮したハザードマップの作成、日本地震工学会論文集、第 19 巻、第 5 号、pp. 5\_136-5\_145、2019.
- 4) Ochiai, T. and Enomoto, T.: Analysis on Predominant Periods Distribution by Microtremor Observations for Seismic Disaster Prevention in Yokohama, Japan Using GIS, Journal of Geographic Information System, Vol. 11, No.5, pp. 579-594, 2019.
- 5) Ochiai, T. Inubushi, T. and Enomoto, T.: Creation of Hazard Maps by Considering Regional Characteristics by Microtremors, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.20, No.8, 2020.
- 6) Ochiai, T. and Enomoto, T.: Multi-Hazard Evaluation Using Cluster Analysis -for Designated Evacuation Centers of Yokohama, Journal of Geographic Information System, Vol. 13, No.2, pp. 243-259, 2021.
- 7) Ochiai, T. and Enomoto, T.: Study on hazard evaluation method for surface ground using response spectrum, 17<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, C000582, 2021.
- 8) 落合努、張海仲、荻本孝久：表層地盤増幅率のハザード評価手法の提案 -SH 波伝達関数と応答スペクトル増幅率の関係-、土木学会論文集、2021. (投稿中)
- 9) 落合努、荻本孝久、松田磐余：地形発達史が異なる地形区の常時微動 H/V スペクトル比と堆積層厚の関係 ハザードマップに常時微動を適用するための一考察、日本地震工学会論文集、第 21 巻、第 5 号、pp.1-12、2021.
- 10) Ochiai, T., Enomoto, T., Oda, Y., Miyano, M., Ikuta, E. and Manuel N.: Study on the development of simplified seismic risk evaluation method using microtremor observation results - Approach from comparison between residential house damage due to past earthquakes and microtremor observation results -, 14<sup>th</sup> the Society of Exploration Geophysicists of Japan International Symposium, DM-P-03, 2021.

## 2. シンポジウム

- 1) Ochiai, T., Enomoto, T., Abeki, N. and Maeda, T.: Seismic Micro-zonation of Predominant Period of Ground in Sagami Plain Using H/V Spectral Ratio, 6<sup>th</sup> International Conference on Seismic Zonation, II -22B, 2000.
- 2) Ochiai, T., Enomoto, T., Yamamoto, T. and Abeki, N.: Study on the Seismic Microzonation in Sagami Plain Using Spatially Dense Microtremor Measurement, 7<sup>th</sup> International Joint WorkShop on Seismic Microzonation and Risk Reduction, pp.213-224, 2009.
- 3) 落合努、栗山利男、橋本光史、荏本孝久、露木延夫、山本俊雄：デジタル詳細地域危険度マップ作成と防災活動支援に関する研究：第 13 回日本地震工学シンポジウム、pp.2035-2038、2010.
- 4) 落合努、先名重樹、馬赫、犬伏徹志、荏本孝久：常時微動を用いた浅部地下構造探査による地盤構造の推定 -秦野盆地を対象として-、第 14 回日本地震工学シンポジウム、pp.3017-3024、2014.
- 5) 落合努、犬伏徹志、荏本孝久：常時微動観測による地域特性を考慮したハザードマップの作成、第 15 回日本地震工学シンポジウム、pp.2150-2157、2018.
- 6) 落合努、荏本孝久、先名重樹：2019 年 6 月山形県沖の被害と地盤震動特性の検討、第 48 回地盤震動シンポジウム 地盤震動研究の現状を聞く、pp.49-52、2020.

## 3. その他学会発表

- 1) 落合努、荏本孝久、精木紀夫：長岡平野における微動観測と地盤震動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.269-270、1999.
- 2) 前田俊之、前田直樹、精紀男、正木和明、荏本孝久、落合努、村山秀幸、中島康雅：屈折法探査による座間一平塚測線の地下構造調査、地球惑星科学関連学会合同大会予稿集、Sg-P006、2000.
- 3) 荏本孝久、落合努、笠谷学、柳川克弥、精木紀男：ベネズエラ・カラカス市における地震災害危険度評価に関する研究 -微動観測に基づく地盤の周期特性と建物被害に関する基礎的検討-、日本建築学会学術講演梗概集、pp.262-270、2000.
- 4) 落合努、荏本孝久、精木紀男、前田俊之：相模平野における高密度微動観測 -その 1 平塚市を対象とした結果-、日本建築学会学術講演梗概集、pp.259-260、2000.
- 5) 前田俊之、精木紀男、荏本孝久、落合努：相模平野における高密度微動観測 -その 2 茅ヶ崎市・寒川町を対象とした結果-、日本建築学会学術講演梗概集、pp.261-262、2000.
- 6) 落合努、荏本孝久：常時微動観測とボーリングデータの比較 -東京都内 3 地点について-、全地連技術 e-フォーラム 2004、39、2004
- 7) 落合努、杉本実、露木延夫、山本俊雄、荏本孝久：表層の地盤情報抽出を目的とした高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.93-94、2006.
- 8) 落合努、山本俊雄、露木延夫、荏本孝久：横浜市青葉区における高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.253-254、2007.
- 9) 落合努、山本俊雄、露木延夫、荏本孝久：横浜市神奈川区・西区の高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.929-930、2008.
- 10) 山本俊雄、落合努、荏本隆久、ラヒミアンマホモッド：横浜市中区・南区・磯子区・港南区の高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.49-50、2009.
- 11) 落合努、栗山利男、橋本光史、荏本隆久、山本俊雄：地域の地形に対応した地震防災マップの作成(その 4) 地域危険度マップの作成、日本建築学会学術講演梗概集、pp.213-214、2009.

- 12) 橋本光史、栗山利男、落合努、荻本隆久、山本俊雄：地域の地形に対応した地震防災マップの作成(その5)AVS30に基づく固有周期と常時微動測定に基づく卓越周期の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.215-216、2009.
- 13) 落合努、栗山利男、荻本孝久、山本俊雄：地盤情報データと常時微動観測結果を活用した地盤構造の推定に関する研究 ―地盤構造が複雑な地点での常時微動観測の適用―、日本建築学会学術講演梗概集、pp.159-160、2011.
- 14) 荻本孝久、栗山利男、落合努、上野直洋、山本俊雄：微動 H/V スペクトル比による表層地盤震動特性の評価に関する研究 ―卓越周期の推定による地盤増幅率の検討―、地域安全学会梗概集、No.30、2012
- 15) 湯浅暁、荻本孝久、犬伏徹志、落合努：地盤のサイト特性の評価に関する基礎的検討 SH波の伝達関数とレーリー波 H/V 比による地盤震動特性の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.397-398、2014.
- 16) 木村克己、大井昌弘、花島祐樹、落合努：千葉市沿岸平野域のボーリングデータに基づく高精度浅部地盤モデル、第50回地盤工学研究発表会、pp.271-272、2015
- 17) 落合努、井上駿、犬伏徹志、荻本孝久：地域の地盤特性を反映した新しいハザードマップの作成、地域安全学会梗概集、No.40、2017
- 18) 栗山利男、井上駿、荻本孝久、犬伏徹志、落合努、馬赫：単点微動観測に基づく神奈川県域の地盤震動特性評価 その1 H/V スペクトル比を用いた地盤震動特性情報データベース、日本建築学会学術講演梗概集、pp.325-326、2017.
- 19) 井上駿、荻本孝久、犬伏徹志、落合努、栗山利男、馬赫：単点微動観測に基づく神奈川県域の地盤震動特性評価 その2 卓越周期・増幅率分布とハザード評価、日本建築学会学術講演梗概集、pp.327-328、2017.
- 20) 落合努、犬伏徹志、荻本孝久：卓越周期と増幅率を用いたハザード評価法の適用性に関する基礎的検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.595-596、2018.
- 21) 落合努、荻本孝久、犬伏徹志：横浜市強震計ネットワークの強震記録と常時微動観測結果の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.513-514、2019.
- 22) 荻本孝久、落合努、犬伏徹志：応答スペクトルによる表層地盤のハザード評価法に関する基礎的研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.617-618、2019.
- 23) 落合努、荻本孝久：2019年6月山形県沖の地震の被災地域における地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.107-108、2020.
- 24) 荻本孝久、落合努、栗山利男：応答スペクトルによる表層地盤のハザード評価法に関する基礎的研究 ―その2. 規則的な多層地盤および不規則な実地盤モデルによる検討―、日本建築学会学術講演梗概集、pp.109-110、2020.
- 25) 落合努、荻本孝久、宮野道雄、生田英輔：過去の地震による家屋被害と常時微動観測結果の比較 その1 1974年伊豆半島沖地震を対象として、日本建築学会学術講演梗概集、pp.329-330、2021.
- 26) 荻本孝久、落合努、宮野道雄、生田英輔：過去の地震による家屋被害と常時微動観測結果の比較 その2 1995年兵庫県南部地震を対象として、日本建築学会学術講演梗概集、pp.331-332、2021.

以上

# 論文和文要旨

常時微動 H/V スペクトル比による地盤ハザード評価に関する研究

Study on Ground Hazard Evaluation by Microtremor H/V Spectrum Ratio

工学研究科 建築学専攻

神奈川大学工学部特別助手 落合 努

## 1. 概要

本論文では主に広域での防災・減災のための利活用を目的に、単点常時微動観測結果を用いた新たな地盤ハザード評価手法について提案する。本論文では、まず常時微動に関するこれまでの研究内容や課題を整理した。そのあと提案する地盤ハザード評価手法を説明するとともに研究対象とした地域の地形概要をまとめる。また、提案する手法に対し、モデル地盤や実地盤を用いた数値解析により理論的な妥当性についての検討や、地震観測記録を用いた地盤震動特性の比較検討を行い、常時微動の利活用による地盤ハザード評価法の有用性を示す。最後に、実際の地震被害を対象に提案する地盤ハザードと地震被害との比較から、同手法の適用性についての確認をおこなう。

## 2. 論文構成

本論文は、以下の7章構成となっている。

第1章「序論」では、防災・減災のための地盤ハザード等評価手法の現状や課題、常時微動を用いた地盤評価手法における既往の研究を整理し本研究の位置づけを明確とする。

第2章「地盤ハザード評価手法の提案」では、具体的な地盤ハザード評価手法の提案を行う。エネルギーの釣り合いを考慮しつつ、広域な地盤評価が可能な簡便な手法として、単点の微動 H/V スペクトル比の卓越周期とピーク値を乗じたものを簡易地盤ハザード評価値と定義し、算定式などを整理した。

第3章「微動による地盤の卓越周期評価と課題」では、具体的な3つの地域を対象に検討事例を整理した。検討地域は「神奈川県中央部」、「横浜市」、「神奈川県東部」とし、微動の定点連続観測による安定性の確認や、地形発達史を考慮した地形区分により特性が異なることなどを確認した。

第4章「数値解析を用いた検討」では、提案している簡易地盤ハザード評価値について、仮想のモデルや実地盤モデルを用いた数値解析によって、理論的な妥当性についての検討を行った。検討は、数値解析から求める SH 波伝達関数とスペクトル強度 (SI 値) の比較や、微動による簡易地盤ハザード評価値を比較す

ることで、その妥当性を確認した。

第5章「強震記録との比較と横浜全域の課に地盤ハザード評価」では、常時微動観測と強震記録の比較から、実際の地震時の特性を微動観測でとらえられているかの確認を行った。また、横浜全域の約5700地点を対象に、具体的に簡易地盤ハザード評価値を算出し、既往の検討資料との比較をおこなった。

第6章「過去の地震被害による適用性の確認」では、過去の被害地震と比較的近年に発生した被害地震に分けて、今回の手法の適用性について確認を行った。過去の被害としては1923年関東地震や1974年伊豆半島地震などを対象に、近年の地震としては2016年熊本地震を対象とした。検討方法は、まず地震による建物被害の情報を収集した。一方で、建物被害の分布を包含するような範囲で常時微動を観測し、地盤ハザードを算出する。その両者を比較すると、いずれの地震に対しても正の相関（建物被害が大きい地域は地盤ハザード評価値も大きい）が確認でき、提案する地盤ハザード評価手法を用いることの有効性が確認できた。2016年熊本地震に関しては、地震動強さや建物年代を考慮した検討を行い、本手法の適用性について一覧表で整理した。また、最後に現在広域な地盤ハザード評価手法として一般的に使われている、J-SHISの地盤増幅率と本手法の比較を行った。両者と建物被害との相関を比較すると、本手法の相関係数の方が高く、手法の有効性が確認できた。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後の課題を示す。

# **Abstract**

Study on Ground Hazard Evaluation by Microtremor H/V Spectrum Ratio

Kanagawa University Tsutomu Ochiai

In this paper, we propose a new ground hazard evaluation method using single-point constant tremor observation results, mainly for the purpose of utilization for disaster prevention and mitigation in a wide area. In this paper, we first organized the research contents and issues related to constant tremors. After that, we will explain the proposed ground hazard evaluation method and summarize the topographical outline of the area studied. In addition, for the proposed method, we will examine the theoretical validity by numerical analysis using model ground and actual ground and compare and examine the ground vibration characteristics using seismic observation records, and constantly utilize fine movements. It shows the usefulness of the ground hazard evaluation method. Finally, we will confirm the applicability of this method by comparing the ground hazards proposed for actual earthquake damage with the earthquake damage.

博士学位論文

常時微動 H/V スペクトル比による

地盤ハザード評価に関する研究

Study on Ground Hazard Evaluation by

Microtremor H/V spectrum Ratio

落合 努

2022 年 1 月

神奈川大学大学院工学研究科

建築学専攻

## 論文要旨

本論文では、主に広域での防災・減災のための利活用を目的に、単点常時微動観測結果を用いた新たな地盤ハザード評価手法について提案する。そのため、まず常時微動に関するこれまでの研究内容や課題を整理した。そのあと提案する地盤ハザード評価手法を説明するとともに、研究対象とした地域の地形概要をまとめる。また、提案する手法に対し、モデル地盤や実地盤を用いた数値解析により理論的な妥当性についての検討や、地震観測記録を用いた地盤震動特性の比較検討を行い、常時微動の利活用による地盤ハザード評価法の有用性を示す。最後に、実際の地震被害を対象に提案する地盤ハザード値と地震被害との比較から、同手法の適用性についての確認を行う。

本論文は、以下の7章構成となっている。

第1章「序論」では、防災・減災のための地盤ハザード等評価手法の現状や課題、常時微動を用いた地盤評価手法における既往の研究を整理し本研究の位置づけを明確とする。

第2章「地盤ハザード評価手法の提案」では、具体的な地盤ハザード評価手法の提案を行う。現在の耐震理論では、エネルギーの釣り合いを考慮した地震動評価が採用されている。このことに配慮した、広域な地盤評価が可能な簡便な手法として、単点微動 H/V スペクトル比の卓越周期とピーク値を乗じたものを地盤ハザード値と定義し、算定式などを整理した。

第3章「微動による地盤の卓越周期評価と課題」では、具体的な3つの地域を対象に検討事例を整理した。検討地域は「神奈川県中央部」、「横浜市」、「神奈川県東部」とし、微動の定点連続観測による安定性の確認や、地形発達史を考慮した地形区分により特性が異なることなどを確認した。

第4章「数値解析を用いた検討」では、提案している地盤ハザード値について、仮想の地盤モデルや実地盤モデルを用いた数値解析によって、理論的な妥当性についての検討を行った。検討は、数値解析から求める SH 波伝達関数とスペクトル強度 (SI 値) の比較や、単点微動による地盤ハザード値を比較することで、その妥当性を確認した。

第5章「強震記録との比較と横浜全域の地盤ハザード評価」では、常時微動観測と強震記録の比較から、実際の地震時の特性を微動観測でとらえられているかの確認を行った。また、横浜全域の約 5700 地点を対象に、具体的に地盤ハザード値を算出し、既往の検討資料との比較を行った。

第6章「過去の地震被害による適用性の検討」では、過去の被害地震と比較的近年に発生した被害地震に分けて、今回の手法の適用性について検討を行った。過去の被害としては 1923 年関東地震や 1974 年伊豆半島地震などを対象に、近年の地震としては 2016 年熊本地震を対象とした。検討方法は、まず地震による建物被害の情報を収集した。一方で、建物被害の分布を包含するような範囲で常時微動を観測し、地盤ハザード値を算出する。



その両者を比較すると、いずれの地震に対しても正の相関（建物被害が大きい地域は地盤ハザード値も大きい）が確認でき、提案する地盤ハザード評価手法を用いることの有効性が確認できた。2016年熊本地震に関しては、地震動強さや建物年代を考慮した検討を行い、本手法の適用性について整理した。また最後に、現在広域な地盤ハザード評価手法として一般的に使われている、J-SHISの地盤増幅率と本手法の比較を行った。両者と建物被害との相関を比較すると、本手法の相関係数の方が高く、手法の有効性が確認できた。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果を総括する。

# 目次

第1章	序論.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	微動に関する既往の研究.....	6
1.3	本論文の位置づけと目的.....	12
1.4	本論文の構成.....	13
第2章	地盤ハザード評価手法の提案.....	15
2.1	はじめに.....	15
2.2	新たな地盤ハザード評価手法の提案.....	16
2.3	神奈川県を対象とした地形区分の整理.....	19
2.4	まとめ.....	25
第3章	微動による地盤の卓越周期評価.....	26
3.1	はじめに.....	26
3.2	微動による地盤の卓越周期評価.....	27
3.2.1	神奈川県中央部のマイクロゾーニング.....	27
3.2.2	横浜市の卓越周期分布.....	38
3.2.3	神奈川県東部の卓越周期と堆積層厚.....	45
3.3	まとめ.....	58
第4章	表層地盤モデルを用いた数値解析による検討.....	59
4.1	はじめに.....	59
4.2	SH波伝達関数とSI値の関係.....	60
4.3	微動H/Vスペクトル比とSH波伝達関数の関係.....	70
4.4	SH波伝達関数による地盤ハザード値関係.....	89
4.5	まとめ.....	98
第5章	強震記録との比較と横浜市全域の地盤ハザード評価.....	99
5.1	はじめに.....	99
5.2	微動観測と強震記録の比較.....	100
5.3	横浜市を対象とした地盤ハザード評価.....	109
5.4	まとめ.....	116
第6章	地震被害を用いた適用性の検討.....	117
6.1	はじめに.....	117
6.2	過去の被害地震を対象とした検討.....	118
6.2.1	1923年関東地震.....	118
6.2.2	1974年伊豆半島沖地震.....	122
6.3	2016年熊本地震を対象とした検討.....	125

6.3.1	地震の概要 .....	125
6.3.2	検討対象地域の被害分布 .....	125
6.3.3	地盤ハザード評価と地震被害の比較 .....	128
6.3.4	地震動強さを考慮した比較 .....	129
6.4	現在提案されている他の評価指標との比較 .....	134
6.5	まとめ .....	136
第7章	結論 .....	137
	参考文献 .....	140
	本論文に関連した査読付き論文リスト .....	143
	本論文に関連した口頭発表論文リスト .....	144
	謝 辞 .....	147

# 第 1 章

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

### (1) 研究背景の概要

本論では、主に広域での防災・減災のための利活用を目的に、単点の常時微動観測結果である H/V スペクトル比を用いた新たな地盤ハザード評価手法について提案する。この研究の背景として、大きく以下の3つの観点からまとめる。

- ・ サイト増幅特性の重要性
- ・ 近年の地震活動の状況
- ・ 微動研究の進展と活用

### (2) サイト増幅特性の重要性

地震などによる建物被害は、建物自体の耐震性だけでなく対象地点の地盤構造の影響を受けることは良く知られている。一般に、建物に入力される地震動は、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性によって決定される（図 1.1）。

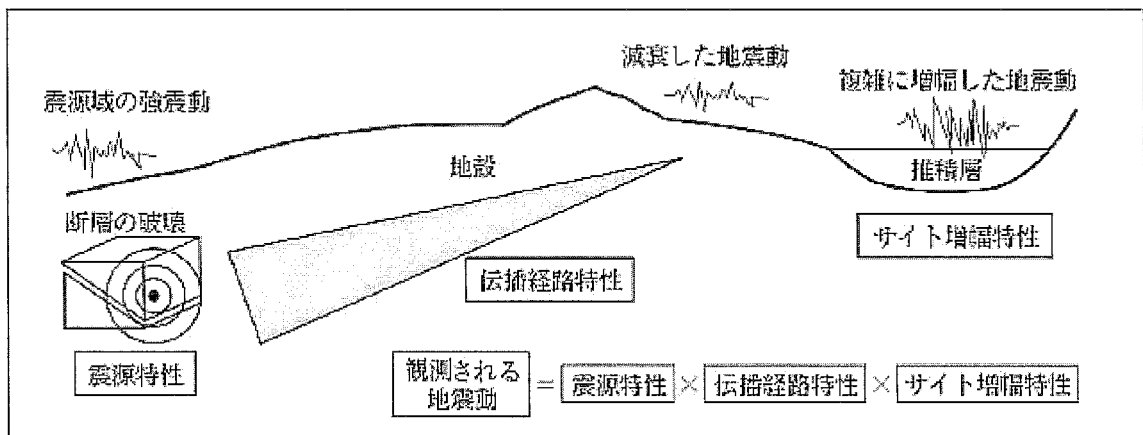


図 1.1 地震動の特性<sup>1)</sup>

震源特性は、断層面でのすべり量や破壊過程によって地震波の特性が決定され、巨視的パラメータや微視的パラメータに分けられ、震源パラメータが重要となる。主に地震学の分野で精力的に研究が行われていて、発生した地震に対して逆解析などからパラメータを設定し、再現性が高いモデルの設定は可能となりつつある。一方で、今後発生が想定される地震に対しては、適切なパラメータを設定することは現時点では難しい。そのため防災的な観点では、恣意的に特定の地域の地震動が大きくなるようなパラメータの設定や、パラメータをランダムにばらつかせて大量なケースを想定し最大値を抽出する事などが行わ

れている。そのため、不確定性を含む特性となる。

伝播経路特性は、断層から放射された地震波が硬い地殻内をたどって対象地点近傍まで至る経路で地震動が変化する特性である。こちらも、地震学や物理探査の分野で様々な研究がすすめられている。伝播経路が異なることによって減衰性が大きく異なることが確認されており、過去の地震記録から抽出する経験的な手法が良く用いられる。一般に、現時点でも未解明な点も多く、伝播経路特性も不確定性を含む特性である。

サイト増幅特性は、一般にせん断波速度が 3000m/s 程度以上である地震基盤より上部の堆積層によって地震動が変化（増幅）される特性である。主に地震工学や地盤工学の分野で研究がすすめられ、比較的近い地点でも地震動特性が大きく異なる事例が多く確認されている<sup>(例えば2)</sup>。また、筆者らが行った地震被害調査でも、構造や建築年代が似たような建物が少し離れるだけで、全壊の建物と無被害の建物が確認された事例を数多く確認している。図 1.2 は、2016 年熊本地震発生後に筆者らが行った被害調査の事例である。2 つの建物は同一の地区で、外観からのみの判断であるが両者は比較的新しい木造の建物である。写真 a) は 1 層が層崩壊しているのに対し、写真 b) は目立った損傷は確認できない。



a)層崩壊した木造アパート

b)ほぼ無被害の木造家屋

図 1.2 近接した建物の被害の違い (2016 年熊本地震の南阿蘇村の例)

また、サイト増幅特性は、主にせん断波速度が 400m/s 程度の工学的基盤上の表層付近の堆積層の影響で大きく異なることがわかっている。震源特性や伝播経路特性に比べて、地震防災を進めるために対策（地盤改良などの物理的な特性の変更だけでなく地盤条件が良い場所への移動なども含む）が可能であることもサイト増幅特性の特徴である。

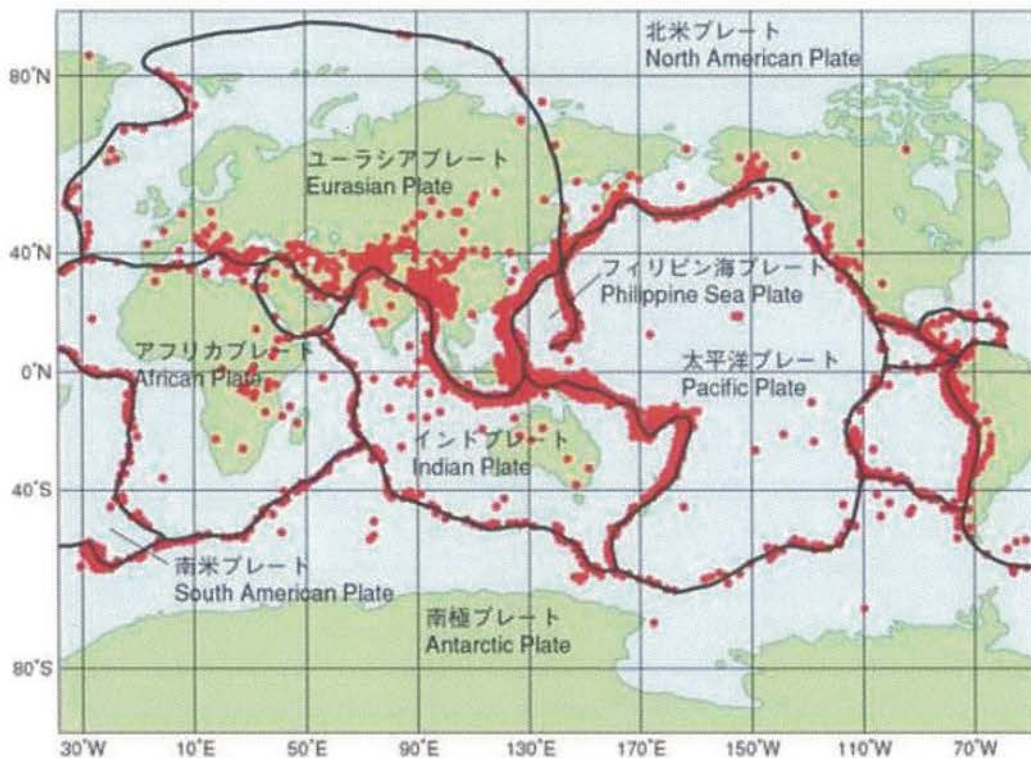
このような状況から、地震防災を進めるうえでこのサイト増幅特性を把握することが重要であり、微動観測を用いたサイト増幅特性の評価手法の確立は重要であると考えられている。

### (3) 近年の地震活動状況

一方で、日本は4枚のプレート境界に位置し世界有数の地震活動が活発な地域にあたる(図1.3)。内閣府資料によると、1994年~2003年に発生したマグニチュード6.0以上の地震は960回であり、そのうちおよそ23%である220回は日本周辺で発生している<sup>3)</sup>。

また、東京近辺の過去の歴史地震の分析から、地震の発生は静穏期と活動期があることが知られている。近年比較的規模の大きな地震が多く発生しており、地震の活動期に入っている可能性が示唆されている(図1.4)。

このように地震活動が活動期となった今日、地震防災を進めるうえで、より詳細にサイト増幅特性を把握するために、微動観測を用いた分析は重要で、課題を整理しつつ新たな評価手法の確立は重要であると考えられている。



注) 1991~2001年。マグニチュード5以上、100kmより浅い地震。  
資料: アメリカ地質調査所の震源データをもとに気象庁において作成

図 1.3 世界の地震の分布<sup>3)</sup>

## ■首都直下地震の切迫性

南関東では、数百年間隔で発生する関東大地震クラスの地震の間に、マグニチュード7クラスの直下型地震が数回発生する。大都市直下で発せ下場合、多大な被害が生じる。

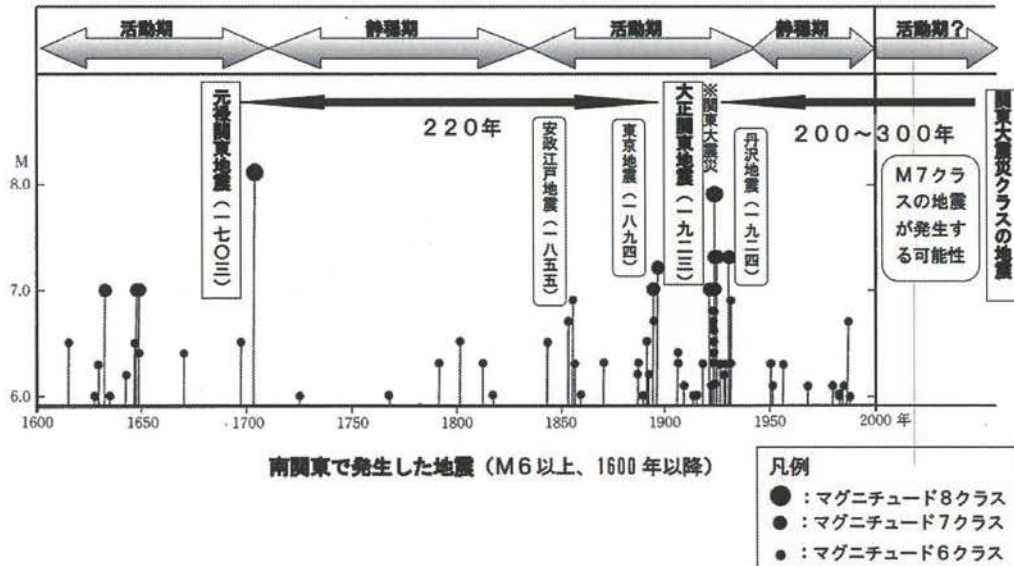


図 1.4 南関東で発生した地震 (M6 以上、1600 年以降) <sup>3)</sup>

### (4) 微動研究の進展と活用

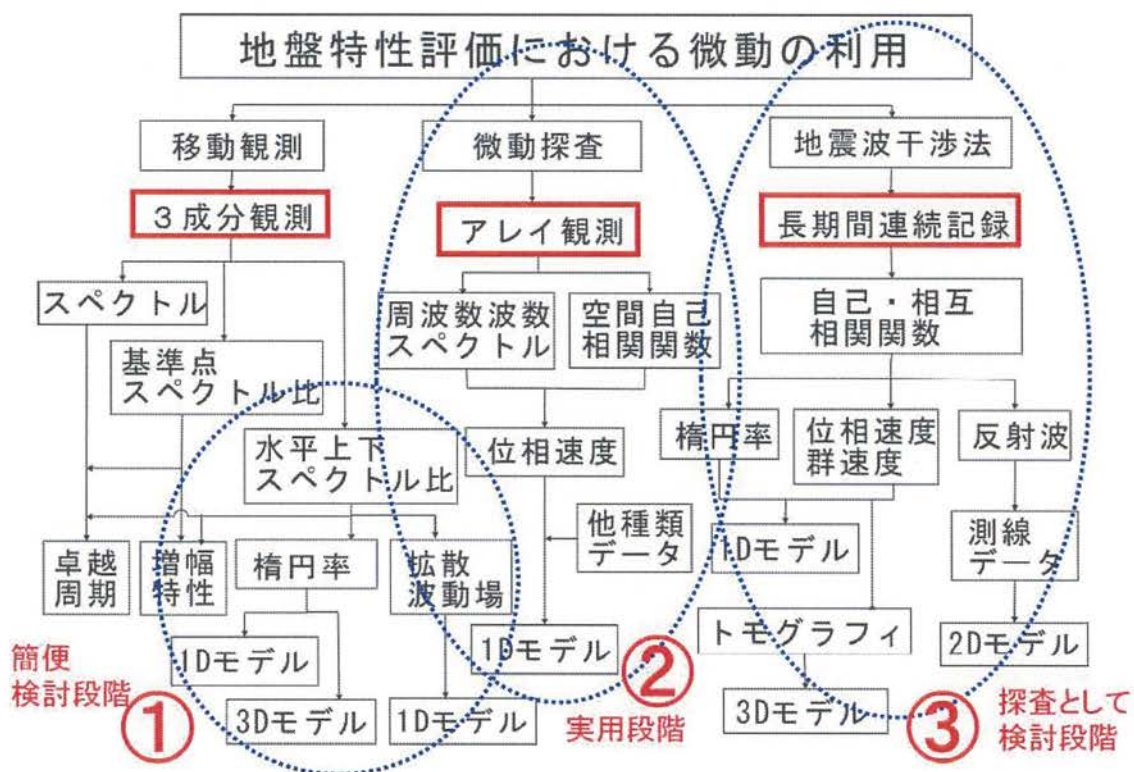
微動研究の進展の詳細は次節に後述するが、ここではその概要のみ示す。

微動研究は、我が国を中心に約半世紀 (50 年) 以上進められており、実務レベルでの活用も多く見られるようになってきている。微動を用いて地盤を評価する方法として、大きく 2 つの考え方がある。一つは、「①微動のスペクトルから地盤種別や卓越周期などを直接求める考え方」(図 1.5 では移動観測、本論では単点微動と表記)、もう一つは、「②微動から地盤構造を反映するデータを抽出し逆解析などから S 波構造を求める考え方」(図 1.5 では微動探査) である。また、近年はこれら 2 つの考え方に加えて、長期間連続記録を用いた「③地震波干渉法」が利用されている<sup>4)</sup>。これらの微動の工学的利用の 3 つの方向性を図 1.5 に示す<sup>4)</sup>。

本論では、前述したように広域での防災・減災のための利活用を目的としている。個別の建物に対する検討を目的とするのであれば、ボーリング調査など詳細な地盤調査が実施可能である。一方で、広域な検討を進めるには、より簡便で安価な手法の確立が必要となる。よって、微動を用いた地盤評価法でもより簡便である「単点微動のスペクトルから地盤種別や卓越周期などを直接求める考え方」として、微動観測を用いた評価方法として、新たな評価手法の確立は重要であると考えられる。



# 微動の工学的活用の3つの方向性



※本論で主に用いているのは「①移動観測」で本論では単点微動として表記

図 1.5 微動の工学的活用の3つの方向性<sup>4)</sup>

## 1.2 微動に関する既往の研究

### (1) 微動に関する既往の研究の概要

微動を用いて地盤を評価する方法として、前述したように大きく 2 つの考え方がある。一つは、「単点微動のスペクトルから地盤種別や卓越周期などを直接求める考え方」、もう一つは「微動から地盤構造を反映するデータを抽出し、逆解析などから S 波構造を求める考え方」である。提案手法は、前述した通り前者の「単点微動のスペクトルから地盤種別や卓越周期などを直接求める考え方」を用いているので、既往研究についてもこの考え方を主にまとめる。

微動を地盤評価に用いるための研究の歴史は古く、1950 年代頃から進められている（例えば Kanai and Tanaka<sup>5)</sup>）。微動の工学的利用については、1989 年の第 17 回地盤震動シンポジウム「微動の工学的利用について-その現状と可能性-」<sup>6)</sup> で、当時の研究成果の現状と問題点が総括的にまとめられている。

近年では、堀家（1993）<sup>7)</sup> や瀬尾（1997）<sup>8)</sup>、地震工学会微動利用技術委員会の報告資料である微動の利用技術（2011）<sup>9)</sup> に詳しいレビューや研究事例などがまとめられている。これらの資料には、本検討で用いている単点微動の H/V スペクトル比についても、数多くの研究成果がまとめられている。詳細は、それぞれの文献に譲るが、「微動の H/V スペクトル比が時間によらず安定的な特性を示すこと」や、「微動の振動特性は観測地点近傍の地下構造を反映していること」は概ね共通した認識として解釈とされている。

### (2) 微動に関する理論的解釈について

微動の理論的解釈については、現時点でも社会的に合意が得られるほどには明確化されていない。ここでは、近年の研究成果などから、微動の H/V スペクトル比の理論的解釈について、代表的な以下の 3 つの考え方の概要をまとめる。

- ①実体波の 1 次元重複反射による解釈
- ②表面波（レイリー波）基本モードによる解釈
- ③拡散波動場理論を用いた解釈

#### ①実体波の 1 次元重複反射による解釈

中村（1988）<sup>10)</sup> は、実体波の 1 次元重複反射理論により、微動 H/V スペクトル比の理論的解釈を試みている。この解釈では、「基盤レベルの地震動は水平動と鉛直動は概ね同等であること」、「表層地盤では水平動の増幅が主体的で鉛直動増幅が小さいこと」と仮定することで、「地表の鉛直動は基盤の水平動と同等である」と言うこととなり、地表の観測のみからその地点の水平動の増幅特性が求められるとの考え方である（図 1.6）。この考え方は、NAKAMURA Method<sup>11)</sup>として海外などでも広く活用されている。

しかし、近年の考え方では、微動源が地表付近に分布することを考えると、微動を実体波とする考え方には矛盾があるとの指摘が多い。

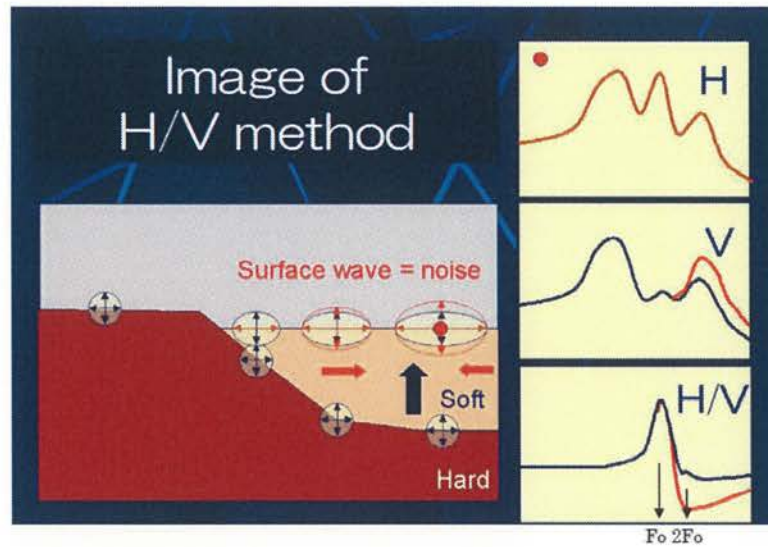


図 1.6 中村による H/V スペクトル比のイメージ<sup>12)</sup>

②表面波（レイリー波）基本モードによる解釈

時松ら<sup>13)</sup>によると、短周期微動から得られる H/V スペクトル比とレイリー波基本モードの理論値を比較し、両者がよく一致することを確認している。レイリー波基本モードとの対応については、塩野ら<sup>14)</sup>はやや長周期微動への対応を、堀家<sup>15)</sup>は短周期微動への対応を検討しており、その後数多くの研究者によって確認事例が報告されている。筆者らも、多くの地点で同様な検討を行っているが、例えば山形県の強震観測地点で両者が概ね一致していることを確認している<sup>16)</sup>。

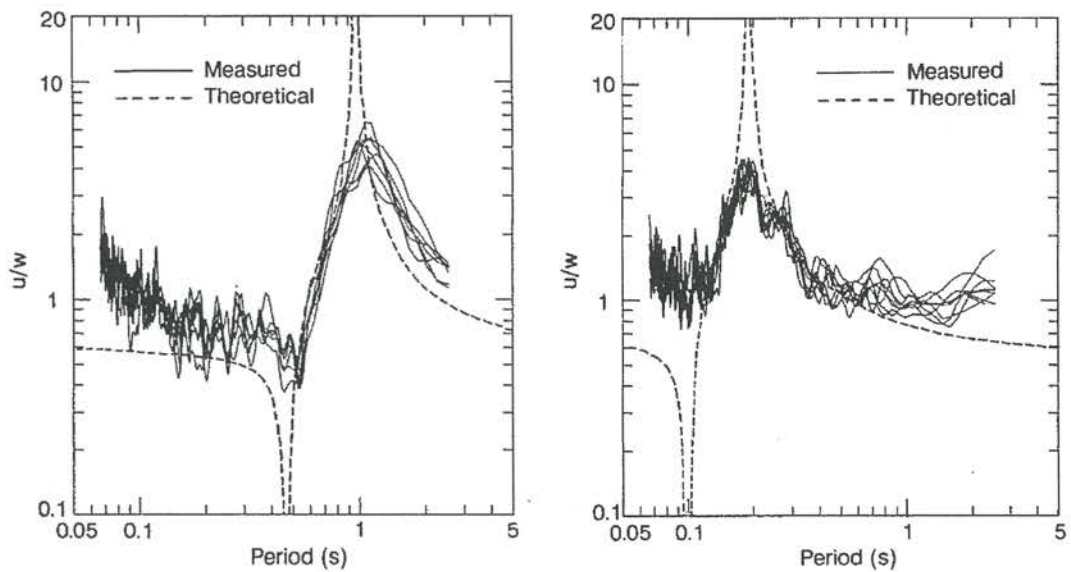


図 1.7 時松らによる H/V スペクトル比とレイリー波基本モードの理論値との比較例<sup>13)</sup>

### ③ 拡散波動場理論を用いた解釈

拡散波動場理論は、比較的近年提案され始めた解釈である。その適用性については、まだ議論されている考え方ではあるが、最新の知見の例として、以下に概要をまとめる。

拡散波動場理論は、グリーン関数の虚部を用いた解釈<sup>17)</sup>で、拡散波動場理論による微動の H/V スペクトル比は、下式より算出される ( $G_{ij}$  は加振点における  $i$  方向の力による  $j$  方向のグリーン関数で  $Im$  はその虚部)。

$$MHVR = \sqrt{\frac{2 \times Im[G_{11}]}{Im[G_{33}]}}$$

この考え方を元に、Kawase らによって地震動と微動の H/V スペクトル比は理論的に異なること<sup>18)</sup>、微動の H/V スペクトル比 (MHVR) から図 1.8、の 2 段階の補正をすることで直接地盤増幅特性を求める方法が提案されている<sup>19)、20)</sup>。

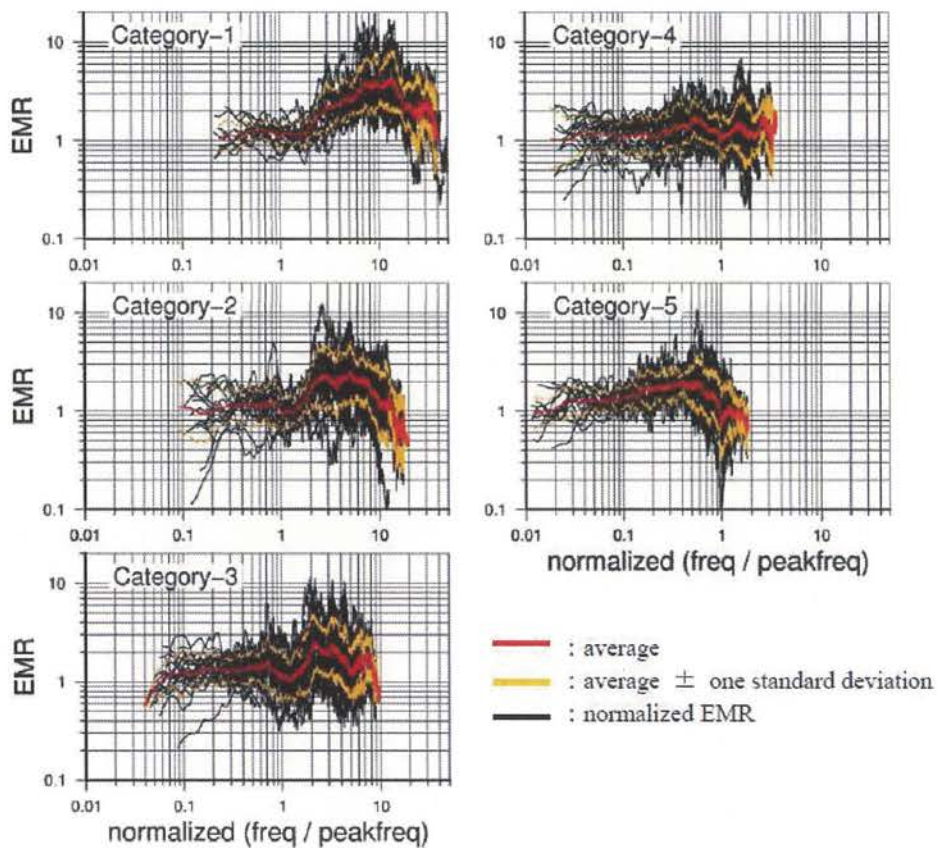


図 1.8 カテゴリー別の EMR (経験的補正係数)<sup>19)</sup>

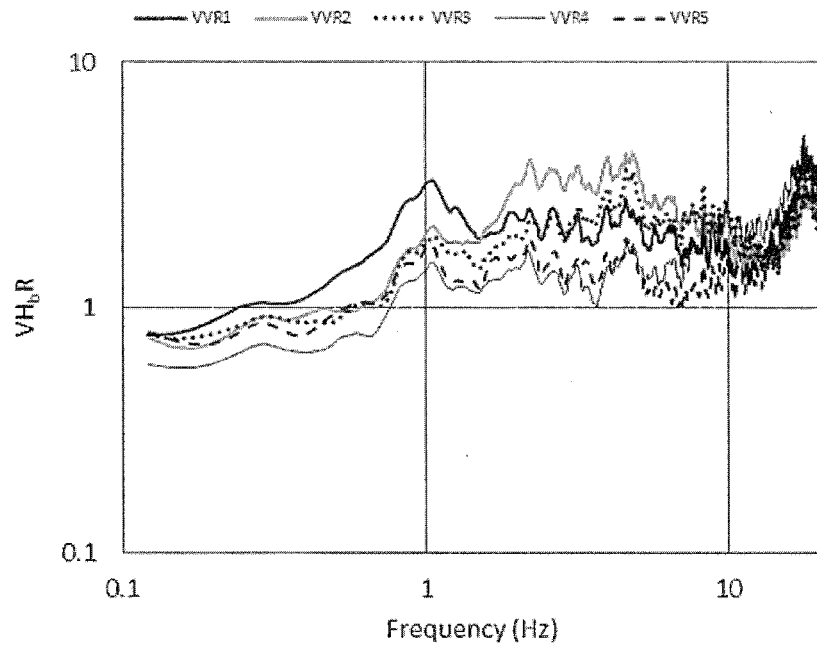


図 1.9 カテゴリー別の  $VH_bR$  (経験的補正係数)<sup>19)</sup>

### (3) 単点微動 H/V スペクトル比を用いた地盤評価の研究

本論文では、単点微動 H/V スペクトル比を用いて、広域な地盤のハザードを簡便に評価する新たな手法を提案している。前記した通り、微動の理論的な解釈については、議論の余地が残されているものの、観測の簡便性や結果の安定性が確認されていることから、微動を工学的に利用する試みは盛んに行われている。よってここでは、単点微動 H/V スペクトル比で比較的広域な領域を検討した事例について、筆者らの既往検討も含めていくつか整理する。

大町・他 (1994)<sup>21)</sup>では、常時微動の主成分はレイリー波であることを前提に、2層地盤の水平上下スペクトル比は、インピーダンス比が 1.0 から減少するにつれて、V字型、W字型、および逆 N字型となり、また、多層地盤の場合の√字型も加えて類型化をした。この類型化を実測の微動にも適用し、東京都の 546 地点の結果を整理している。結果から得られた卓越周期分布は既往の検討結果と整合的であり、その実用性が実証されたとされている。一方で、今後は卓越周期のみでなく増幅倍率についての推定方法を確立する必要があるとも述べられている。

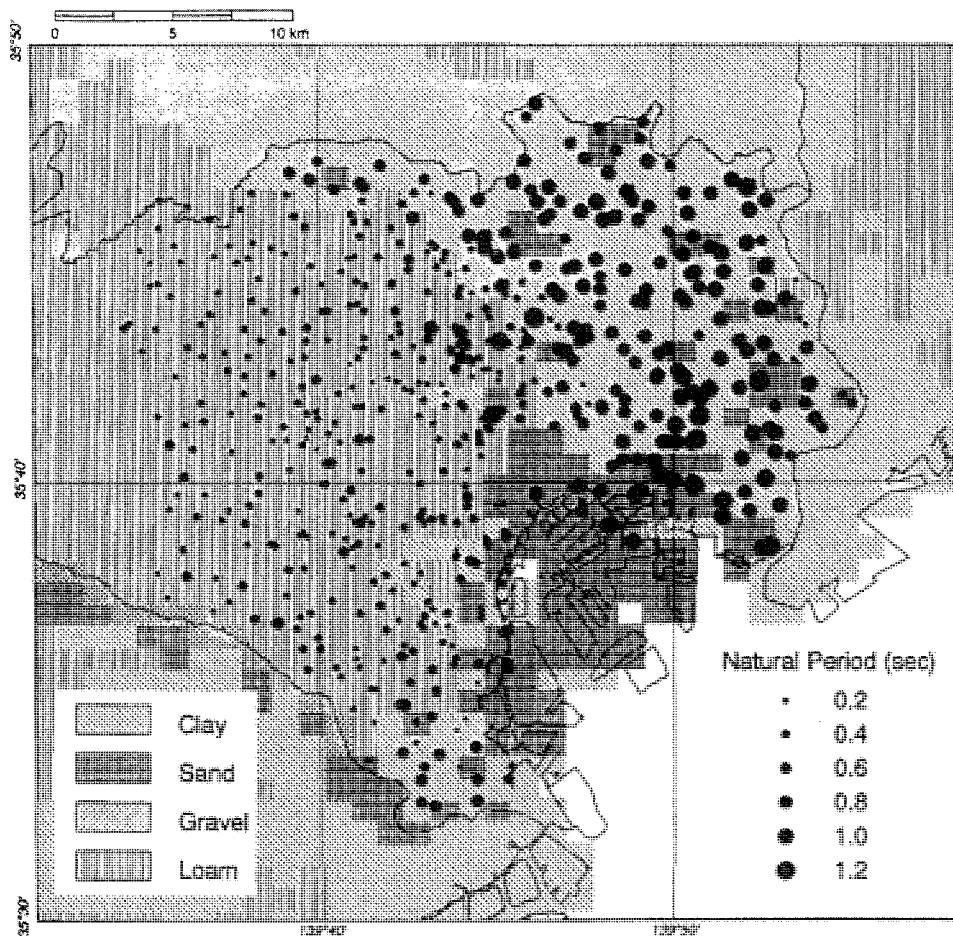


図 1.10 東京都区部の常時微動から推定した地盤の卓越周期の分布と表層地質<sup>21)</sup>

前田、他 (2001) <sup>22)</sup>では、単点微動の H/V スペクトル比から得られる卓越周期と 1948 年福井地震の木造家屋の被害率と整合していることを確認している。近年でも、年縄、他 (2020) <sup>23)</sup>では、横浜市都筑区内の比較的狭いエリアが対象ではあるが、単点微動の H/V スペクトル比のピーク周期から軟弱地盤層厚の推定を行い、ボーリングデータによる地盤構造との整合性や 1923 年関東地震の被害率が説明可能であることを示している。また、元木他 (2016) <sup>24)</sup>では、単点微動の H/V スペクトル比の空間変動について検討が行われている。ピーク周期の変動は、空間的にも時間的にも標準偏差はピーク周期の 5%程度になることが確認されている。

同様な検討は、相模平野を対象に筆者らも行っている。落合 (2001) <sup>25)</sup>や落合、他 (2003) <sup>26)</sup>では、平野内を概ね 500m 間隔と高密度な微動観測を行い、平野の卓越周期分布を整理するとともに、地盤特性も踏まえたマイクロゾーニングを実施している。この結果から、相模平野の地盤増幅特性は、沖積層厚のみでなく堆積層を構成する土質特性の影響も大きいことが確認された。すなわち、地盤構造が卓越周期を規定していることを示す結果となった。

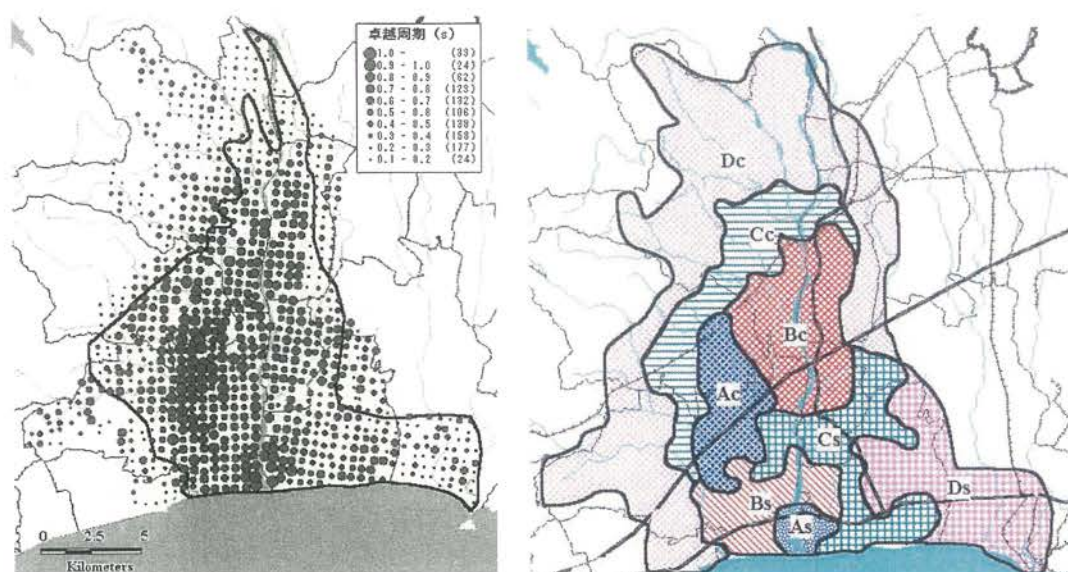


図 1.11 相模平野の卓越周期分布 (左) と微動結果によるマイクロゾーニング (右) <sup>25)</sup>

### 1.3 本論文の位置づけと目的

1.1 節では、本研究の背景として地震防災を考えるうえで、「サイト増幅特性の重要性」、「近年の地震活動の状況」、「微動研究の進展と活用」について整理した。その中で、特に地震防災を考えるうえでは、サイト増幅特性を把握することの重要性が確認できた。また、近年は地震活動が活発化しており、広域を対象として地震ハザードを評価するためには、安価で簡便な手法の開発が必要である。

一方で 1.2 節に記載の通り、微動の H/V スペクトル比は、その理論的解釈についてはまだ検討の余地があるものの、時間に寄らず安定的な特性を示すことや観測地点の地盤特性を反映していることはすでに広く確認されている。また、微動の工学的利用として、H/V スペクトル比の卓越周期を用いたマイクロゾーニングも複数の地域で検討されており、その有用性も広く確認されていると考えられている。よって微動の H/V スペクトル比を広域防災の基礎資料として活用することは、非常に有用であると考えられている。

また、建物被害を考える場合、地盤の卓越周期のみから検討することにやや不十分であると考えている。共振現象などを考えると、地盤の固有周期の重要性はもちろんであるが、地震動の揺れやすさ（主に最大速度値）が重要である。現在の耐震設計法で採用されている、エネルギーの釣り合いなどを考慮した耐震理論では、速度応答スペクトルの積分値（スペクトル強度）に配慮することの重要性を考えると、地盤の増幅特性も加えた評価を行うことも重要である（「2.2 新たな地盤ハザード評価手法の提案」参照）。後述するように、単点微動の H/V スペクトル比は、卓越周期の安定性はもちろんであるが、縦軸の H/V スペクトル比もばらつきはあるもののある程度は安定していて、その地点の地盤特性を含んでいることが確認されている。そこで、本論文では単点微動の H/V スペクトルの卓越周期のみならず、縦軸の値を地盤増幅特性の成分も含むと仮定し、両者を用いた簡便な地盤ハザード評価手法を提案する。



#### 1.4 本論文の構成

本論文は、以下の7章構成となっている。

第1章「序論」では、防災・減災のための地盤ハザード等評価手法の現状や課題、常時微動を用いた地盤評価手法における既往の研究を整理し本研究の位置づけを明確とする。

第2章「地盤ハザード評価手法の提案」では、具体的な地盤ハザード評価手法の提案を行う。現在の耐震理論では、エネルギーの釣り合いを考慮した地震動評価が採用されている。このことに配慮しつつ、広域な地盤評価が可能な簡便な手法として、単点微動H/Vスペクトル比の卓越周期とピーク値を乗じたものを地盤ハザード値と定義し、算定式などを整理した。

第3章「微動による地盤の卓越周期評価と課題」では、具体的な3つの地域を対象に検討事例を整理した。検討地域は「神奈川県中央部」、「横浜市」、「神奈川県東部」とし、微動の定点連続観測による安定性の確認や、地形発達史を考慮した地形区分により特性が異なることなどを確認した。

第4章「数値解析を用いた検討」では、提案している地盤ハザード値について、仮想の地盤モデルや実地盤モデルを用いた数値解析によって、理論的な妥当性についての検討を行った。検討は、数値解析から求めるSH波伝達関数とスペクトル強度(SI値)の比較や、微動による地盤ハザード値を比較することで、その妥当性を確認した。

第5章「強震記録との比較と横浜全域の地盤ハザード評価」では、常時微動観測と強震記録の比較から、実際の地震時の特性を微動観測でとらえられているかの検討を行った。また、横浜全域の約5700地点を対象に、具体的に地盤ハザード値を算出し、既往の検討資料との比較を行った。

第6章「過去の地震被害による適用性の検討」では、過去の被害地震と比較的近年に発生した被害地震に分けて、今回の手法の適用性について確認を行った。過去の被害としては1923年関東地震や1974年伊豆半島地震などを対象に、近年の地震としては2016年熊本地震を対象とした。検討方法は、まず地震による建物被害の情報を収集した。一方で、建物被害の分布を包含するような範囲で常時微動を観測し、地盤ハザード値を算出する。その両者を比較すると、いずれの地震に対しても正の相関(建物被害が大きい地域は地盤ハザード値も大きい)が確認でき、提案する地盤ハザード評価手法を用いることの有効性が確認できた。2016年熊本地震に関しては、地震動強さや建物年代を考慮した検討を行い、本手法の適用性について整理した。また最後に、現在広域な地盤ハザード評価手法として一般的に使われている、J-SHISの地盤増幅率と本手法の比較を行った。両者と建物被害との相関を比較すると、本手法の相関係数の方が高く、手法の有効性が確認できた。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果を総括する。

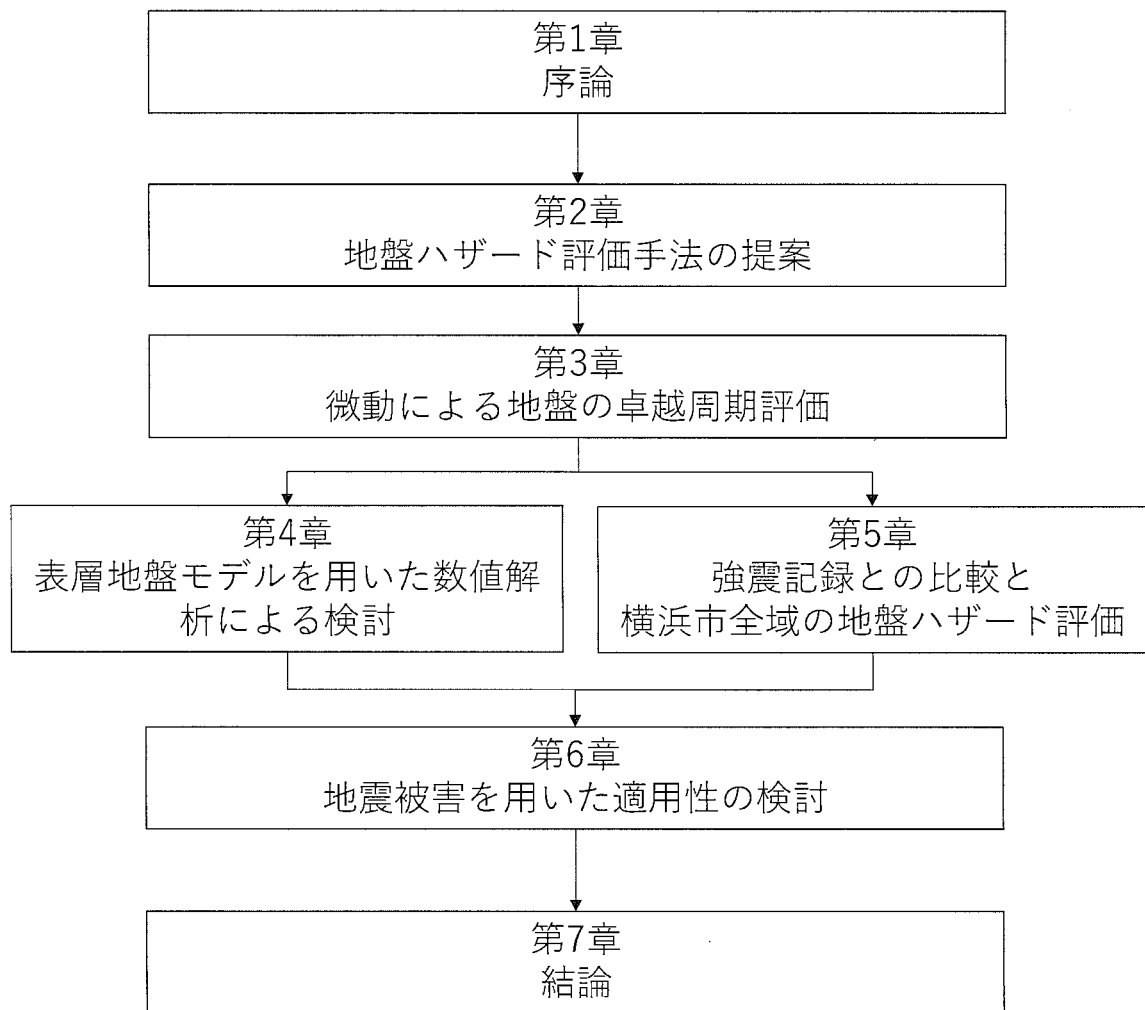


図 1.12 本論文の構成

# 第 2 章

## 第2章 地盤ハザード評価手法の提案

### 2.1 はじめに

2.2 節では、単点微動 H/V スペクトル比を用いた新たな評価手法として、地盤ハザード値の提案を行っている。地盤ハザード値は、エネルギーの釣り合いを考慮した地震動評価手法である SI 値を参考に、H/V スペクトル比の卓越周期とピーク値を乗じた値として定義している。

2.3 節では、常時微動結果との比較で用いる基礎資料として、本検討で主な対象地域である神奈川県に対し、詳細な地盤区分図の作成を行った。地盤区分図は、50m メッシュのデジタル地盤区分図（微地形区分）を作成した<sup>27)、28)</sup>。神奈川県は、国土交通省によって 7 区域に区分され、地形図や地質図が整備されている。これらの図は、各区域では整備時期や地域性の違いにより、必ずしも区域の境界部は整合していない。よって、凡例の統合化などを行うことで、神奈川県全域の統一した地形分類と表層地質を作成した。

2.4 節では、本章のまとめを述べる。

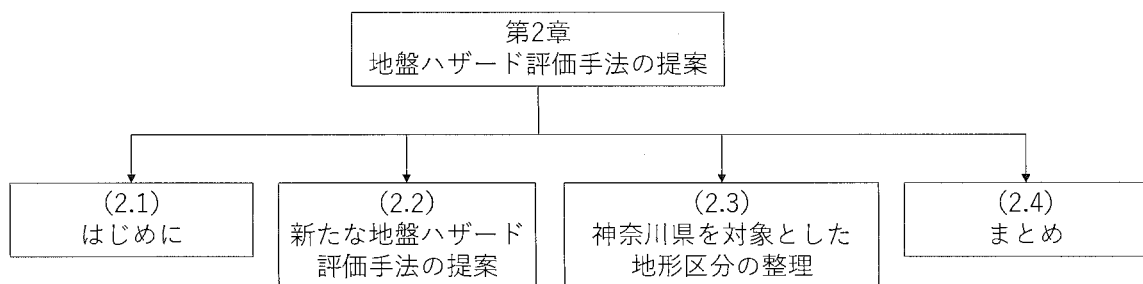


図 2.1 第2章の構成

## 2.2 新たな地盤ハザード評価手法の提案

### (1) エネルギーの釣り合いを考慮した地震動評価手法

地震時の建物の応答あるいは被害に寄与する地震動の強さの評価については、耐震設計における地震動の設定に関連して歴史的変遷があり、例えば地盤震動と地震動特性の関連性から長橋（1994）<sup>29)</sup>により詳しくまとめられている。それによれば、建築物の耐震設計において、「地域別」や「地盤特性」、あるいは設計が対象とする地震自体の震源断層の特性をも考慮した設計用入力地震動の設定についての考え方と、それに基づく設計用入力地震動の強さのレベルについて紹介されている。

地震動の強さの評価では、最大加速度、最大速度や震度など目的に応じさまざまな指標が用いられる。この地震動強さの評価については、秋山らによって、完全弾塑性型に近い荷重-変形関係を持つ系の累積塑性変形を評価する有力な手法であることが検証され、エネルギーの釣り合いに基づく耐震設計法が提案されている<sup>30)、31)</sup>。

エネルギー量で地震動強さを評価する方法の一つとして、Housner による SI 値（スペクトル強度）が提案されている<sup>32)</sup>。SI 値( $SI_h$ )は速度応答スペクトル ( $S_v$ ) の一定の周期範囲 ( $T_1$  から  $T_2$ ) の積分値として下式で定義されている。本論での周期範囲は、一般的な建物被害を対象としているため、周期は 0.1s から 2.5s と設定した。

$$SI_h = \int_{T_1}^{T_2} S_v(h, T) dT \quad (2-1)$$

### (2) 単点微動 H/V スペクトル比を用いた地盤ハザード評価の提案

「1.2 微動に関する既往の研究」に記載した通り、単点の常時微動 H/V スペクトル比には、理論的な解釈については議論の余地が残されているものの、観測地点近傍の地下構造の影響を受けているとの考え方は広く認められている。

以下より、提案する地盤ハザード値の算出手順をまとめる<sup>33)</sup>。

#### ①常時微動の観測

常時微動は、対象地域を等間隔のメッシュ（250m や 500m）に区切って、その中心付近を観測点としている。観測は、水平方向 2 成分（EW、NS 成分）、鉛直方向 1 成分（UD 成分）の計 3 成分の波形データを記録する。記録はサンプリング周波数 100Hz か 200Hz、観測時間 180~600s と設定している。また、観測時には地図上および GPS により位置情報（緯度・経度）や観測条件も記録している。本研究では、1990 年代から長期間観測にわたってさまざまな地域で観測を実施しているため、観測時期によっていくつかの観測機器使い分けしているが、これらの観測機器間では随時ハドルテストを行い、本研究で対象とする周期帯（0.1~2.0s）の範囲では機器による差はほとんど見られないことを確認している。使用した観測機器の一覧を（横浜市の観測では C, D, E を使用）に示す。

表 2.1 本研究で使用した観測機器の一覧

観測機器	A	B	C	D	E
レコーダー	DR-F2a TEAC	UPS-T3 振動技研	SPC-35 東京測振	SPC-51 東京測振	JU410 白山工業 (レコーダー、アンプ、 センサー一体)  加速度計 周波数特性：0.2~10.0Hz
アンプ	AL-120-F 東京測振				
センサー	GST_111 GST_112 東京測振 速度計 固有振動数：1Hz	UP-225S 振動技研  速度計 周波数特性：0.3~10.0Hz	VSE-15D 東京測振  速度計 周波数特性：0.2~10Hz		

②単点微動 H/V スペクトル比の計算

観測された NS・EW・UD の 3 成分の波形データから、比較的ノイズの少ない安定した 20.48s を成分毎に数区間抽出してフーリエスペクトルを算定する。算定したフーリエスペクトルは、バンド幅 0.3Hz の ParzenWindow により平滑化し、各区間で水平 2 成分のスペクトルを相乗平均した 2 次元水平成分を上下成分で除して H/V スペクトル比を算出する（下式）。最後に、抽出した全区間の H/V スペクトル比の平均を求める。観測記録の時刻歴波形、スペクトルの例を図 2.2 に示す。

$$H/V \text{ スペクトル比} = \frac{\sqrt{NS \times EW}}{UD} \quad (2-2)$$

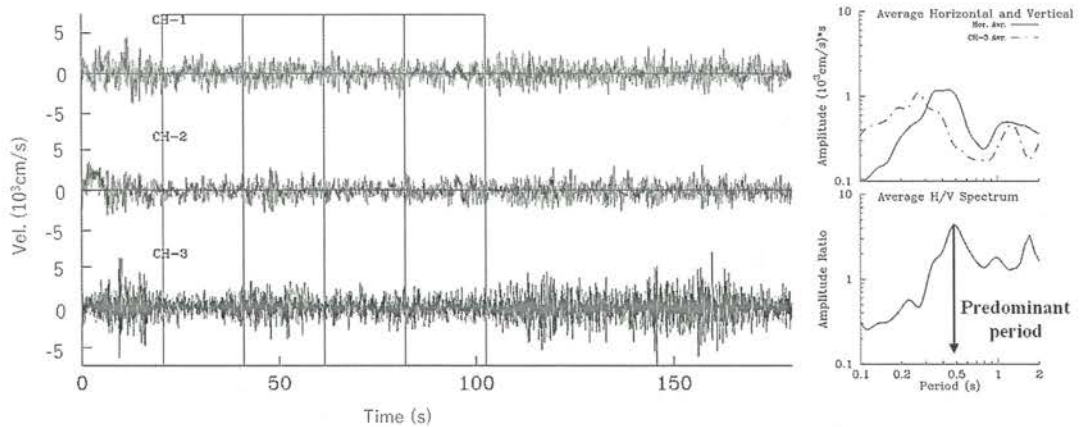


図 2.2 微動観測結果と H/V スペクトル比の算出例

### ③地盤ハザード値の算出

一般に地震動の周期が長く振幅が大きいほど、構造物に与える影響の度合は大きくなると評価される。これは、すなわち地震動のエネルギーが大きくなるためである。既往の研究から、地震動のエネルギーを示す物理量の大きさは、建物の被害とよく整合することが報告されている。本節(1)での記載のとおり、エネルギーの釣り合いを考慮した設計法による地震動の指標は、速度応答スペクトルの積分値である SI 値に良く対応する。SI 値については、地震動評価指標の一つとしてインフラ施設の被害予測など実務で広く活用され、星他(2009)<sup>34)</sup>では、一般的な木造建物被害と高い相関が確認されている。

そこで、地震による構造物への影響の大きさを評価する指標を、簡易的な方法で評価することを考えて地盤ハザード値  $P_E$  と定義し、下式に示す H/V スペクトル比の卓越周期 ( $T_m$ ) とピーク値 ( $R_m$ ) を乗じた値とした。地盤ハザード値  $P_E$  のイメージを図 2.3 に示す。

$$P_E = T_m \times R_m \quad (2-3)$$

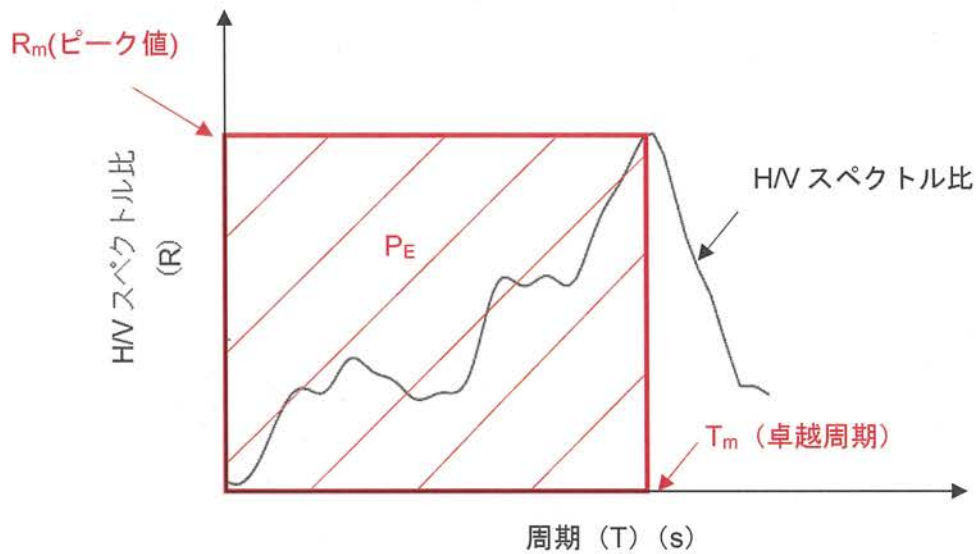


図 2.3 H/V スペクトル比による地盤ハザード値の算出イメージ

## 2.3 神奈川県を対象とした地形区分の整理

### (1) 地形区分図の作成

前述のように地盤の震動特性を示す卓越周期とその振幅は、地盤構造に依存している。本研究では、微動観測結果の利活用により地盤震動特性を抽出することを考えている。抽出した地盤震動特性を理解するために、研究対象とした地域の地形区分図情報を用いることとした。本節では、コンピュータを用いたデジタル地形区分図を整理した。以下に概要を示す。

地形区分図の作成に当たっては、国総研（元国土地理院）発行の地質・地形図等を基本とした。国総研では、都道府県単位の地盤図が作成されている。図 2.4 は、神奈川県を対象とした地質図<sup>35)</sup>である。県の全体的な地質構成は理解できるが、市町村における詳細な地盤特性の把握は難しい。現在、防災科学技術研究所によって公開されている表層地盤区分（微地形区分）は、250m メッシュで整理、公開されている<sup>36)</sup>。図 2.5 は神奈川県西部を対象とした 250m メッシュと 50m メッシュで表示した地盤区分図の例である。前者では、広域的な地盤区分図としての有用性は認められるが、市町村レベルでの詳細な地盤区分図としては不十分で、50m メッシュ程度を用いた地盤図作成が必要となることがわかる。

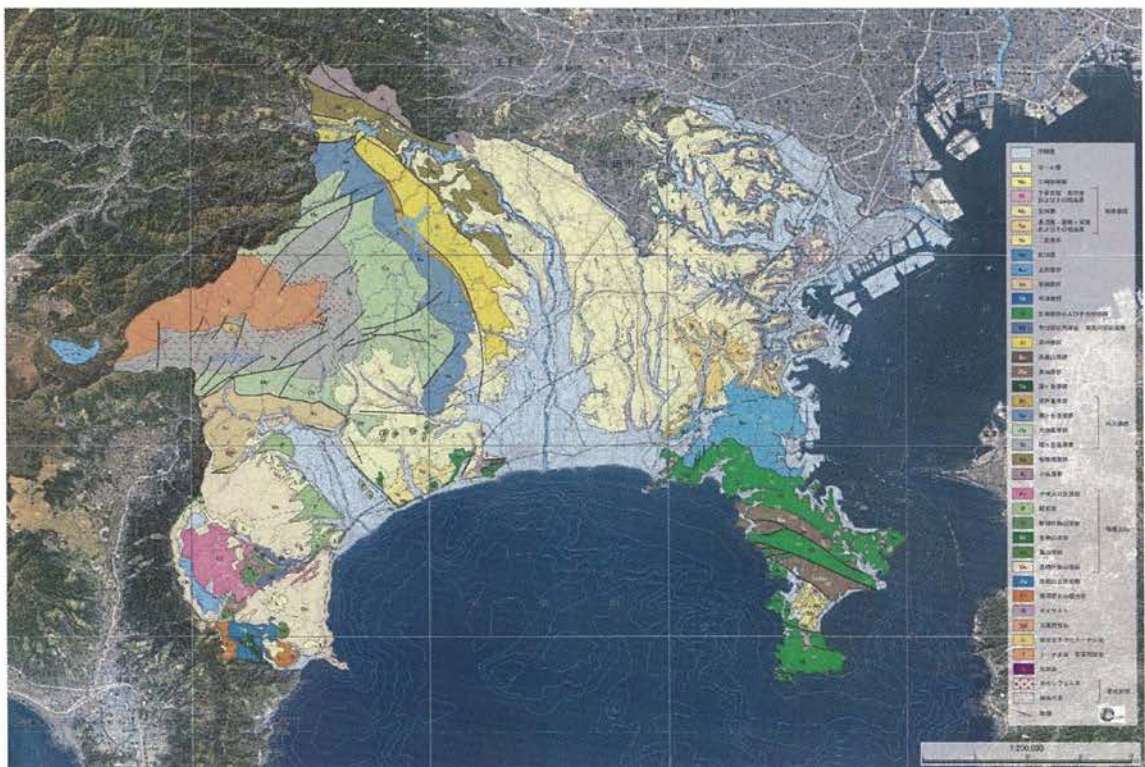


図 2.4 神奈川県の地質図<sup>35)</sup>



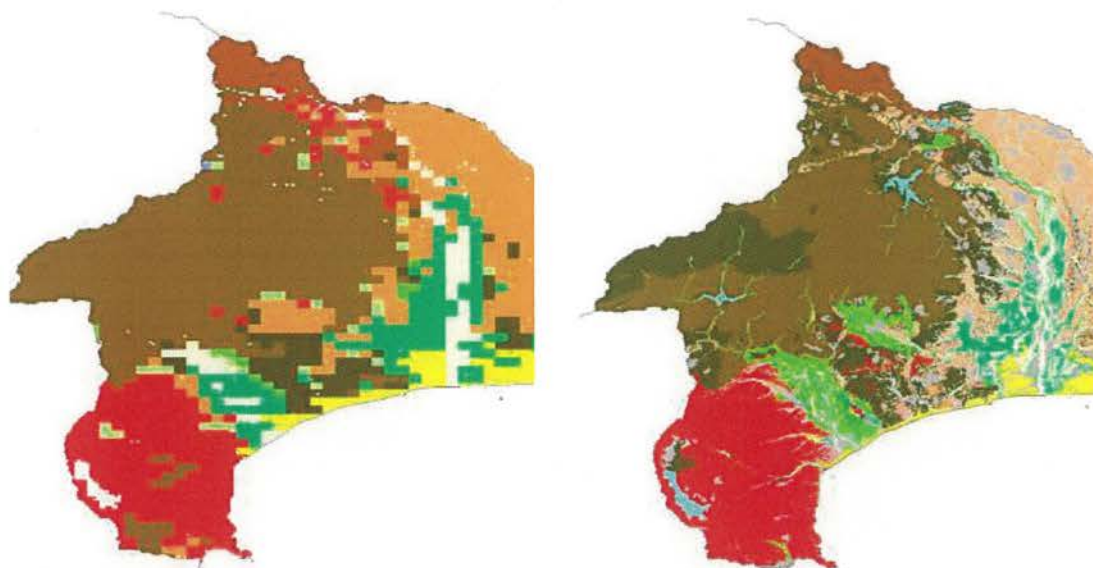


図 2.5 250m メッシュ (左) と 50m メッシュ (右) の違い (神奈川県西部) <sup>27)</sup>

(2) デジタル化作業に伴う必要事項

今回作成した地図は、神奈川県全域の地形分類図と表層地質図の 2 種類である。両地図とも、建設省（現国土交通省）国土地理院から発行されたもので、縮尺は 1/50000 である。地図は紙地図を電子データ化した TIFF データを使用した。

神奈川県全域の地形図及び地質図は、全部で 7 枚に分けられており、それぞれ「横須賀・三崎」、「八王子」、「横浜・東京西南部・東京東南部・木更津」、「上野原・五日市」、「小田原・熱海・御殿場」、「秦野・山中湖」、「藤沢・平塚」に区分される。地図のデジタル化に伴う各作業は以上の 7 枚の地図別に行い、最後に 1 枚の地図（1つのデータ）としてまとめた。図 2.6 に統合化のイメージ図を示す。



図 2.6 7 枚の地質図と統合化のイメージ <sup>27)</sup>

本作業実施時期は、測地基準の移行期間でありデータによって測地系が混在していることがあった。測地基準系は地球上の位置を表すための基準であり、世界測地系、日本測地系、WGS84、測地成果 2000 などが存在する。異なる測地系で作成されたデータを重ねて表示すると、最大で約 500m 程度の誤差が生じることもある。したがって、基準となる測地系を設定することが重要である。図 2.7 は、世界測地系と日本測地系のずれの例である。

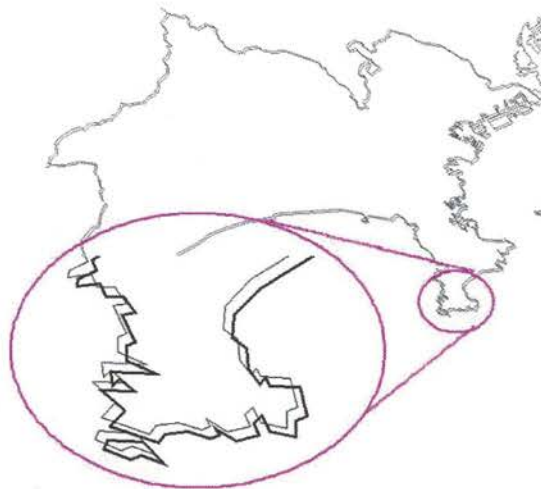


図 2.7 世界測地系と日本測地系のずれの例（横須賀周辺）<sup>27)</sup>

### (3) 地図のデジタル化

電子データ化した TIFF 画像を GIS データとして緯度経度情報を付与したデータとする必要がある。紙地図上の座標が明記されている点を探す。次にその座標を持つポイントデータを基準座標点として、GIS 上にプロットすることで画像データ等に位置情報を反映させる。

紙地図上のすべての地形・地質のポリゴンを作成する場合は、GIS の作業効率から、最初に各地形・地質ポリゴンの境界線をすべてラインデータで作成し、そのラインで閉塞された空間をポリゴン化する手順で地形・地質ポリゴンを作成した。作成するラインが必ず閉塞している必要があるため、線の端点については、必ず一致か交差をさせた。また、複数の線が交差し合う場所では、微小な閉塞空間が生じて、微小なポリゴンができないように、交差の方法にも十分に留意した。図 2.8 を例に 4 つのポリゴンを作成する際のラインの引き方の良い例と悪い例を示す<sup>37)</sup>。

作成されたポリゴンデータの属性データには、各ポリゴンに対応する地形・地質の物性データを入力した。また、物性の入力方法については、まず GIS 上で TIFF データを下に、ポリゴンデータを上に重ねて表示して、TIFF データ上の各地形・地質の色や名称か

ら各地図の凡例より物性を判別して入力した。なお、7枚の地形分類図の物性はすべて統一したコードを使用した（詳細は後述の凡例の統合を参照）。

地形・地質ポリゴンの物性データは、50mメッシュの中心点のポイントデータに反映させた。また、地図と地図の境界部分など、ポリゴンがわずかに離れているところでは中心点のポイントデータをポリゴン上に重ねた際に、物性が反映されないポイントが生じることもある。その場合は、ポイントに最も近いポリゴンの境界をずらして、ポイントがポリゴンに重なるようにして再度物性を反映させた。図2.9にポリゴン境界をずらす図例を示す。

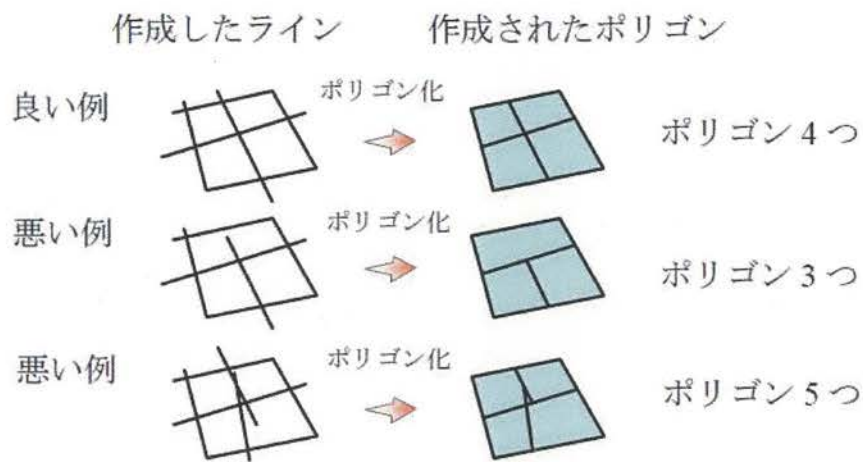


図2.8 ラインデータ作成時の注意点<sup>37)</sup>

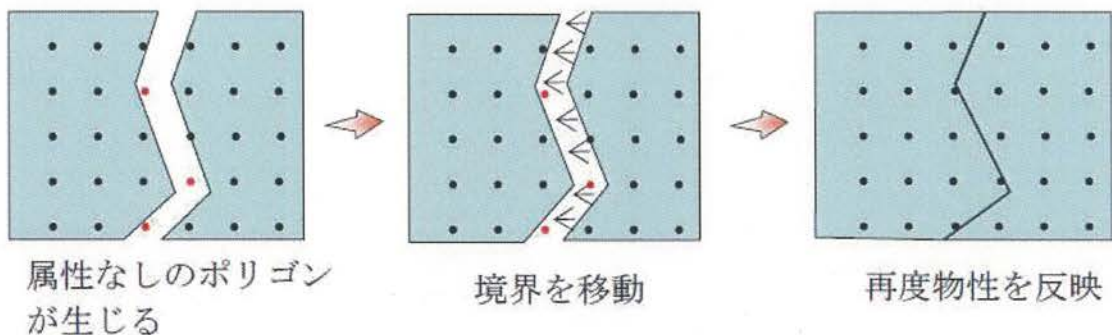


図2.9 属性なしポイントの対処例<sup>37)</sup>

#### (4) 凡例の統合

神奈川県全域の表層地質図のGISデータ化にあたっては、まず各図版のもっとも細かい層序をGISデータとしての最小単位とする。次に、各表層地質図の層序を対比し、凡例を統一表記しGISマップの簡易化を行い、GIS上での地質図データの適正化を進めていく必要がある。

地質図の凡例には、「泥」、「砂」などの物質による分類のほか、地層が形成された堆積環境（扇状地、後背湿地、湖沼、および前弧海盆など）を反映しており、さらに変成・変形作用など堆積後の地質造構作用による変化も含まれている。これまでの GIS における地質情報は、これらの詳細情報をほとんど考慮せずに地盤情報を主体として使用させてきている。本論でも、年代による対比に加えて、より正確に地質分類による対比が行えるように詳細項目（表 2.2 参照）も設定した。なお、表層地質図上で凡例の記載のない部分については、他文献のコンパイルと現地調査による判別を行っている。表 2.3 に示すように年代区分については、通常的地質図と同じように幅を持たせることにしている。すなわち、時代 1 から時代 2 までの年代が地層の年代の凡例となる。ただし、ここでは地質年代の名称について、これまで工学となじみの深い呼び方を用いている。表 2.4 に実際に 7 枚の地質図の凡例を対比させた状態の一部を示す。表 2.2 より、関東ローム層など、広域火山灰層などは、これまで通りに時間軸を合わせるのに役に立っていることがわかる

表 2.2 凡例の詳細項目

層群	層序	層相	固結	記号
	人工物	埋め土	未	Fs
	人工物	陸上の盛土	未	F
	礫堆積物	礫、砂、泥	未	D
	現河床堆積物	礫、砂、泥	未	空白
	旧河道堆積物	泥を主とする	未	Aa
	海成・河成堆積物	泥がち堆積物	未	Am
	砂丘砂	砂丘砂	未	Asd
	海成・河成堆積物	砂がち堆積物	未	As
	海成・河成堆積物	礫がち堆積物	未	Aq
	礫堆・湖成堆積物	礫がち・泥がち堆積物	未	Atl
	湖成堆積物	泥がち堆積物	半	LAK
	御殿場泥流堆積物	火山礫・火山砂	未	Cm
	神山山崩れ堆積物	火山砕屑物	未	Kd
新期ローム	立川ローム層	ローム層、礫、砂	未	TcL
新期ローム	武蔵野ローム層	軽石流	未	P
新期ローム	武蔵野ローム層	ローム層、礫、砂、( )	未	ML

表 2.3 凡例の年代区分

		時代1	時代2	凡例
現世	現世	00	00	0000
第四紀	完新世	01	01	0101
第四紀		01	02	0102
第四紀	更新世	02	02	0202
		02	03	0203
新第三紀	鮮新世	03	03	0303
新第三紀		03	04	0304
新第三紀	中新世	04	04	0404
		04	05	0405
古第三紀	漸新世	05	05	0505
古第三紀		05	06	0506
古第三紀	始新世	06	06	0606
古第三紀		06	07	0607
古第三紀	暁新世	07	07	0707
		07	08	0708
白亜紀	マストリヒティアン	08	08	0808
		08	09	0809

表 2.4 神奈川県内の地質図の凡例対比例

全体	時代1	時代2	時代記号	小田原	秦野	上野原	八王子	平塚	横浜	横須賀
1	新生代	現世	Q000	1	1	1	1	1	1	1
2	新生代	現世	Q000							2
3	新生代	完新世	O100					2		3
4	新生代	完新世	O100		2	2	3	2		
5	新生代	完新世	O100						2	
6	新生代	完新世	O100	2	3			4	3	4
7	新生代	完新世	O100					4		

本検討によって作成した神奈川県全域の 50m メッシュの地形区分図を図 2.10 に示す<sup>27)</sup>。図 2.5 での比較でも示したが、台地が樹枝状に削られている谷底低地部分など 50m メッシュの方がより詳細に自然に近い形で微地形区分が表現されている。

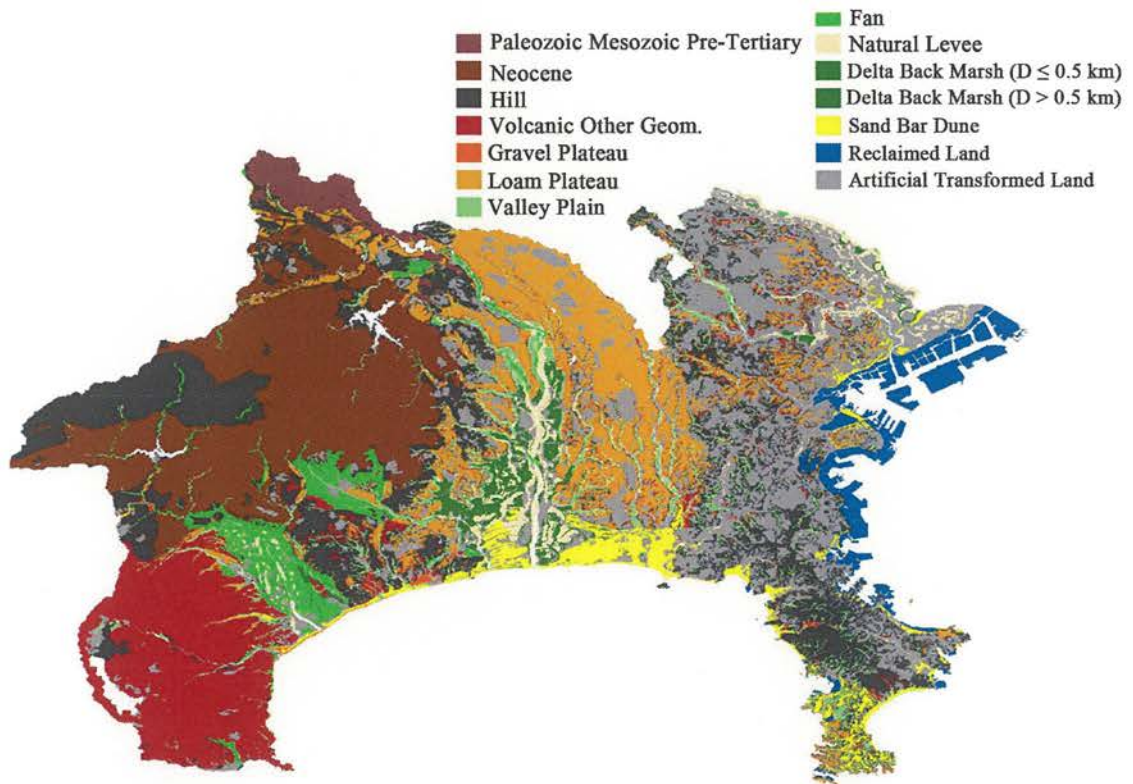


図 2.10 神奈川県内の 50m メッシュ地形区分<sup>27)</sup>

## 2.4 まとめ

本章では、新たな地盤ハザード評価手法の提案を行うとともに、主な検討対象である神奈川県を対象に、詳細な地形区分の整理を行った結果をまとめた。

新たな地盤ハザード評価手法の提案では、まず本手法で用いた、常時微動の観測や解析手順について説明している。その後、本論で提案している地盤評価手法の説明を行った。

神奈川県を対象とした地形区分の整理では、常時微動結果との比較で用いるために、既存の紙データである地形・地質情報を電子化し、GIS データとして整理した。また、今後の検討で取り扱いしやすいように、地形や地質区分のポリゴンデータをメッシュ化した。

# 第 3 章

## 第3章 微動による地盤の卓越周期評価

### 3.1 はじめに

本章では、単点微動観測結果による H/V スペクトル比の卓越周期による地盤評価結果についてまとめる。

3.2 節では、神奈川県内を対象に実施した微動観測結果についてまとめる。相模平野と横浜市等を対象として、単点の常時微動結果による H/V スペクトル比を用いた地盤評価について整理した。

3.3 節では、本章のまとめと課題を述べる。

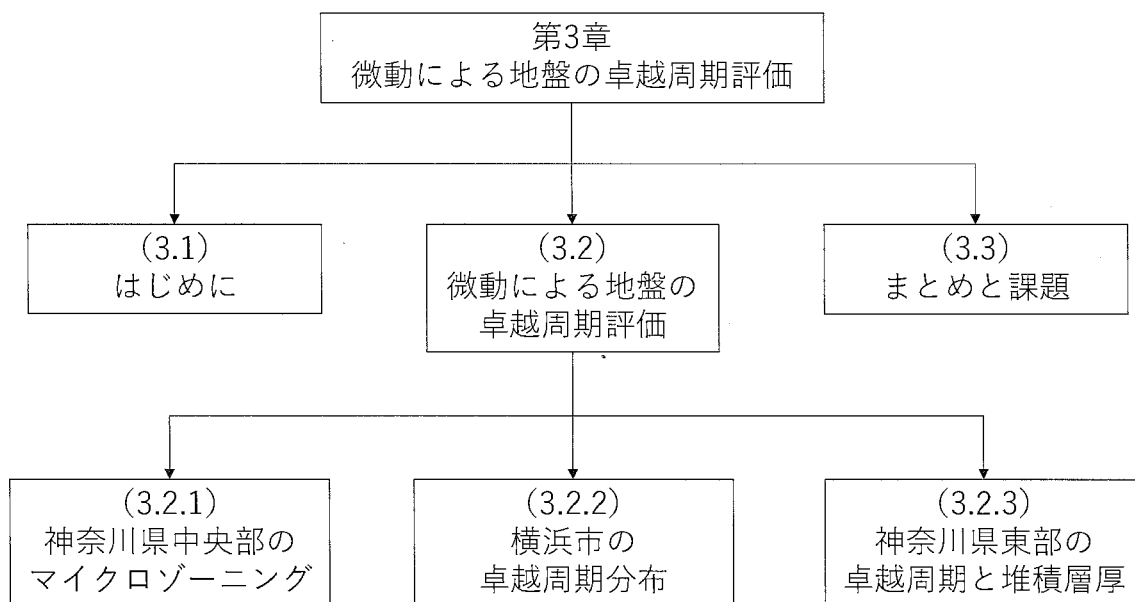


図 3.1 第3章の構成



## 3.2 微動による地盤の卓越周期評価

### 3.2.1 神奈川県中央部のマイクロゾーニング

#### (1) 検討結果の概要

相模平野を対象に、5 地点の定点連続観測と 977 地点 (500m メッシュ) の高密度移動観測を実施した<sup>25), 26), 38)</sup>。

定点連続観測結果から、単点微動観測結果から得られる H/V スペクトル比の卓越周期は、安定して同程度の値を示すことが確認できた。縦軸である H/V スペクトル比についても、卓越周期に比べるとばらつきが多いものの、地盤条件によってはある程度の安定性は確認できた。

高密度な微動観測から得られた卓越周期分布は、地形状況を反映した特性が得られ、地表面での微動観測結果から地盤特性を推定できる可能性が示唆された。

#### (2) 定点連続観測

単点微動観測結果による H/V スペクトル比の安定性については、過去にも複数の研究者によって確認されている<sup>39), 40)</sup>。筆者らも、相模平野を対象に 5 地点での定点連続観測を実施した。観測場所は、地震計が設置してある場所 (S1、S2、S3)、比較的閑静な場所 (S1、S4、S5) のほか、地盤の状態、電源の確保などの条件から選定している。

定点連続観測の観測位置を図 3.2 に、定点観測から得られた H/V スペクトル比の重ね描きを図 3.3～図 3.7 に示す。また、それぞれの地点の重ね合わせ図から、卓越周期 (横軸) と H/V スペクトル比 (縦軸) のばらつきについて、標準偏差を図 3.8 に示す。いずれのケースも、横軸である卓越周期は標準偏差が 0.1 程度以下と安定している。一方で、縦軸である H/V スペクトル比はややばらつきが多い。しかし、S4 地点や S5 地点では、標準偏差が 1.0 以上とやや大きいが、地点 S1 地点や S3 地点は標準偏差 0.8 以下と縦軸の H/V スペクトル比も相対的には安定している。

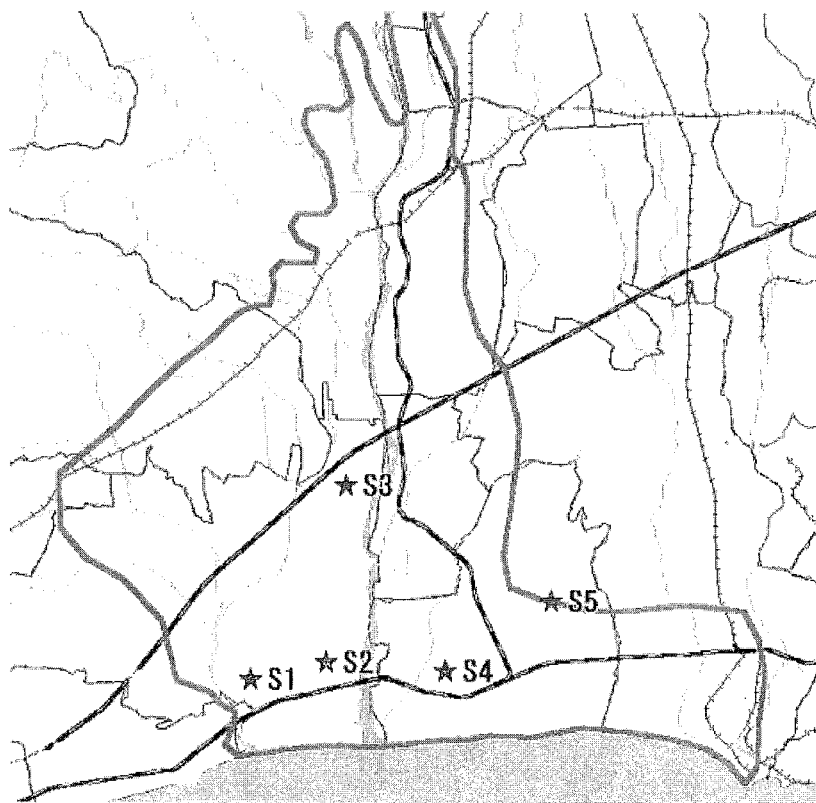


図 3.2 相模平野を対象とした定点観測地点<sup>25)</sup>

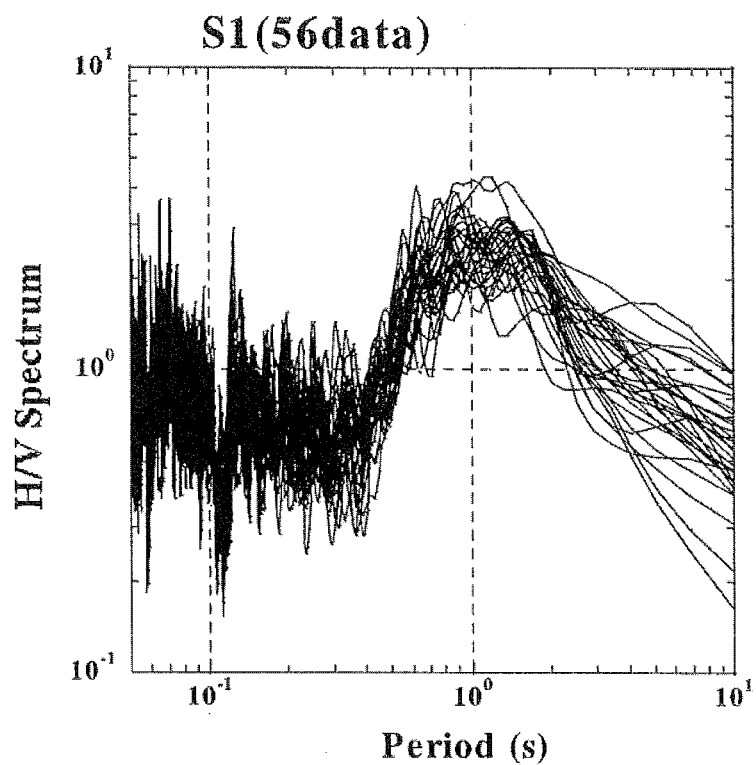


図 3.3 相模平野を対象とした定点観測結果 (S1 地点)<sup>25)</sup>

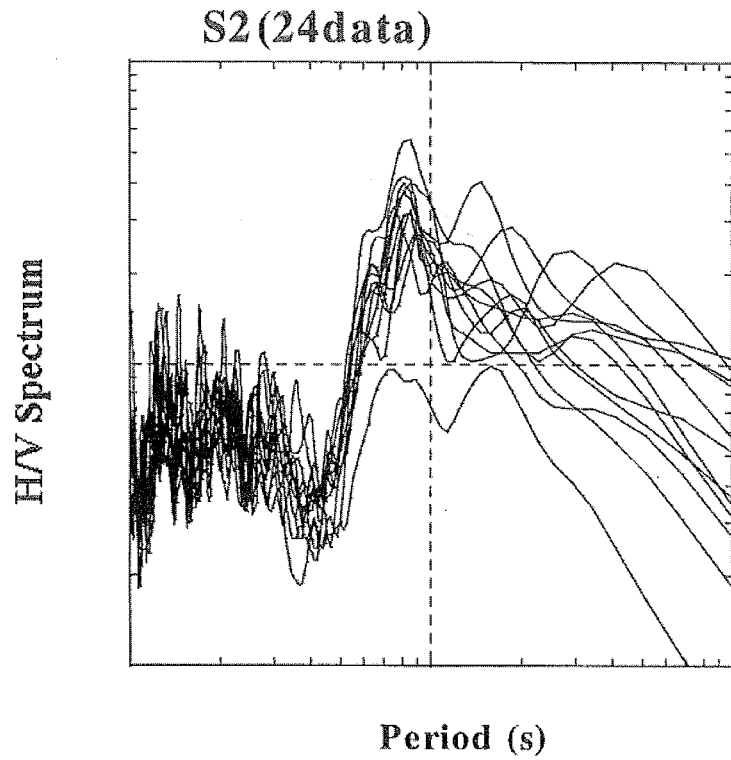


図 3.4 相模平野を対象とした定点観測結果 (S2 地点) <sup>25)</sup>

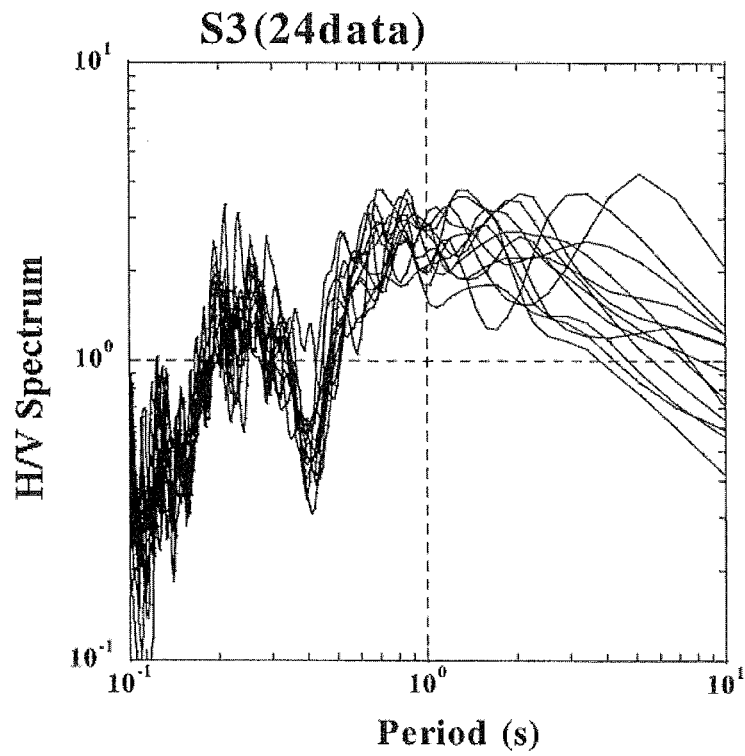


図 3.5 相模平野を対象とした定点観測結果 (S3 地点) <sup>25)</sup>

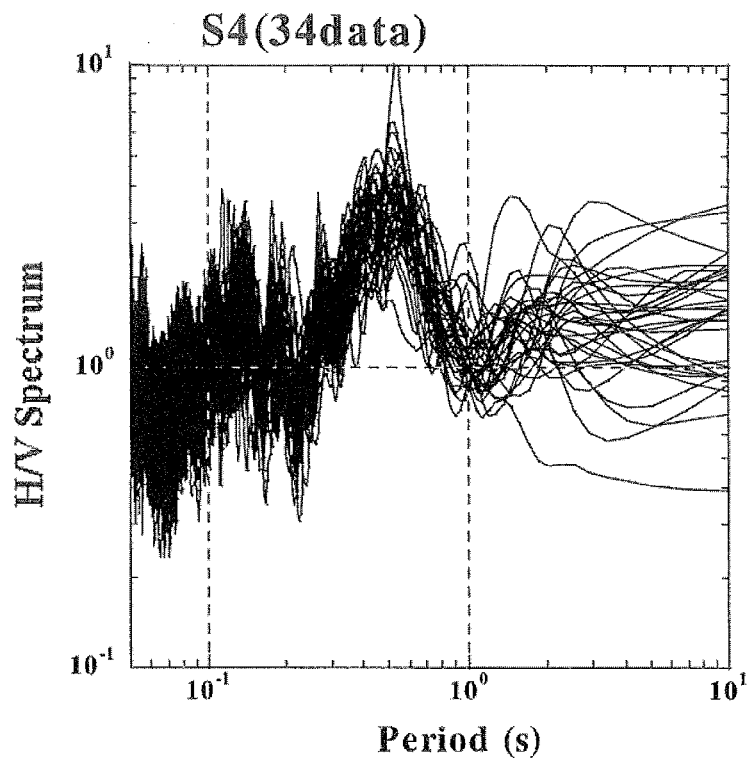


図 3.6 相模平野を対象とした定点観測結果 (S4 地点)<sup>25)</sup>

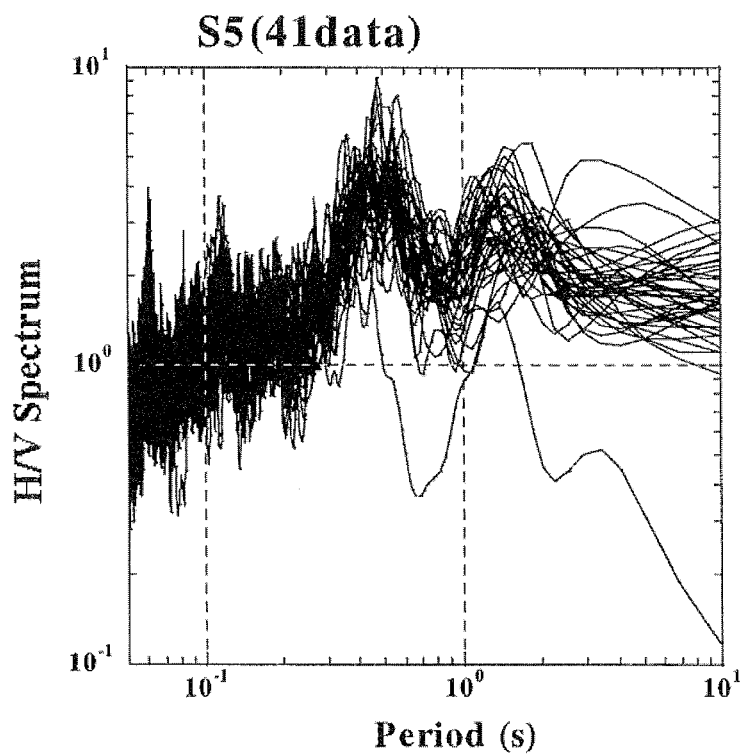


図 3.7 相模平野を対象とした定点観測結果 (S5 地点)<sup>25)</sup>

表 3.1 定点連続観測結果の卓越周期と H/V スペクトル比の標準偏差

	S1	S2	S3	S4	S5
横軸 卓越周期	0.131	0.074	0.116	0.066	0.064
縦軸 H/V スペクトル比	0.747	0.998	0.0591	1.164	1.165

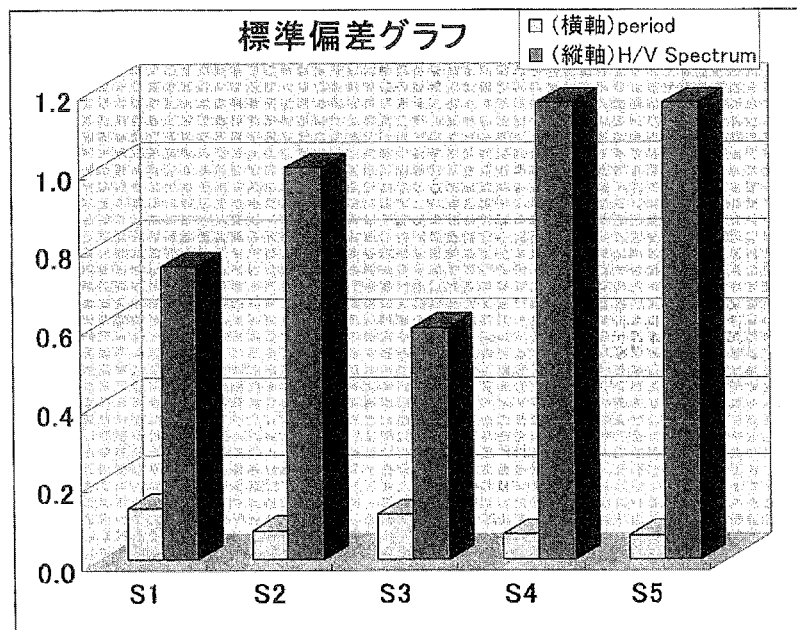


図 3.8 定点観測結果の卓越周期と H/V スペクトル比の標準偏差 <sup>25)</sup>

### (3) 単点微動観測

相模平野とその周辺の台地の一部分を 500m グリッドに分割し、977 地点で微動観測を行った。観測機器は主に、表 2.1 の A、B、C を用いている。観測地点と H/V スペクトル比の例を図 3.9 に示す。図の背景は標高を示し、色が濃いと標高が高い、すなわち台地を意味する。北西 (l-29) や東部 (aj-17) の台地上の地点ではピークがほとんど確認できない。一方で、北部 (x-41) では 0.1s 付近の短周期に、南部 (r-05、ad-05) は 0.6～0.7s とやや長周期にピークが確認できる。これらの結果から得られた卓越周期分布を図 3.10 に示す。図から、以下の点が確認できる。

- ①台地部は全体に卓越周期が短い。
- ②平野を東西方向にみると、相模川流域の卓越周期が相対的に長い。
- ③相模川を南北（縦断）方向に見ると河口側の卓越周期が相対的に長い。
- ④相模川右岸側で、一部特に卓越周期が長い地域が分布する。

ボーリングデータなどから想定されている相模平野の沖積層基底の地形を図 3.11 に、相模平野右岸側の微地形分類を図 3.12 にそれぞれ示す<sup>41)</sup>。ボーリングデータから得られているこれらのデータと、前記した微動観測による卓越周期の特性はよく対応している。すなわち、卓越周期の大局的な分布 (①～③) は、図 3.11 の沖積層厚に対応する。また、④の相模川右岸の局所的に卓越周期が長いエリアは、によると相模川河口付近の砂州・砂丘地帯（砂質土主体地域）から、後背湿地（粘性土主体地域）へ変わった地域に相当する。

単点微動観測による卓越周期分布からマイクロゾーニングを実施した。結果を図 3.13 に示す。卓越周期が 1.2s 付近と最も長く砂質土主体地盤の相模川河口付近を As ゾーン、粘性土主体の相模川右岸（西側）付近を Ac ゾーンとした。河口を除く相模川下流域西側と相模川両端の新幹線沿いを Bs、Bc ゾーン（卓越周期は 0.8s 程度）、相模川東側の中流から下流域と平野北部から西側を Cs、Cc ゾーン（卓越周期は 0.5s 程度）、その他平野東端と平野を囲む北から西側を Ds、Dc ゾーン（卓越周期は 0.3s 程度）とした。それぞれ、s は砂質土を主体とした地盤、c は粘性土を主体とした地盤を意味し、地盤振動特性は、沖積層厚のみでなく表層の堆積物の影響が大きいことが確認できた。

このマイクマイクロゾーニング結果と 1923 年関東地震の被害分布<sup>42)</sup>と比較を比較すると、両者はよく整合していることが確認できる。砂質土主体地盤と粘性土主体地盤に分けて、卓越周期とボーリングデータから推定される沖積層厚との関係をプロットした。ばらつきは見られるものの、両者は明確に傾向が異なり、回帰式を求めると下式が得られた。

$$\begin{aligned} \text{砂質土主体地盤 : (卓越周期)} &= 0.0163 \times (\text{沖積層厚}) \\ \text{粘性土主体地盤 : (卓越周期)} &= 0.0243 \times (\text{沖積層厚}) \end{aligned} \quad (3-1)$$

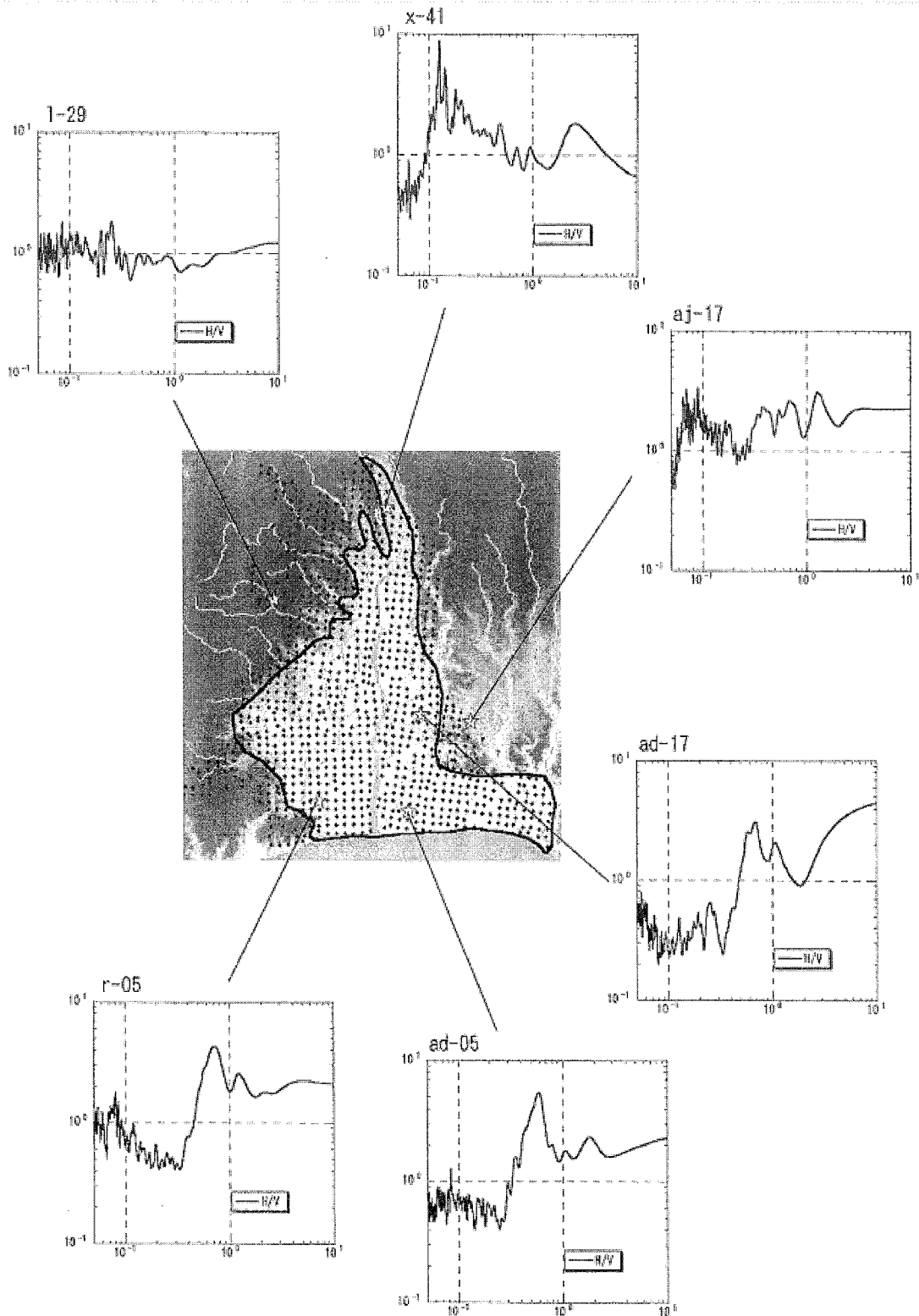


図 3.9 高密度な単点微動観測地点と代表的な H/V スペクトル比<sup>25)</sup>

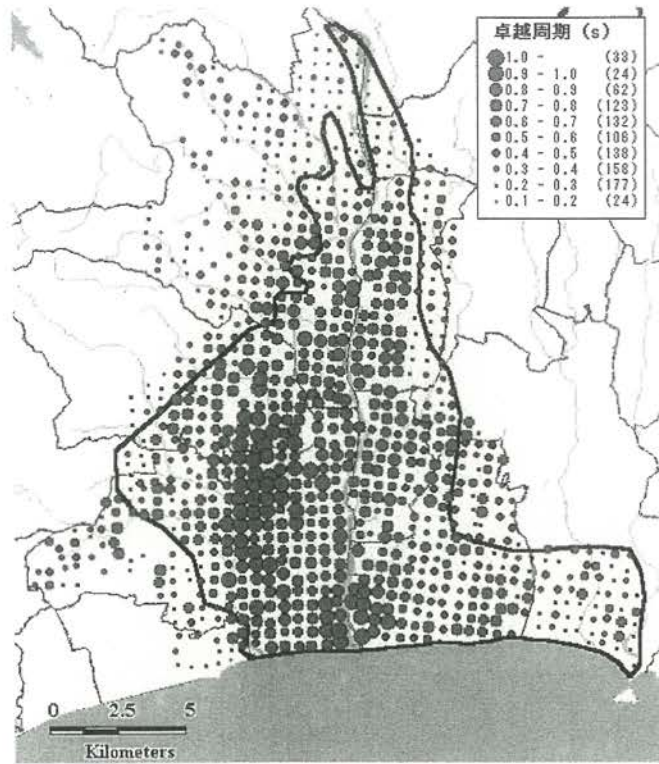


図 3.10 高密度な単点微動観測による卓越周期分布<sup>25)</sup>

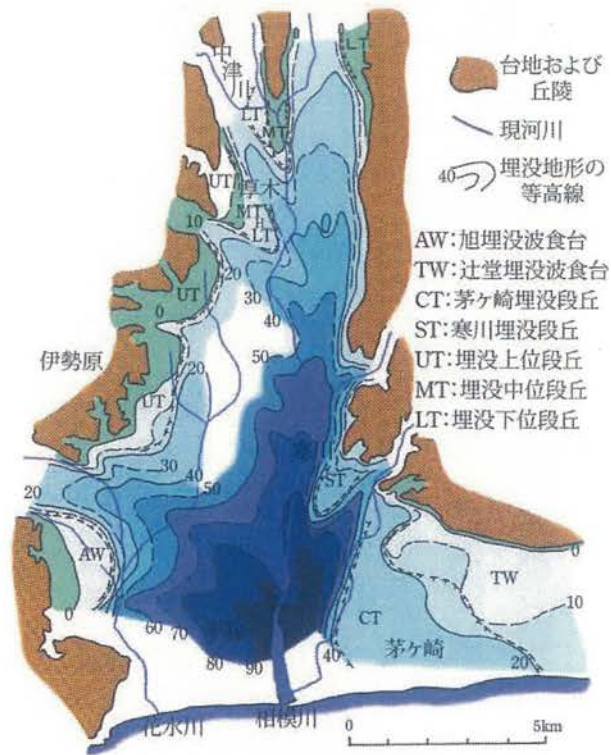


図 3.11 ボーリング調査より推定されている沖積層基底の地形<sup>41)</sup>





図 3.12 ボーリング調査より推定されている相模平野右岸の微地形<sup>41)</sup>

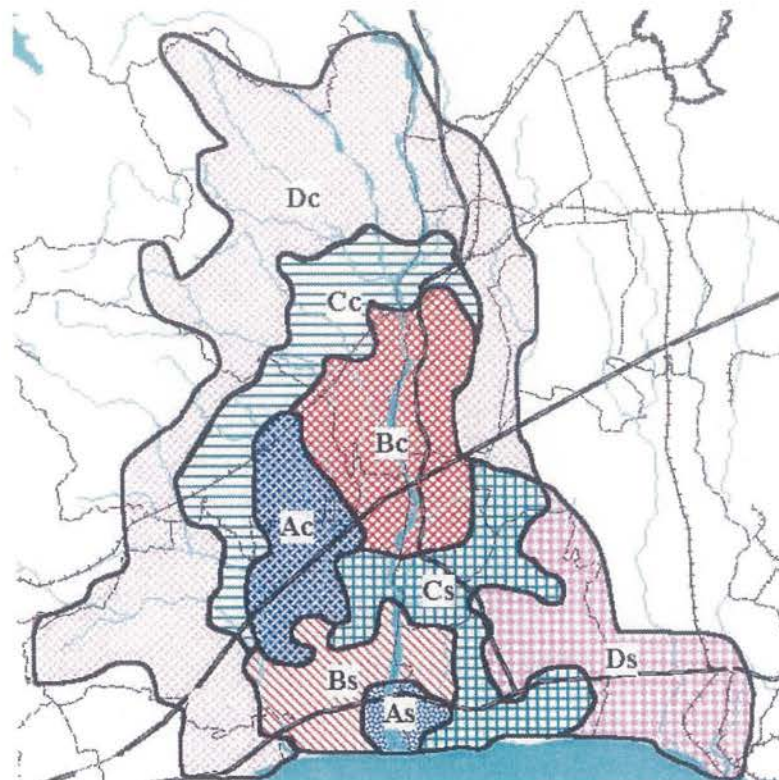


図 3.13 高密度な単点微動観測結果と地形状況を反映したマイクロゾーニング<sup>25)</sup>

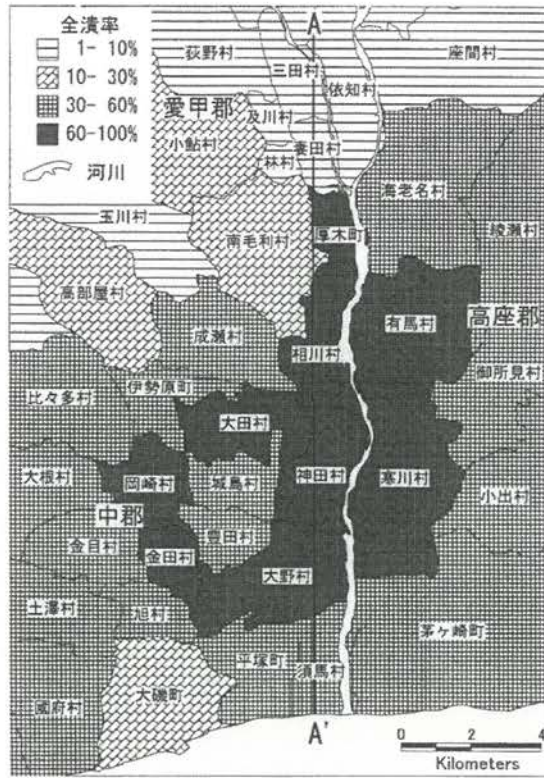


図 3.14 1923 年関東地震の相模平野流域での全潰率（市町村単位）<sup>42)</sup>

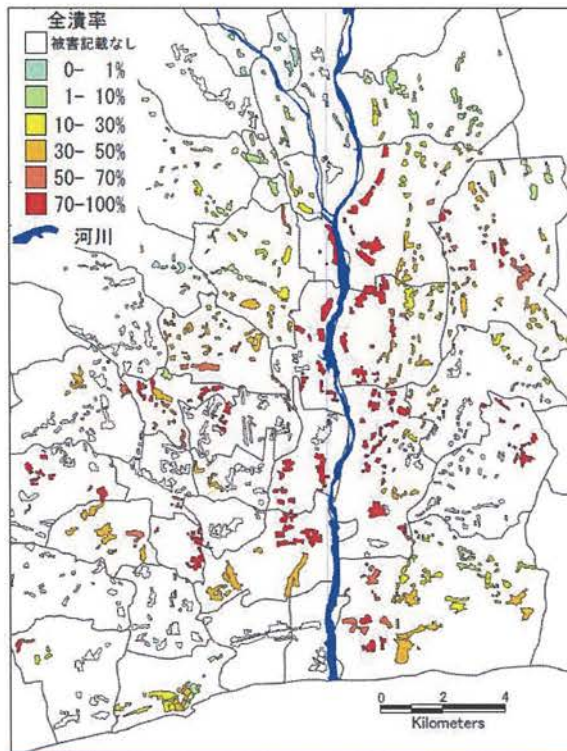


図 3.15 1923 年関東地震の相模平野流域での全潰率（字単位）<sup>42)</sup>

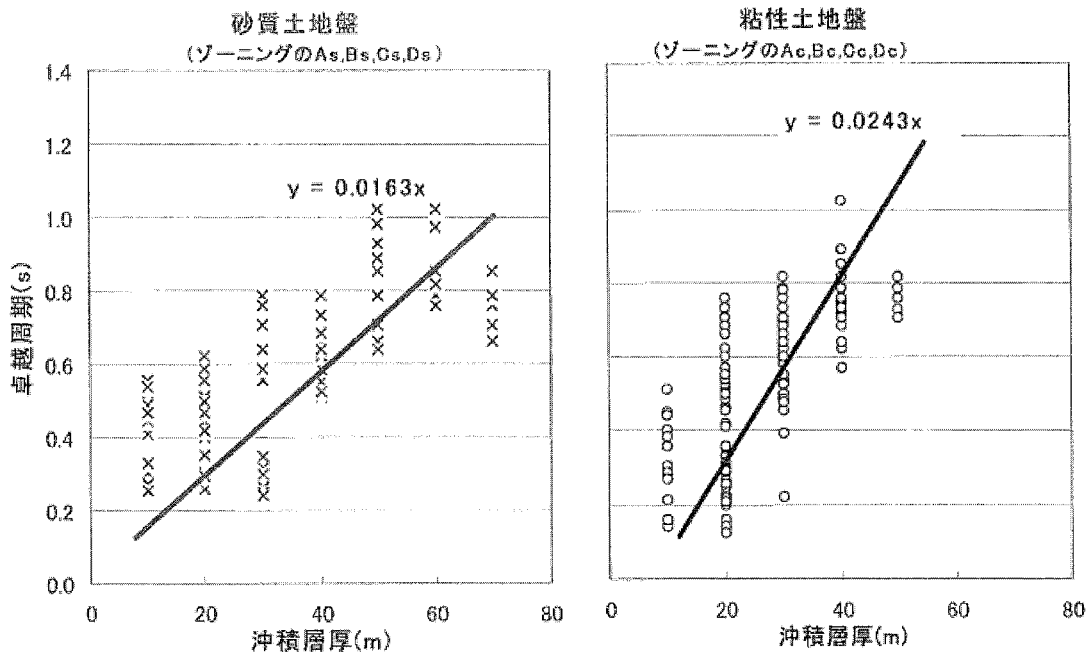


図 3.16 卓越周期とボーリングより推定された沖積層厚の関係<sup>25)</sup>

(4) まとめ

相模平野を対象に、定点連続観測と高密度な単点微動観測を実施し、以下の確認ができた。

- ①地盤構造が異なる5地点の定点観測結果より、地盤構造を反映した異なる周期特性を安定的に示した。特に卓越周期は、ばらつきも小さく安定性が高い結果が得られた。
- ②約900点におよび高密度な単点微動観測によって、相模平野の地盤の卓越周期分布が明確となった。その結果、卓越周期は0.1~1.2sに分布し、相模川右岸ではやや上流側でも周期0.7s以上の地域が確認できた。
- ③卓越周期分布からマイクロゾーニングを行った。ボーリング柱状図から推定される地盤特性と比較をすると、卓越周期の分布は、沖積層厚のみでなく表層の堆積物の影響が大きいことが確認できた。
- ④卓越周期分布によるマイクロゾーニング結果と、1923年関東地震の被害分布を比較すると良い整合性を示し、微動を用いたマイクロゾーニングの有用性が確認できた。

### 3.2.2 横浜市の卓越周期分布

#### (1) 検討結果の概要

3.2.1 と同様に横浜市を対象に、高密度な微動単点微動観測を行い、卓越周期の分布を求め GIS を用いた整理分析を行った<sup>43)、44)</sup>。

また、防災的な観点から、2.3 節で示したデジタル地形区分図より GIS を用いて微地形区分図や地盤増幅率と H/V スペクトル比の卓越周期分布を重ね合わせ比較を行った。

#### (2) 観測地点の概要

横浜市の地形は、丘陵地・台地・段丘・低地・埋立地に分けられる。丘陵地と台地が市域全体の約 7 割を占め、残りの約 3 割が河川に沿った沖積低地と臨海部の埋立地から成っている。

横浜市全域を 250m×250mメッシュで区切り、その中心付近を常時微動観測点とした。地理的な条件により観測不能地点を除き、約 6000 地点の観測を行った。観測は主にサーボ型速度計(表 2.1 の C、D)を使用し、水平方向 2 成分(NS, EW)、上下方向 1 成分(UD)の 3 成分の観測を行った。メッシュは横浜市の 19 体系座標のメッシュ体系に基づいたものとし、メッシュ番号もそれに準じたものとする。

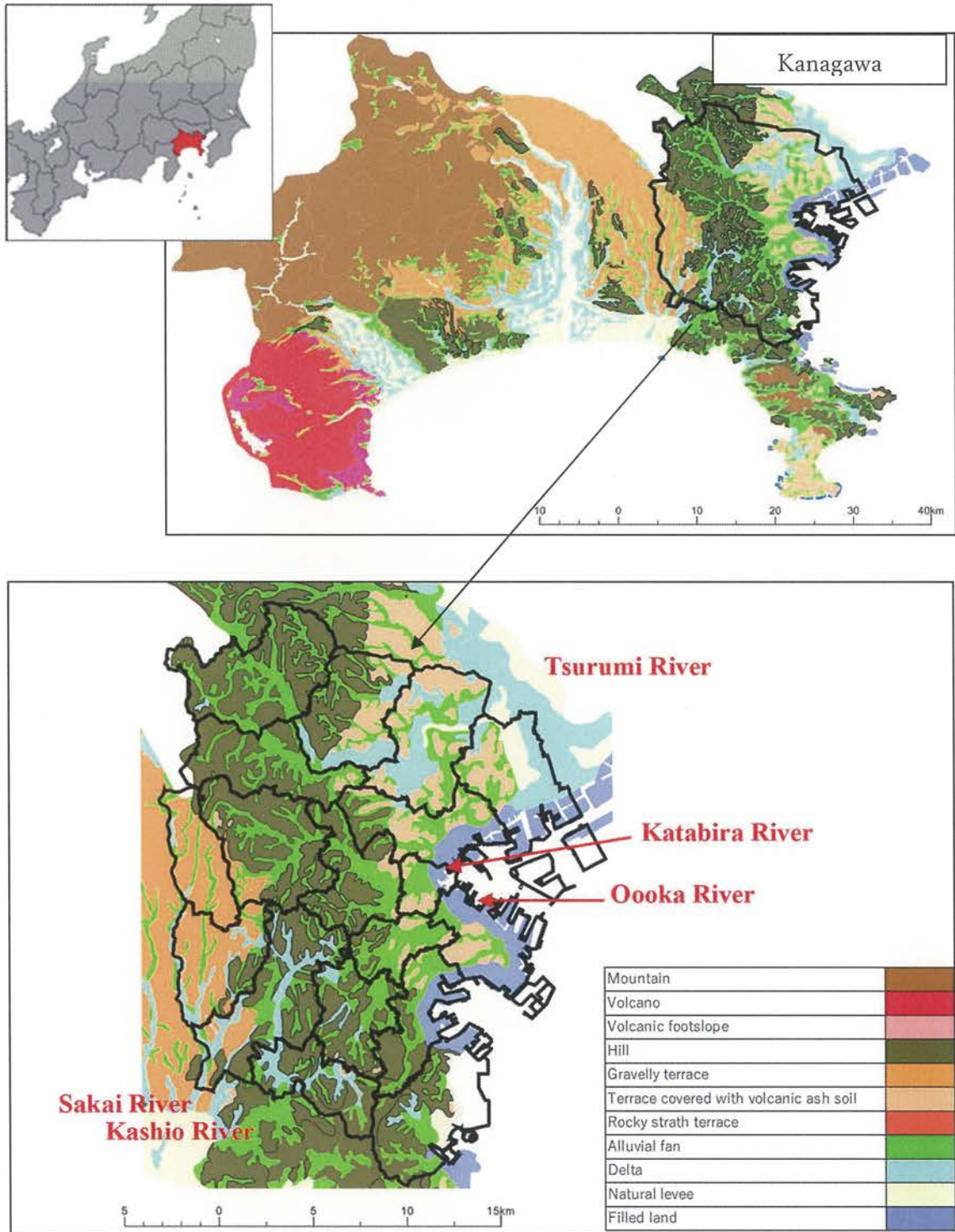


図 3.17 横浜市の地形区分図<sup>43)</sup>

表 3.2 区ごとの観測地点数<sup>43)</sup>

	Kohoku	Aoba	Midori	Kanagawa	Naka	Isogo	Minami	Konan	Asahi
Count	411	455	365	375	221	263	201	281	403
	Seya	Totsuka	Kanazawa	Izumi	Tsurumi	Hodogaya	Tsuzuki	Nishi	Sakae
Count	210	482	421	306	347	294	362	99	207
								Total	5703

(3) 卓越周期の分布と地盤震動特性の検討

横浜市の地形・地質は図 3.17 に示したように北西部から東部に掛けて台地・丘陵地が広がり、東部の低地へと続いている。また、台地・丘陵地を開析して流れる河川が発達している。ここでは、単点微動 H/V スペクトル比から卓越周期分布を整理し、GIS を用いて区毎に整理して図に示した。図 3.18～図 3.20 には、区毎の卓越周期分布図を示した。図より各区において、地形・地質および地盤の性状に起因する卓越周期の分布が認められている。

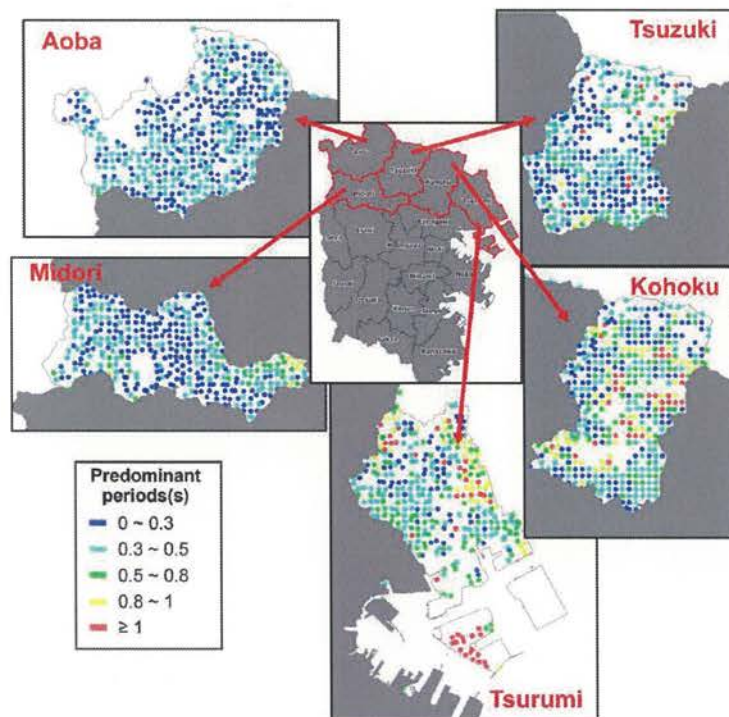


図 3.18 横浜市北部の卓越周期分布<sup>43)</sup>

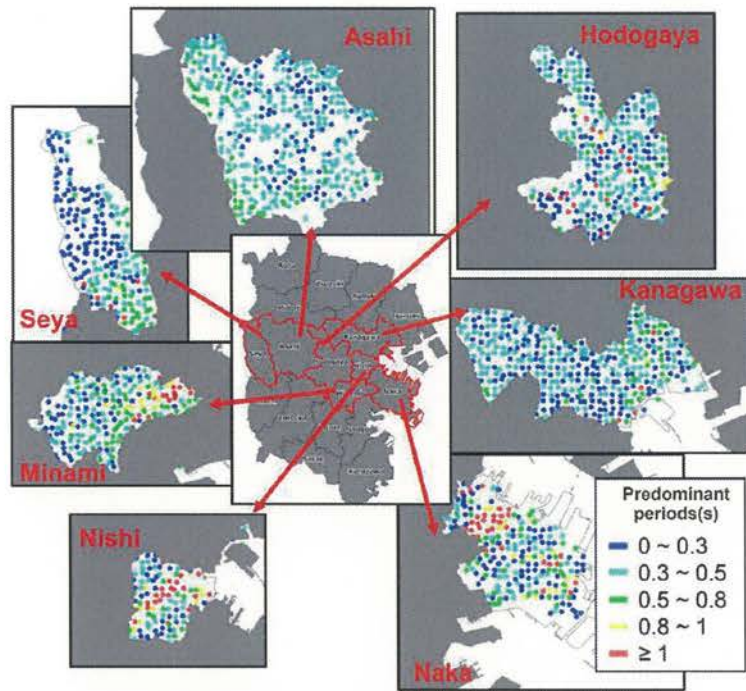


図 3.19 横浜市中央部の卓越周期分布 <sup>43)</sup>

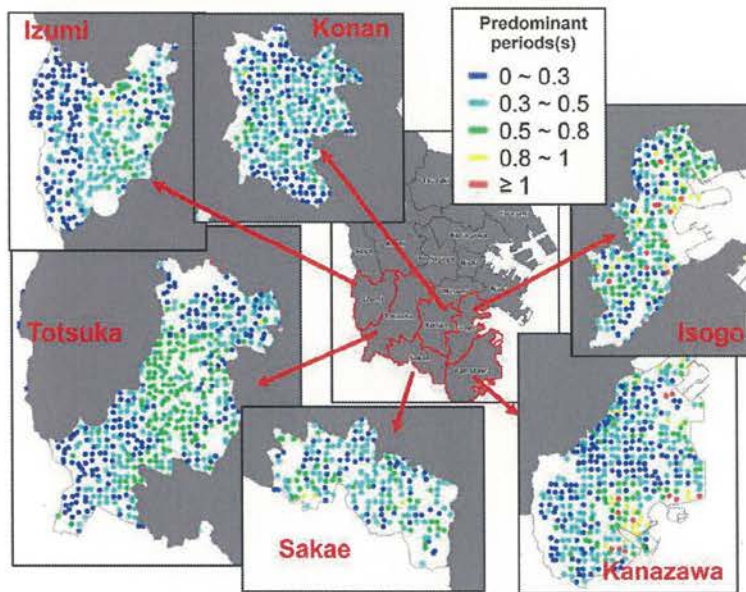


図 3.20 横浜市南部の卓越周期分布 <sup>43)</sup>

図 3.21 に地形区分図上に卓越周期分布を重ね合わせた図を示す。詳細に検討すると、横浜市では人工改変地（凡例区分）が多く、卓越周期の分布と微地形区分との対応において安定して明瞭な対応関係は認め難い傾向を示しているが、全体的な傾向としては微地形区分に対応した卓越周期分布を示している。これは、横浜市内陸部が、台地・丘陵地で起伏に富んだ地形をしており、しかも表層をローム層で覆われているとともに宅地造成などによる人工改変地が多く分布することによって考えられる。人工改変地は台地・丘陵地を削った切土地盤は堅固で安定しているため卓越周期が短くなり、盛土地盤は新しく人工的に盛った地盤であるため、その盛土層厚や材料により不安定で卓越周期が変動し、相対的にやや長くなる傾向があるものと考えられる。埋立地・干拓地（凡例）にも大きなバラつきが見られた。これは、旧海岸線より西側の埋立地・干拓地は以前丘陵地だったところを埋め立てているため軟弱地盤層厚が薄くて卓越周期が短くなり、旧海岸線より東側の埋立地・干拓地は海を埋め立てているため既存の堆積層と合わせて軟弱地盤層厚が相対的に厚くなるために卓越周期が長くなったものと考えられる。

地盤増幅率は微地形区分と対応しており、地表面下の工学的基盤から上層の表層地盤の速度増幅率として定義されている。従って、増幅率が大きくなる地域は相対的に地盤が軟質であることを示している。そのため、地震防災の観点からは地盤増幅率が高い、すなわち軟弱な地盤の地域では建物倒壊などの被害が多くなる可能性があり、また震源から遠くても、軟弱な地盤地域の揺れが激しくなることが予想されることになる。図 3.22 に地盤増幅率図上に卓越周期分布を重ね合わせた図を示す。横浜市の地盤増幅率は埋立地が 2.0 以上となり、西側の内陸地域に向かうにつれて増幅率の値が小さくなっていく傾向が見られ、卓越周期分布図とやや明瞭な相関性が認められる。



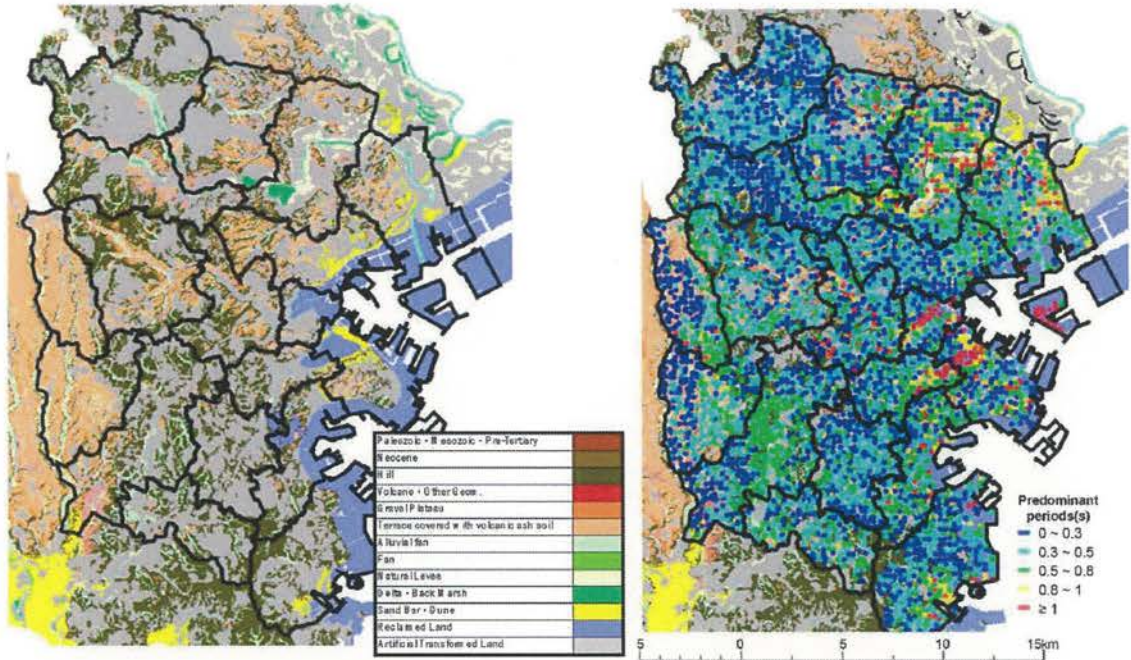


図 3.21 地形区分と卓越周期分布の検討<sup>43)</sup>

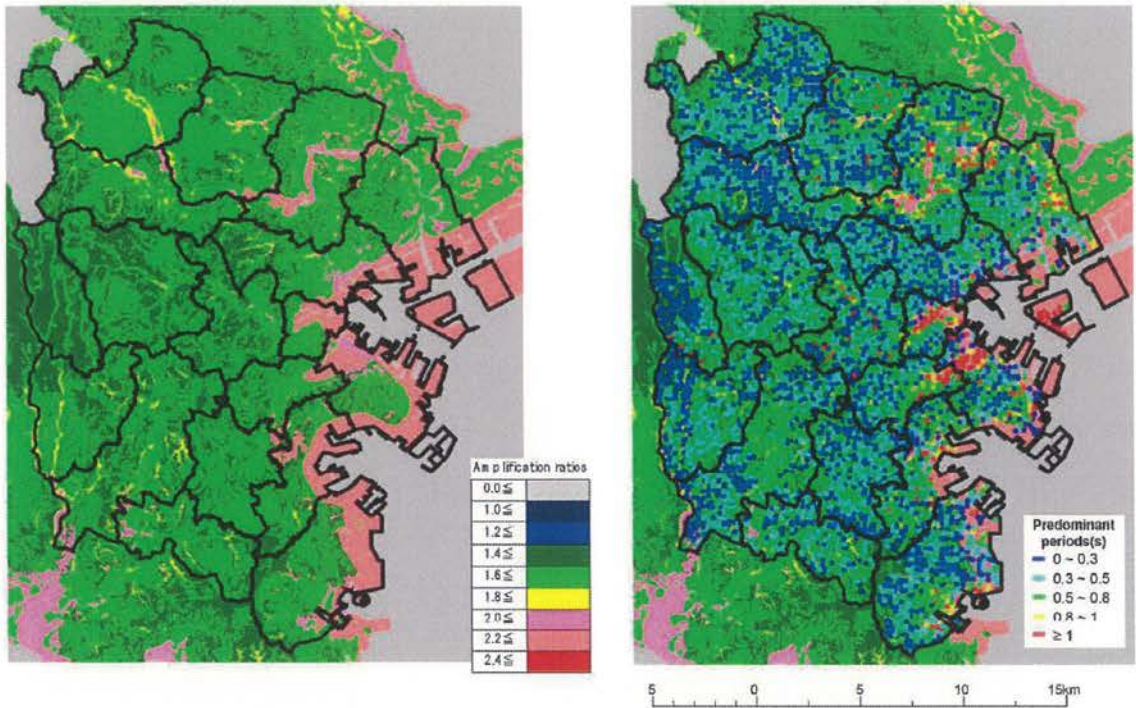


図 3.22 地盤増幅率と卓越周期分布の検討<sup>43)</sup>

#### (4) まとめ

横浜市の高密度な単点微動観測によって求められた卓越周期分布について、地盤震動特性を検討する上で活用することを目的として GIS を用いて整理・検討することを試みた。

GIS を用いて整理した横浜市内 18 区毎の卓越周期分布図では、各区の地形・地質および地盤の性状に起因する分布傾向を示し、横浜市の地形・地質の特徴である西部の台地・丘陵地から東部の低地に至る地形・地質の変化と両者を結ぶ河川流域の堆積地盤環境と明瞭に整合する卓越周期の分布傾向が認められることが分かった。

横浜市の卓越周期の分布を地域的に詳細に見ると、横浜市では人工改変地が多く、また北西部に広がる台地・丘陵地の表面にはローム層が不規則に堆積しているため急激に変化する地域が認められた。特に台地・丘陵地において、卓越周期の分布が不規則に変化して、あまり安定した傾向は認め難い地域であることも分かった。全体的な傾向としては、上述したように標高の高い西部から標高の低い東部にかけて徐々に卓越周期が長くなる傾向が認められている。

防災的な観点から作成された微地形区分図や地盤増幅率図と卓越周期の分布を重ね合わせた結果からは、全体的には卓越周期分布と両者の図とは地形・地質を反映して良好な相関性が認められた。特に、微地形区分図では台地・丘陵地に広く広がる人工改変地（凡例）が分布していることにより相関関係がやや不明確になるが、地盤増幅率図と卓越周期分布とは明瞭な相関関係が認められることが分かった。

### 3.2.3 神奈川県東部の卓越周期と堆積層厚

#### (1) 検討結果の概要

前述したように、地盤震動特性は地盤構造に依存する。微動観測で得られた地盤震動特性が地盤構造と大きく関係していることを示すため、3.2.2 に示した横浜市を含む神奈川県東部の高密度な単点微動観測結果より、卓越周期と地盤構造の関係を考察した。地盤構造は、ボーリング資料を収集し堆積層厚の分析結果を用いている。

単点微動観測結果による H/V スペクトル比の卓越周期と堆積層厚の関係式は、形成過程を考慮した地形区毎に特徴があり、地形の形成過程が微動 H/V スペクトル比に反映されていることが明らかとなった。

#### (2) 対象地域の地形と地盤

対象地である神奈川県東部の地形や地盤概要については、「2.3 神奈川県を対象とした地形区分の整理」や「3.2.2 横浜市の卓越周期分布」に記載のとおりであるが、ここでは地形の形成過程の視点から、再度整理し記載する。

調査対象地域の表層地質を図 3.23 に示す。本節では地形区として、大河川が形成した多摩川低地下流部(以降、多摩川低地)、中小河川である帷子川・大岡川が形成した低地、海成台地である下末吉台地、河成台地である相模野台地を取り上げる。横浜市内に広い範囲を占める丘陵地は人為による造成の影響が顕著で、地形発達史からの検討になじまないため取り上げない。また、鶴見川低地の地形と地盤は、帷子川・大岡川低地とほぼ同じなので、今回は検討対象から外した。

平野の地形を台地と低地を分けたのは端的に言えば、地殻変動と氷河性海面変動である。低地は、最終氷期極相期までに形成された谷が、その後の気候温暖化に伴う海面上昇期に埋設され形成された。この過程は低地に共通するが、埋積のされ方は、各河川の海面上昇に対する反応、具体的には流域からの土砂供給量と河川の土砂運搬能力の違い、内湾や外洋に面するかなどによりさまざま、堆積物(地盤)が異なる<sup>45)</sup>。また、台地は低地が隆起した地形であるので、起源となる低地の地形発達史に由来した地盤構造になる。

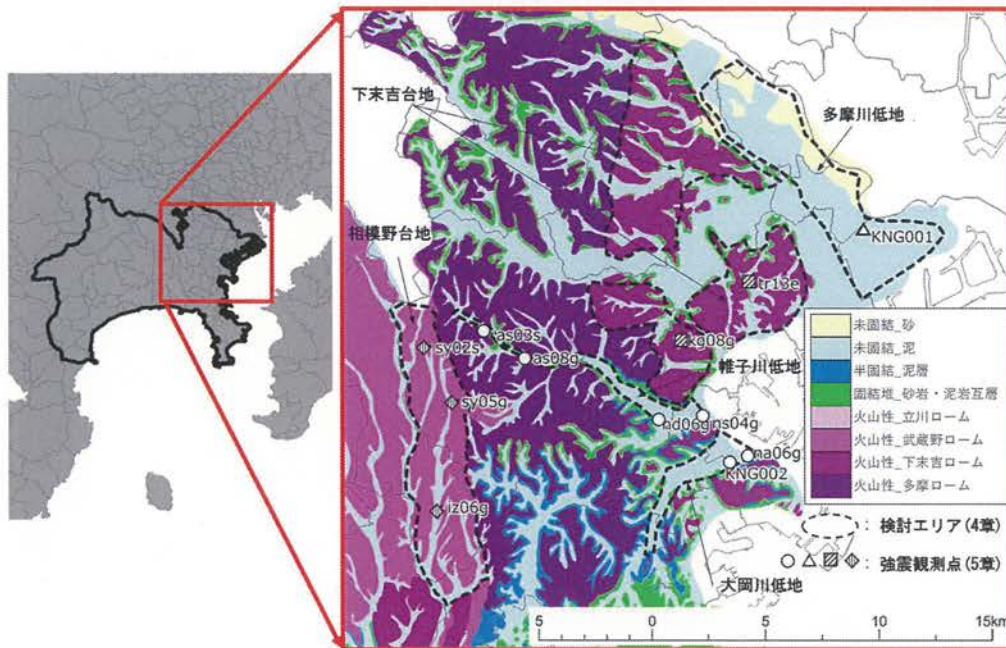


図 3.23 対象地域の表層地質<sup>46)</sup>

表 3.3 対象地域の地形・工学的基盤や地盤構成の一覧<sup>41),47)</sup>

地域	地形	工学的基盤			地盤構成層	
		地層	S波速度 (m/s)	時代等	層相	N値
多摩川低地	河成低地	沖積層基底礫層 中期更新統	400	沖積層	上部：粘土・シルト	2~5
					下部：砂・粘土・シルト互層	10~15 (粘性土) 20~30 (砂質土)
帷子川・ 大岡川低地	河成低地	中期更新統	425	沖積層	上部：粘土・シルト	0~3
					下部：粘土・シルト	5~12
下末吉台地	海成台地	中期更新統	445	関東ローム層 新期更新統	関東ローム	5~10
					砂・粘土・シルト	6~15 (粘性土) 20前後 (砂質土)
相模野台地	河成台地	相模野礫層	435	関東ローム層 新期更新統	関東ローム	2~12
					粘土・シルト	2~15

①多摩川低地と帷子川・大岡川低地

多摩川低地、帷子川・大岡川低地とも、最終氷期極相期までに形成された谷が後氷期に溺れ谷となり、その後埋積された地形である。多摩川低地では谷底に扇状地性の沖積層基底礫層があり、工学的基盤となる。この礫層が分布しないところでは、中期更新統が工学的基盤となる。大河川である多摩川低地では、深度 30m 程度の位置に N 値 30 前後を示す砂層がある。この砂層が後期更新世と完新世を分けるヤンガードリアス期(最終亜氷期)

の堆積物とされ、沖積層は上部と下部に2分される。下部は、氾濫原に堆積したN値が比較的大きな砂層と粘土・シルト層の互層からなり、上部は縄文海進時の入り江に堆積した粘土・シルト層が主要部を構成する。最上部には入り江を埋積した三角州性の砂層が分布し、その上を、微地形を構成する河成の堆積物が覆う。

## ②下末吉ロームと相模野台地

下末吉台地も相模野台地もローム台地に分類されるが、下末吉台地は最終間氷期最盛期の浅海底が離水した海成台地、相模野台地は最終氷期に形成された扇状地性低地が段丘化した河成台地であり、堆積環境と離水時期が異なる。下末吉台地では、中期更新統が工学的基盤となり、台地を構成する後期更新統(下末吉層)とそれを覆う関東ローム層が主な堆積層となる。後期更新統は砂、シルト、粘土が互層状に堆積し、前の氷期に谷であったところには厚く分布し、波食台であったところでは薄い。

相模野台地では、台地を構成する河成礫層(相模野礫層)が工学的基盤となり、離水時に形成された粘土・シルト層やそれを覆う関東ローム層が堆積層となる。離水時期が下末吉台地より遅いので、関東ローム層は一般に下末吉台地より薄い。

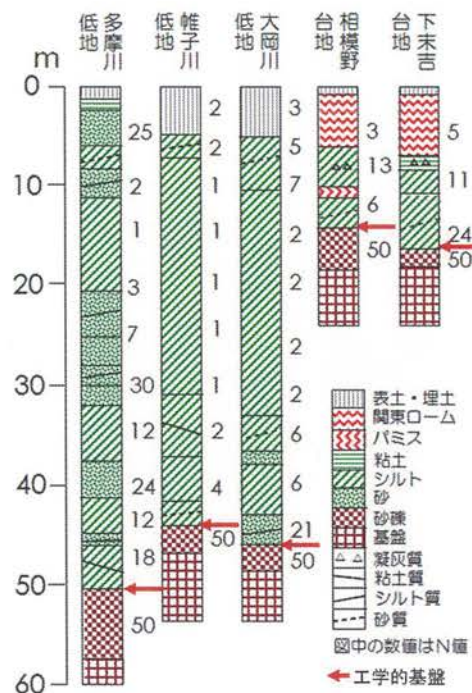


図 3.24 対象地域の代表的な柱状図<sup>48),49</sup>

### (3) 卓越周期と堆積層厚の関係

ここでは横浜市などによってまとめられているボーリング柱状図<sup>50)</sup>から堆積層厚を読み取り、卓越周期との関係を整理し回帰式を求めた。回帰式は線形回帰とすると下式となり、単位厚さ当たりの堆積層が卓越周期に寄与する係数  $\alpha$  と、層厚では説明しきれない部分である  $\beta$  からなる、すなわち、 $\beta=0$  であれば理論上は  $1/4$  波長則( $T=4H/Vs$ )より、 $\alpha=4/Vs$  となる。しかし、実際には  $\beta$  は 0 とはならない。 $\beta$  は線形回帰により生じる定数項で、回帰した際の残差に関係する。単純のために回帰係数  $\beta$  は一つにまとめているが、実際には工学的基盤以下の地下構造や堆積層のモデル化など複数の影響が重なったものと考えられる。

$$T_0 = \alpha \times H + \beta \quad (3-2)$$

層厚を読み取るのに用いるボーリング柱状図は、地形や標高を勘案し常時微動観測地点と同一の堆積層が仮定できるデータで、かつ概ね 100m 以内の距離に存在するデータを用いた。すなわち、ボーリング地点と微動観測地点の違いによる地盤層厚の誤差を含んだ検討となっている。また、台地部については、人工改変による層厚の変化を排除するため、極力人工改変が行われていない地点として、丘陵地は切り盛りの著しい造成地、沿岸部は埋立地を除くデータを選択した。

最初に地形区分を考慮せず全てのデータを用いて、堆積層厚と卓越周期の関係を整理し、結果を図 3.25 と下式に示した。

(以下数式で共通、 $T_0$  : 卓越周期(s),  $H$  : 堆積層厚(m),  $n$  : データ数,  $R$  : 相関係数,  $\alpha \cdot \beta$  : 係数)。

$$\text{全データ } T_0 = 0.018H + 0.180 \quad (R = 0.73, n = 255) \quad (3-3)$$

全体には堆積層が厚くなると、卓越周期が長くなる正の相関が確認できる。相関係数はそれほど悪くないが、全体的にややばらつきが大きい。全データの中で、PS 検層が実施されている地点 (12 地点) の卓越周期と堆積層厚の関係を図 3.26 に示す。データ数は少ないものの、低地の中小河川( $T_{0A}$ )と河成ローム台地( $T_{0D}$ )の回帰式を求め併記した。回帰係数の  $\alpha$  は低地で大きく、ローム台地で小さい。 $\beta$  は逆に低地で小さく台地で大きくなる。次項で地形発達史の異なる 4 地形区について、データを増やして再整理した。

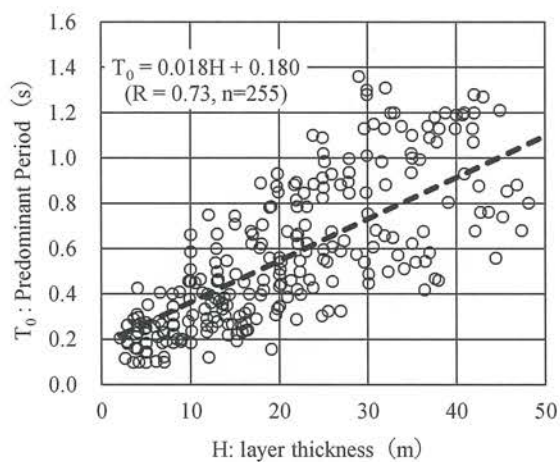


図 3.25 全データの堆積層厚と卓越周期の関係

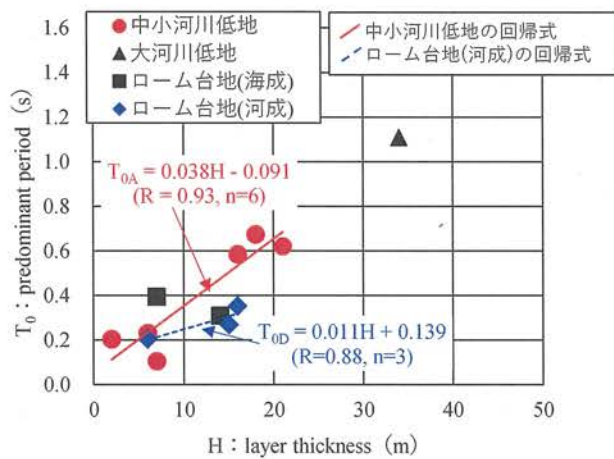


図 3.26 PS 検層地点の堆積層厚と卓越周期の関係

(4) 地形毎による堆積層厚と卓越周期の関係

帷子川低地と大岡川低地の堆積層厚と周期の関係を図 3.27 上段に、回帰式を下式にそれぞれ示す。回帰式の  $\alpha$  の値はほぼ一致し、相関係数  $R$  は共に高く、偶然ではあるが 0.91 で同じ値となる。両低地は近接し規模も同じで、地形発達史がほぼ同一なので、以降の考察では統合した。

$$\text{帷子川低地 } T_0 = 0.030H + 0.072 \quad (R = 0.91, n = 54) \quad (3-4)$$

$$\text{大岡川低地 } T_0 = 0.027H + 0.158 \quad (R = 0.91, n = 83) \quad (3-5)$$

多摩川低地の関係を図 3.27 中段に、回帰式を下式に示す。堆積層厚と卓越周期の相関は良い。ただし、回帰式の傾き  $\alpha$  は前述の 2 河川と比べると小さい。すなわち、単位堆積層当たりの卓越周期に対する寄与が小さい。これは前述したように、地形発達史が異なり、堆積層を構成する土質が異なるためと考えられる。

$$\text{多摩川低地 } T_0 = 0.013H + 0.160 \quad (R = 0.87, n = 57) \quad (3-6)$$

下末吉台地と相模野台地の関係を図 3.27 下段に、回帰式を下式にそれぞれ示す。いずれの結果も低地の結果に比べると傾き  $\alpha$  の値が小さく、 $\beta$  の値が大きい。また、相関係数  $R$  が小さい。この結果は、3.24 に示した PS 検層を用いた結果の傾向と調和している。工学的基盤の S 波速度は、台地でも低地でも概ね同程度(表 3.3 参照)であるので、 $\alpha$  が小さいのは堆積層の S 波速度の差を反映していると考えられる。前述したように、 $\beta$  の違いの影響は複数考えらえるが、回帰式の定数項で今回のデータセットの対象外(外挿部分)となる。

$$\text{下末吉台地 } T_0 = 0.007H + 0.239 \quad (R = 0.56, n = 34) \quad (3-7)$$

$$\text{相模野台地 } T_0 = 0.004H + 0.228 \quad (R = 0.35, n = 27) \quad (3-8)$$



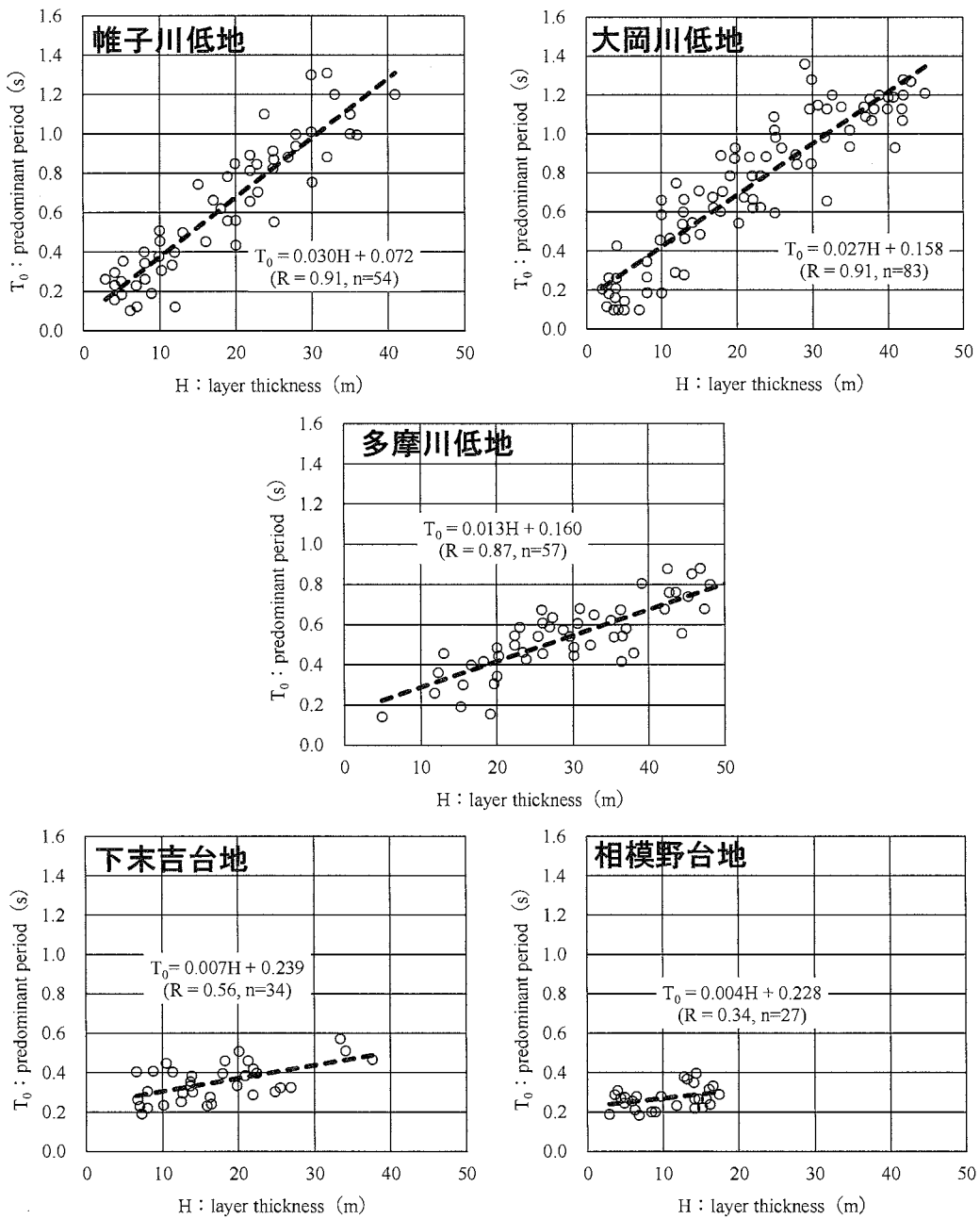


図 3.27 地形毎の堆積層厚と卓越周期の関係

(5) 地形毎による堆積層厚と卓越周期の関係の再整理

帷子川低地と大岡川低地は小河川が形成した低地で、地形発達史における地盤の形成過程が似ており、図 3.27 に示したように回帰式も似ているので両者を統合した。

下末吉台地と相模野台地は、両台地ともローム台地に分類され、 $\alpha$  が小さく、 $\beta$  が大きいことは共通している。しかし、 $\alpha$  が小さいとはいえ倍近く異なることや、地盤の形成過程、すなわち地形発達史が異なるので、それぞれ別の回帰式とした。下式と図 3.28 にそれぞれ示す。

堆積層厚と卓越周期の関係について既往の研究事例と比較する。「3.2.1 神奈川県中央部のマイクロゾーニング」の相模川流域での検討では、 $\alpha$  は 0.014(砂質土地盤)や 0.024(粘性土地盤)となり、多摩川低地と同様な結果が得られている。年縄ら<sup>51)</sup>は横浜市鶴見川上流を対象に同様な整理し、回帰係数  $\alpha$  を 0.056 としている(論文内では回帰係数の定義が異なるため本論に合わせて算出し直した結果)。本検討の 4 地形区では中小河川の場合と最も近く、本論の検討結果と整合的である。また、日本海沿岸部で地形条件がかなり異なるため比較は難しいが、小嶋ら<sup>52)</sup>は福井平野の沖積層厚と周期の関係を微地形で区分し整理している。結果は線形で回帰し同様な傾向を示しているが、相関係数にのみ着目すると R は 0.43 から 0.85 であり、地形発達史を考慮した本検討の沖積層の結果(中小河川低地と大河川低地)の方がやや相関が高い。

$$\text{中小河川低地 } T_0 = 0.028H + 0.127 \quad (2 \leq H \leq 45) \quad (R = 0.91, n = 137) \quad (3-9)$$

$$\text{大河川低地 } T_0 = 0.013H + 0.160 \quad (5 \leq H \leq 50) \quad (R = 0.87, n = 57) \quad (3-10)$$

$$\text{ローム台地 (海成)} \quad T_0 = 0.007H + 0.239 \quad (7 \leq H \leq 40) \quad (R = 0.56, n = 34) \quad (3-11)$$

$$\text{ローム台地 (河成)} \quad T_0 = 0.004H + 0.228 \quad (3 \leq H \leq 17) \quad (R = 0.34, n = 27) \quad (3-12)$$

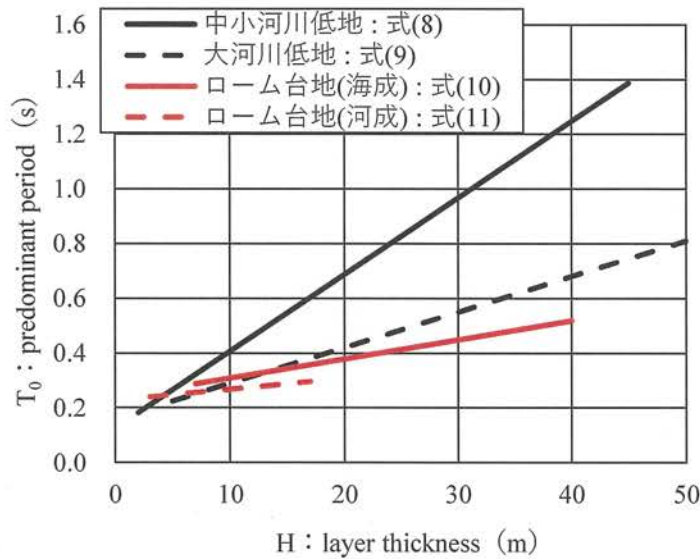


図 3.28 再整理した地形区毎の堆積層厚と卓越周期の関係

#### (6) 強震観測記録による確認

ここでは、堆積層厚が既知の強震観測地点で、実際の地震動特性が回帰式と整合しているかの確認を行った。検討地点は、横浜市強震ネットワーク<sup>53)</sup>と、K-NET<sup>54)</sup>の中から対象地形区内に位置する 12 地点とした。その内訳は、中小河川による低地が 6 地点、大河川による低地が 1 地点、ローム台地(海成)が 2 地点、ローム台地(河成)が 3 地点となる。なお、観測地点名は、横浜市強震ネットワークおよび K-NET の地点名とした。対象地震は、2012 年~2018 年に観測された強震記録(約 270 地震)の中から、全観測地点で概ね鉛直下方から伝搬することを想定し以下の①~③の条件で 5 地震を選定した。選定した地震の最大加速度は  $100\text{cm/s}^2$  程度である。地震記録の一覧を表 3.4 に示す。

強震記録は、主要動を含む区間(記録開始から 60 秒間)をフーリエ変換し、常時微動記録と同様に平滑化(バンド幅 0.3 Hz の Parzen window)を行い、水平 2 成分の相乗平均を鉛直成分で除して H/V スペクトル比(以降、EHVR とする)を求めた。観測記録の一例(地点 : KNG002、発生時刻 : 2014/5/5 5:18)を図 3.29 に示す。なお、全ての地震は 60 秒間で十分収束していること、地震動のコーダ部分を用いて EHVR を算出した場合も本検討区間と同様な傾向を示すことを確認している。

- ①M(マグニチュード) 4.5 以上の比較的大きい地震
- ②震源深さが 30 km 以上の地震
- ③ほぼ全観測位置で記録が得られている地震

表 3.4 検討に用いた強震記録の一覧

No.	発生時刻	震央位置		深さ Depth(km)	規模 M
		Lat.	Lon.		
1	2012/11/24 17:59	35.64	140.20	72	4.8
2	2013/4/14 10:22	36.00	139.50	97	4.6
3	2014/5/5 5:18	34.95	139.48	156	6.0
4	2014/9/16 9:16	36.90	139.86	47	5.6
5	2016/11/23 3:45	34.54	140.07	101	4.5

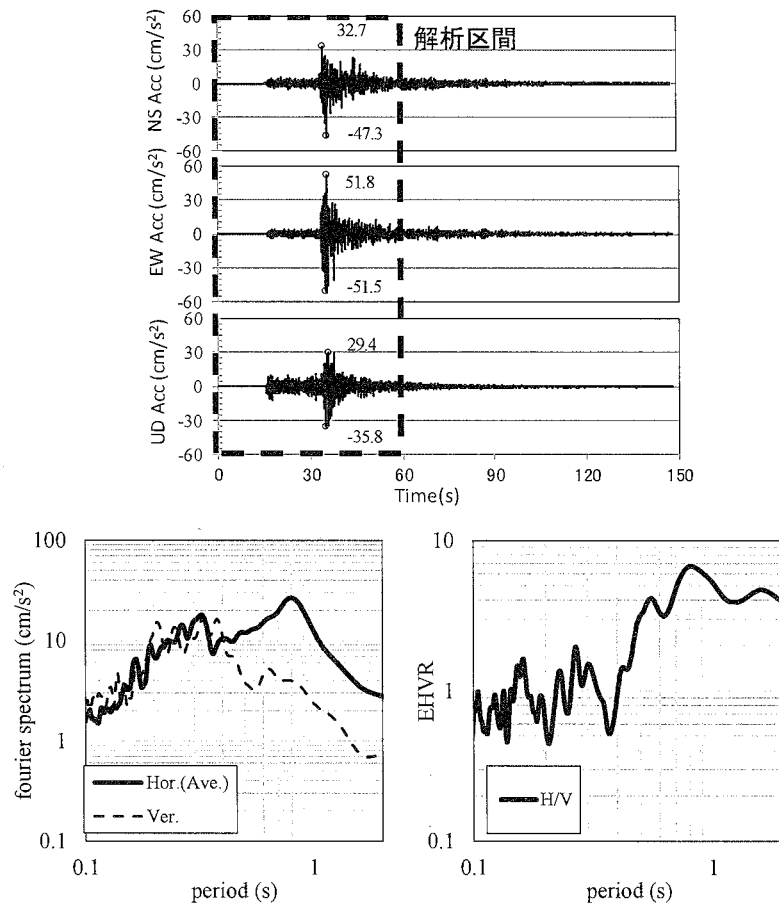


図 3.29 強震観測記録と解析結果例 (KNG002、2014/5/5)

算出した EHVR を図 3.30 図に示す。図には各地震の EHVR とその平均を併記している。全体に各地震と平均のグラフは重なっている。よって、各地点の地震動特性は平均の EHVR が対応しているとし、その卓越周期を読み取った(図中に↓で表記)。

一方、各地点の堆積層厚と関係式を用いて、地盤の卓越周期を推定した。堆積層厚はそれぞれの地点で公開されているボーリングデータから読み取った。ただし、KNG001 は K-NET による地盤データでは工学的基盤まで達していないため、近隣のボーリングデータと地震本部の地下構造モデル<sup>55)</sup>から、 $V_s$  が 400 m/s となる上面深度を工学的基盤と仮定し堆積層厚を設定した。

これら両者を比較した結果を図 3.31 に示す。横軸は常時微動観測結果の回帰式から推定した卓越周期で、縦軸は地震観測記録から得られた卓越周期である。また、地形区別の回帰式からの推定値と、全データを用いた回帰式からの推定値を併記している。全データを用いた推定値に比べると、地形区別の回帰式を用いた推定値の方が強震観測記録の卓越周期と良く一致する。このことは、地形区で再検討した回帰式により評価した卓越周期が、強震観測記録による卓越周期とより良く整合していることを示している。

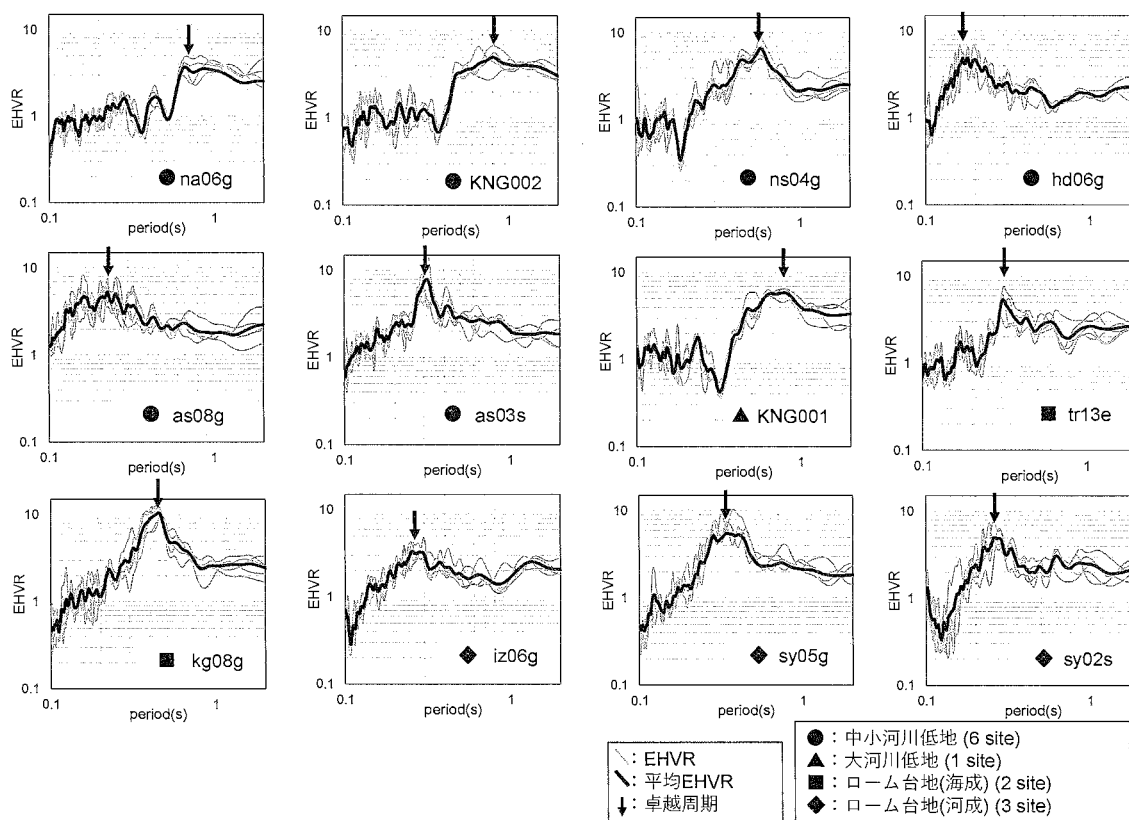


図 3.30 各地震の強震観測記録の EHVR と平均 EHVR

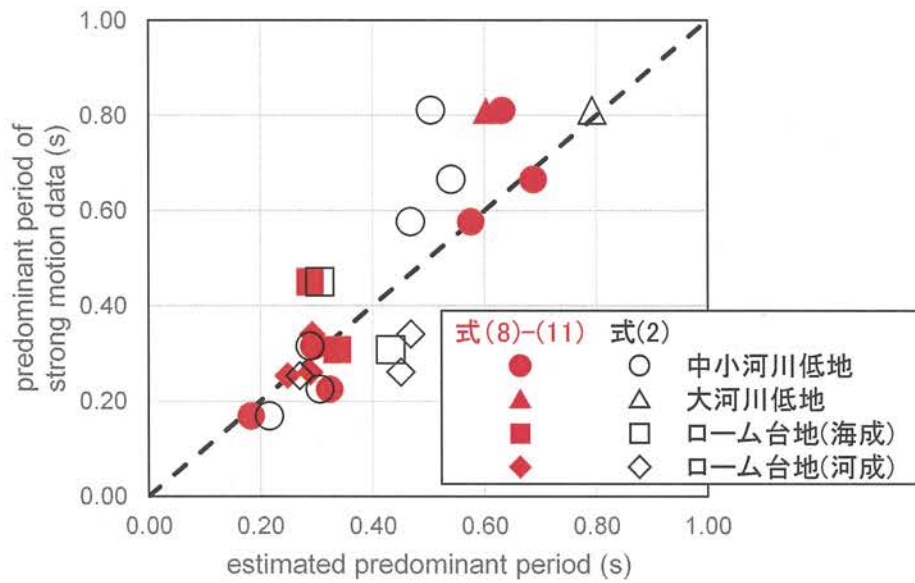


図 3.31 堆積層厚から推定した卓越周期と強震記録の卓越周期の関係

(7) 鶴見川低地での検証

鶴見川低地は、中小河川低地であり帷子川低地や大岡川低地と同様な傾向を示すことが想定される。ここでは、鶴見川低地の上流から下流域でランダムに選択した 10 地点について、卓越周期と堆積層厚の関係を確認し検討結果の妥当性の確認を行った。

図 3.28 に鶴見川低地の結果を追加し図 3.32 に示す。また、参考に鶴見川低地の位置を図 3.33 に、検証地点を図 3.34 にそれぞれ示している。図に示す通り、鶴見川低地の結果は中小河川低地の相関式に近接しており、結果はよく整合している。

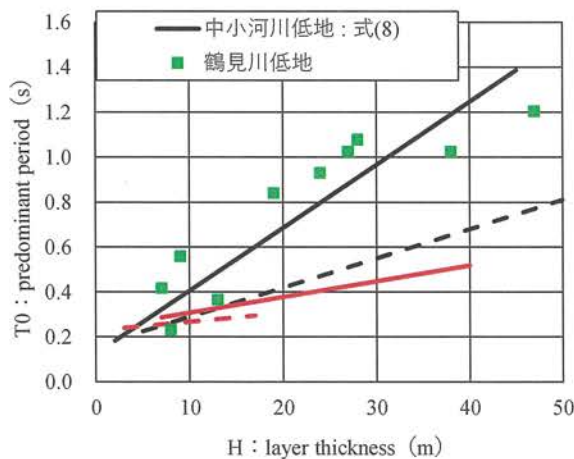


図 3.32 鶴見川低地での検証

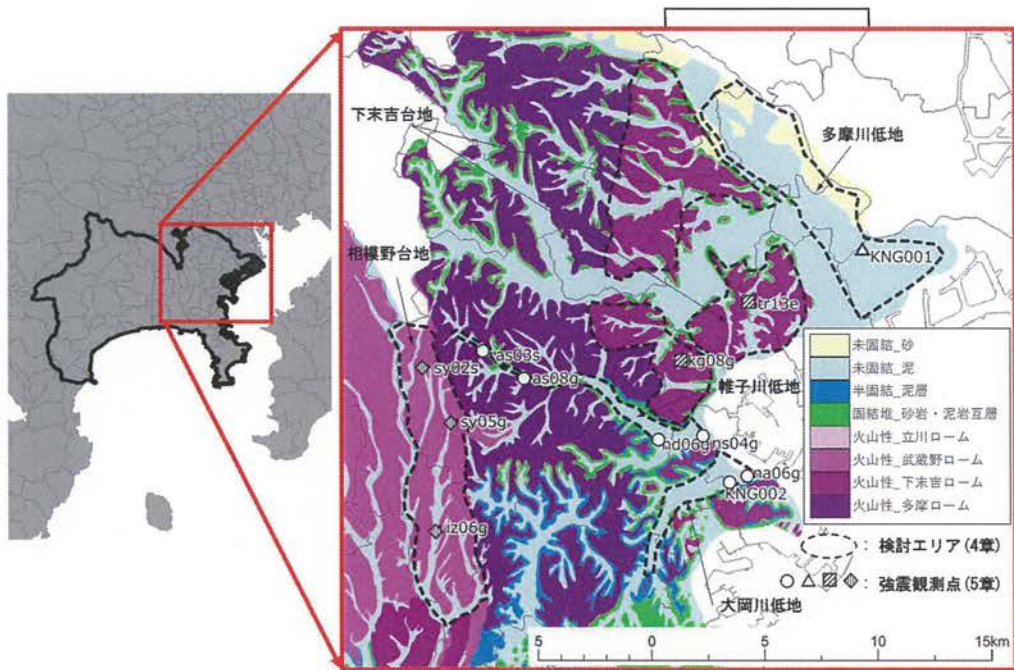


図 3.33 鶴見川低地の位置図

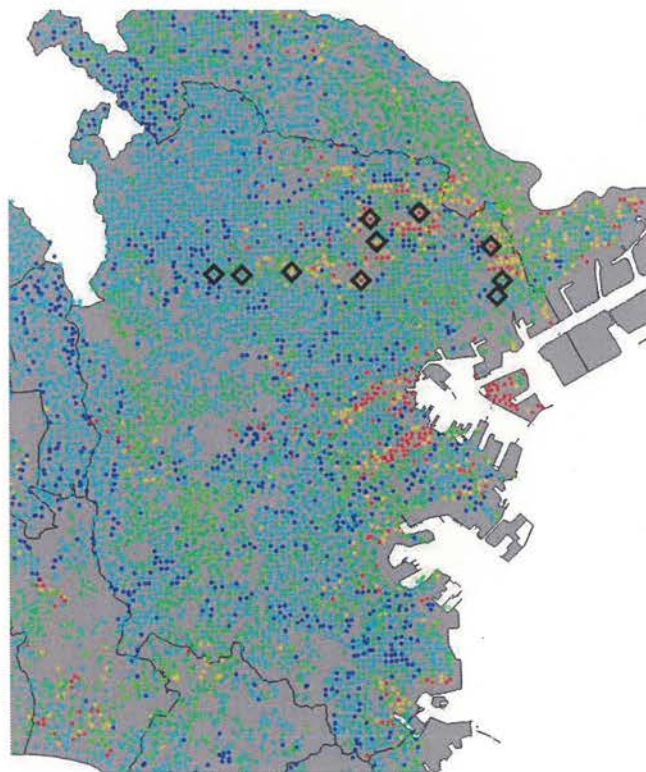


図 3.34 鶴見川低地での検証地点 (◇ : 10 地点)

### 3.3 まとめ

本章では、神奈川県相模平野と横浜市を対象に、単点微動 H/V スペクトル比の卓越周期を用いた地盤評価を行った。また、神奈川県東部を対象に、単点微動 H/V スペクトル比の卓越周期と堆積層厚の関係をまとめた。結果を以下にまとめる。

- ・相模平野を対象とした定点連続観測から、微動の H/V スペクトル比は地盤特性を反映しつつ時間に寄らず安定的な性情を示すことが確認できた。
- ・特に H/V スペクトル比の横軸である卓越周期はばらつきが小さく安定していたが、縦軸の H/V スペクトル比も地盤条件によってはばらつきが小さいことが確認できた。
- ・相模平野を対象とした高密度な単点微動観測による卓越周期は、ボーリング調査などによる地盤特性をよく反映した性状を示し、卓越周期を用いたマイクロゾーニングの有効性が確認できた。
- ・横浜市を用いた卓越周期分布も、相模平野と同様に地盤状況を反映した分布特性が確認でき、異なる地域でも同様な傾向を示すことが示唆された。
- ・微動による H/V スペクトル比の卓越周期と堆積層厚の関係は、地形発達史の異なる地形区毎に異なる。
- ・常時微動観測によって地形区毎に得られた回帰式と堆積層厚から推定した卓越周期は、強震記録の卓越周期と概ね一致する。

一方で、「2.2 新たな地盤ハザード評価手法の提案」で述べた通り、地震による建物被害などは卓越周期のみでなく、地震動のエネルギーを加味した検討も重要となる。本章でまとめた単点微動 H/V スペクトル比による卓越周期の分析は、非常に有用ではある。



# 第 4 章

## 第4章 表層地盤モデルを用いた数値解析による検討

### 4.1 はじめに

ここでは、単点微 H/V スペクトル比による地盤ハザード値の妥当性について数値解析を用いた検討を行う。

4.2 節では、数値解析を用いて算出した SH 波伝達関数とスペクトル強度 (SI 値) の関係についてまとめる。

4.3 節では、横浜市の強震観測記録を対象に実施した単点微動 H/V スペクトル比と数値解析から求める SH 波伝達関数の関係を整理した。

4.4 節では、4.3 節の補足的な検討として、SH 波伝達関数による地盤ハザード値の関係を整理した。

4.5 節では、本章の検討結果をまとめる。

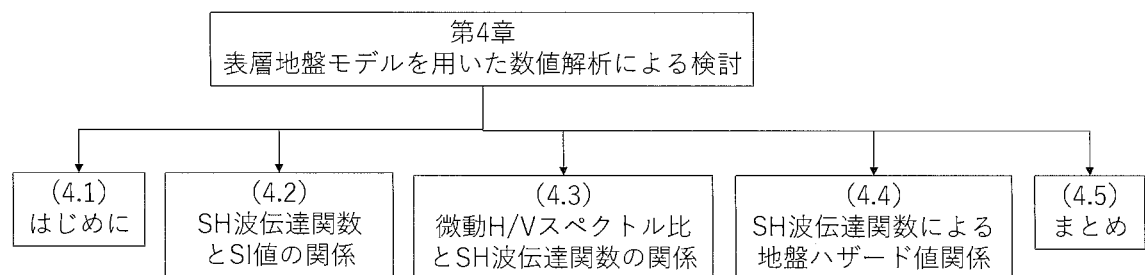


図 4.1 4章の構成

## 4.2 SH 波伝達関数と SI 値の関係

### (1) 検討方法の概要

図 4.2 に本章の検討方針の概要を示す。大きく以下の 2 つの関係性についての確認を行う。

①SH 波伝達関数による地盤ハザード値と SI 値の関係

②微動 H/V スペクトル比による地盤ハザード値と SH 波伝達関数のハザード値の関係

①の確認として、SI 値は図の右列に示すように、地表面の速度応答スペクトルの積分値として算出され、地表の速度応答スペクトルを工学的基盤の速度応答スペクトルで除することで応答スペクトル増幅率 ( $R_s(h, T)$ ) が算出できる。

一方で、図の中央列のように、地表のフーリエスペクトルを工学的基盤のフーリエスペクトルで除して、SH 波伝達関数が求められる。後述する②の関係、すなわち SH 波の伝達関数と単点微動 H/V スペクトル比の関係が確認できると、SH 波伝達関数の卓越周期と増幅率を乗じることで、仮の地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) が算出できる。

この仮の地盤ハザード値と SI 値の関係を確認する。

②については、既往の検討結果より、単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数を比較すると、卓越周期は高い相関を示すことが確認されている。H/V スペクトル比の縦軸については、ばらつきが大きいとの指摘もあるが、ここでは試みとして、単点微動 H/V スペクトル比から求める地盤ハザード値 ( $P_E$ ) と SH 波伝達関数から算出する仮の地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) の比較を行う。

①と②の関係性が確認できると、間接的ではあるが微動による地盤ハザード値 ( $P_E$ ) と地震動評価指標である SI 値の関係性が確認できることとなる。

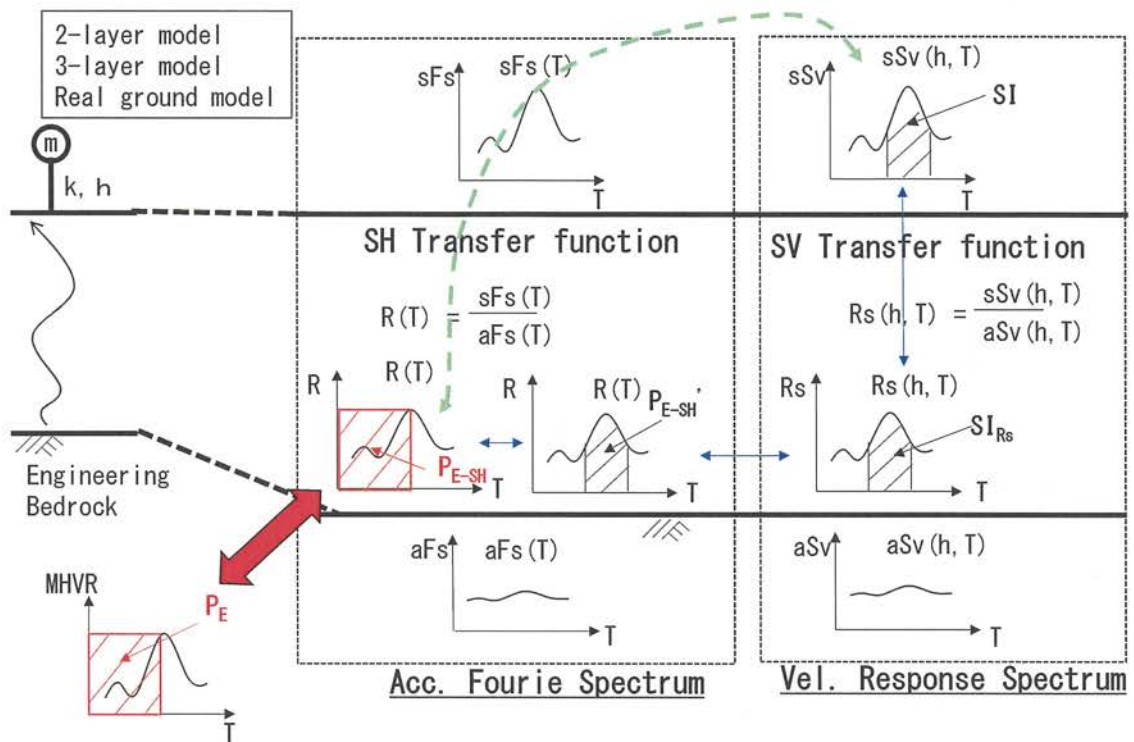


図 4.2 数値解析を用いた検討のイメージ

(2) 提案手法の理論的位置づけ

地震動強さとして評価可能である SI 値は、図 4.2 に示す通り速度応答スペクトル ( $sSv(h, T)$ ) の積分値で定義される。ここで、地表と工学的基盤の速度応答スペクトルの比 ( $R_s(h, T)$ ) を用いると下式となる。

$$SI_h = \int_{T_1}^{T_2} sSv(h, T) dT = \int_{T_1}^{T_2} R_s(h, T) \times aSv(h, T) dt \quad (4-1)$$

$aSv(h, T)$  ; 工学的基盤の速度応答スペクトル

$R_s(h, T)$  ; 速度応答スペクトルの伝達関数

上式では地表面の速度応答スペクトル  $sSv(h, T)$  は、基盤における地震動の速度応答スペクトル  $aSv(h, T)$  と地表の速度応答スペクトルの伝達関数  $R_s(h, T)$  の積、「 $R_s(h, T) \times aSv(h, T)$ 」の積分値と表される。上式の右辺の  $aSv(h, T)$  は、工学的基盤レベルの地震動の速度応答スペクトルを表す。工学的基盤の  $V_s$  が概ね 600m/s 以上の大都市圏のいくつかの地点で、本検討の周期帯では  $aSv(h, T)$  の周期特性は小さいことを確認している。また、本研究では、表層地盤と工学的基盤以深の増幅特性では相対的に表層地盤の影響が重要と判断し、 $aSv(h, T)$  を一定値と仮定し  $aSv_0$  とした。そのように仮定すると、SI 値に寄

与するものは表層地盤の速度応答スペクトルの伝達関数  $R_s(h,T)$  の積分値となり、これを表層の地盤ハザード値  $P_E$  とすると

$$P_E = aSv_0 \times \int_{T_1}^{T_2} R_s(h,T) dt S_v \cong \int_{T_1}^{T_2} R(T) dt \quad (4-2)$$

$aSv_0$  ; 工学的基盤の速度応答スペクトル(一定と仮定)

となり速度応答スペクトルの伝達関数  $R_s(h,T)$  の積分値に比例することになる。仮に  $R_s(h,T)$  が SH 波の伝達関数  $R(T)$  に等しいものとする。また、 $R_s(h,T) \cong R(T)$  とすると  $P_E$  は下式のように表すことができる。

$$P_E = \int_{T_1}^{T_2} R_s(h,T) dt S_v \propto \int_{T_1}^{T_2} R_s(h,T) dt \quad (4-3)$$

$R(T)$  ; SH 波伝達関数

さらに、SH 波の伝達関数が卓越周期  $T_0$  でピークを示し、凹凸は存在するものの  $T_0$  付近の周期範囲の  $R(T)$  が大きな比率を占め、下式が得られる。

$$P_E \cong \int_{T_1}^{T_2} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left\{ \int_{T_1-\epsilon}^{T_2+\epsilon} R(T) \right\} dT \cong R(T_0) \times \int_{T_1}^{T_2} dT \propto R(T_0) \times T_0 \quad (4-4)$$

$T_0$  ; SH 波伝達関数の卓越周期 (地盤の卓越周期) (s)

$R(T_0)$  : SH 波伝達関数の最大振幅率

上式の右辺の最終項のみを取り出すと下式となり、2 章で提案した (2-3) 式が導き出せる。

$$P_E = T_0 \times R(T_0) \quad (4-5)$$

### (3) 検討モデル

本検討は、規則的に組み合わせた仮想モデル（2層構造、3層構造）と実際の地盤構造を反映した実地盤モデルを対象とした。

2層構造モデルは、層厚とS波速度を変化させて表4.1に示す16パターンを設定した。3層構造モデルは、1、2層の層厚の組合せ16パターン、S速度の組合せ13パターンを設定し、それぞれ表4.2に示す組合せ（例えば①-(1)の場合1層目の層厚5mでVsが100m/s、2層目の層厚5mでVsが150m/s）で合計208パターンを設定した。両モデルの工学的基盤のS波速度は、表層地盤の震動特性（卓越周期および増幅率）がやや明瞭に算定されるようにインピーダンス比を考慮して700m/sに設定した。また、表層地盤と工学的基盤の単位体積重量は全て1.7t/m<sup>3</sup>とし、地盤の減衰定数はそれぞれ5.0%、1.0%とした。地盤モデルのS波構造を図4.3(a)(b)を示す。

一方、実際の地盤は速度の逆転層の存在など複雑な地盤構造を示す。そこで、実地盤の表層地盤構造データを用いた実地盤モデルを設定した。実地盤モデルは、横浜市が設置した強震観測点42地点でのボーリング資料から作成した地盤モデルを用いた。図4.3(c)に実地盤モデルのS波速度構造を、図4.4にその分布を示す。図より、2層地盤および3層地盤モデルは、層厚とS波速度の組合せのためS波速度構造にはやや規則性が認められる。一方で、実地盤構造についてはさまざまな層厚とS波速度により、逆転層など不規則なS波速度構造をもつ地盤構造を示している。

表 4.1 2層地盤モデルの層厚と物性値

Vs \ L	L	5m	10m	20m	40m
	100m/s		①	②	③
150m/s		⑤	⑥	⑦	⑧
200m/s		⑨	⑩	⑪	⑫
250m/s		⑬	⑭	⑮	⑯

表 4.2 3層地盤モデルの層厚と物性値

layer thickness pattern					layer Vs pattern						
		2nd layer thickness(m)						2nd layer Vs(m/s)			
		5	10	15	20			150	200	250	300
1st layer thickness(m)	5	①	②	③	④	1st layer Vs(m/s)	100	(1)	(2)	(3)	(4)
	10	⑤	⑥	⑦	⑧		150	(5)	(6)	(7)	(8)
	15	⑨	⑩	⑪	⑫		200		(9)	(10)	(11)
	20	⑬	⑭	⑮	⑯		250			(12)	(13)

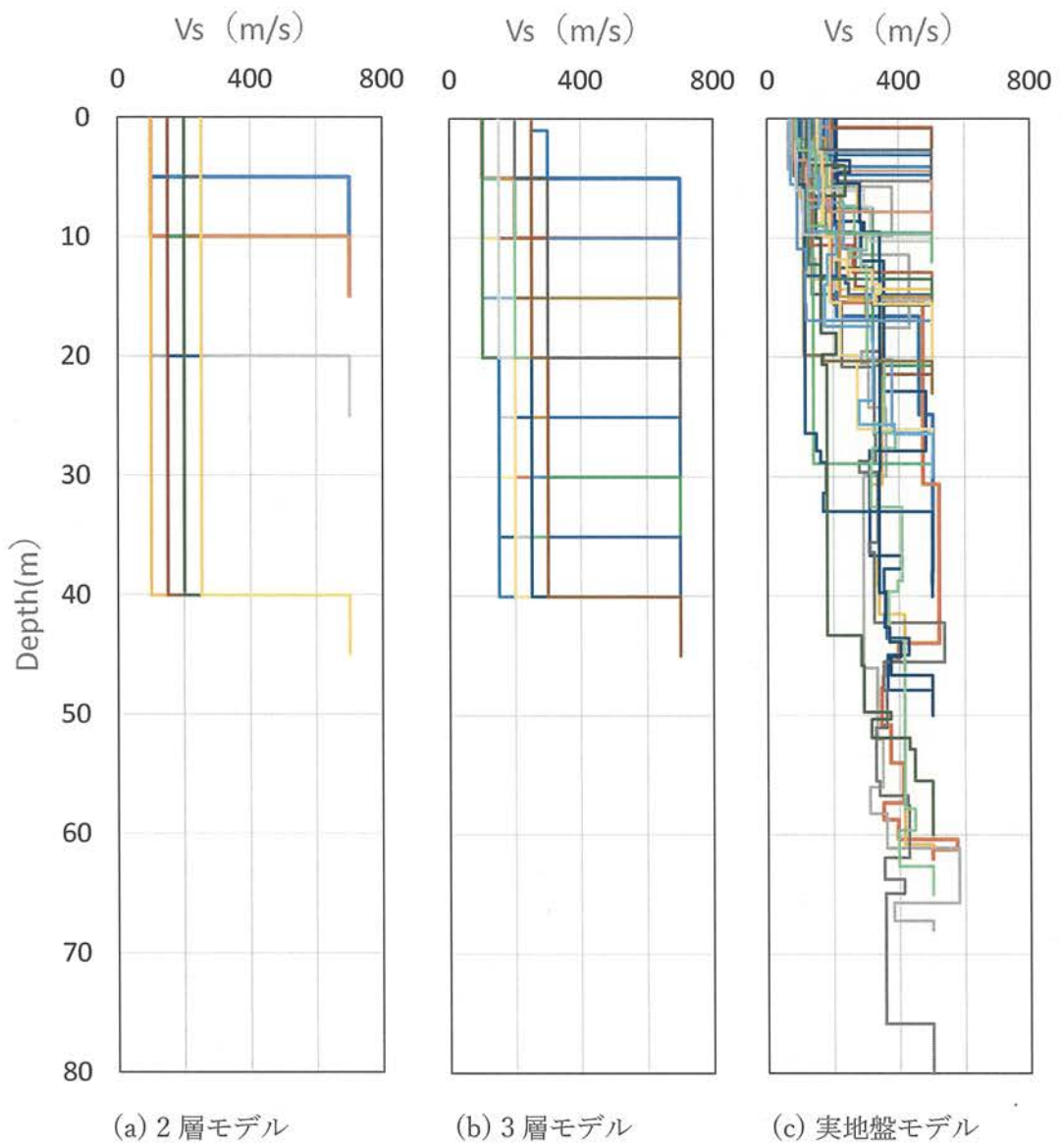


図 4.3 地盤モデルの S 波構造





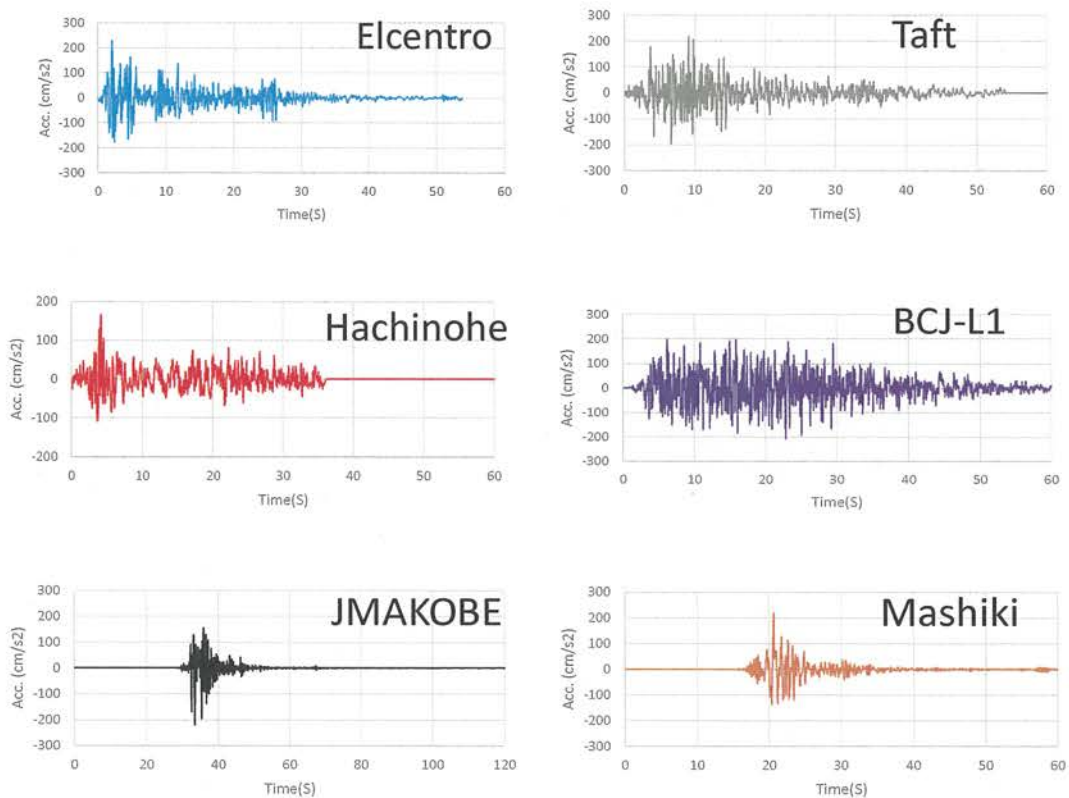


図 4.5 入力地震動の時刻歴波形

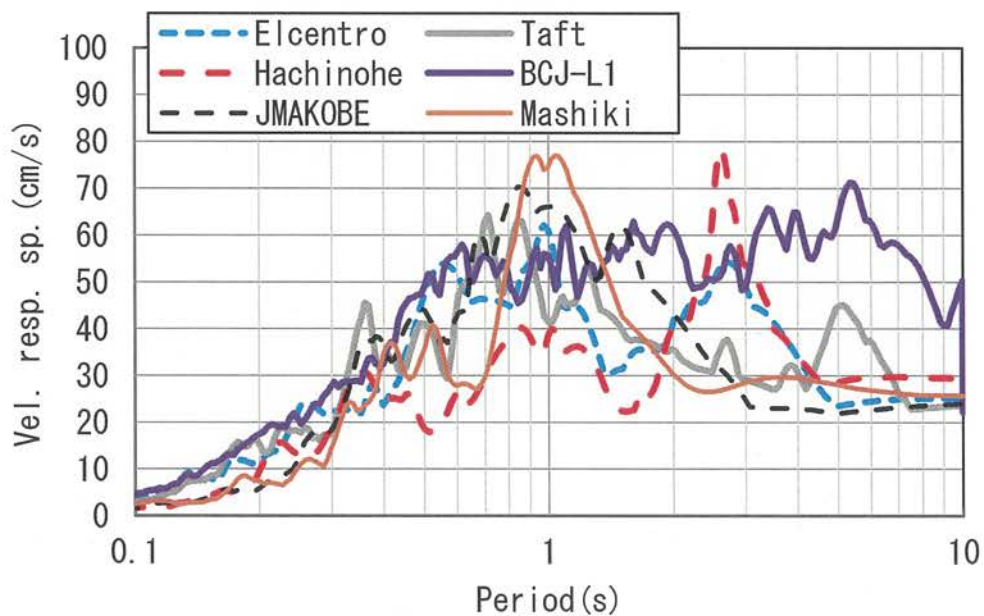


図 4.6 入力地震動の速度応答スペクトル

(5) SH 伝達関数による地盤ハザード値と SI 値の関係

ここでは検討内容の説明のため図 4.2 を再掲し図 4.7 に示す。図の緑矢印で示している数値解析から求める SH 波伝達関数による地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) とスペクトル強度 (SI 値) の関係を整理した。

2 層地盤の結果を図 4.8 に、3 層地盤の結果を図 4.9 に、実地盤の結果を図 4.10 にそれぞれ示す。実地盤ではやや地震動の違いなどによりややばらつきが大きいですが、全体には正の相関が確認できる。SH 波伝達関数による地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) が大きいと、地震動評価指標である SI 値が大きい。すなわち、 $P_{E-SH}$  が大きい地点ほど、建物の被害リスクが高いことが示唆される。

一方で、 $P_{E-SH}$  が 4 を超えた付近から全体に勾配が小さくなることも確認でき、地盤ハザード値が大きくなると適用限界があることが示唆される。

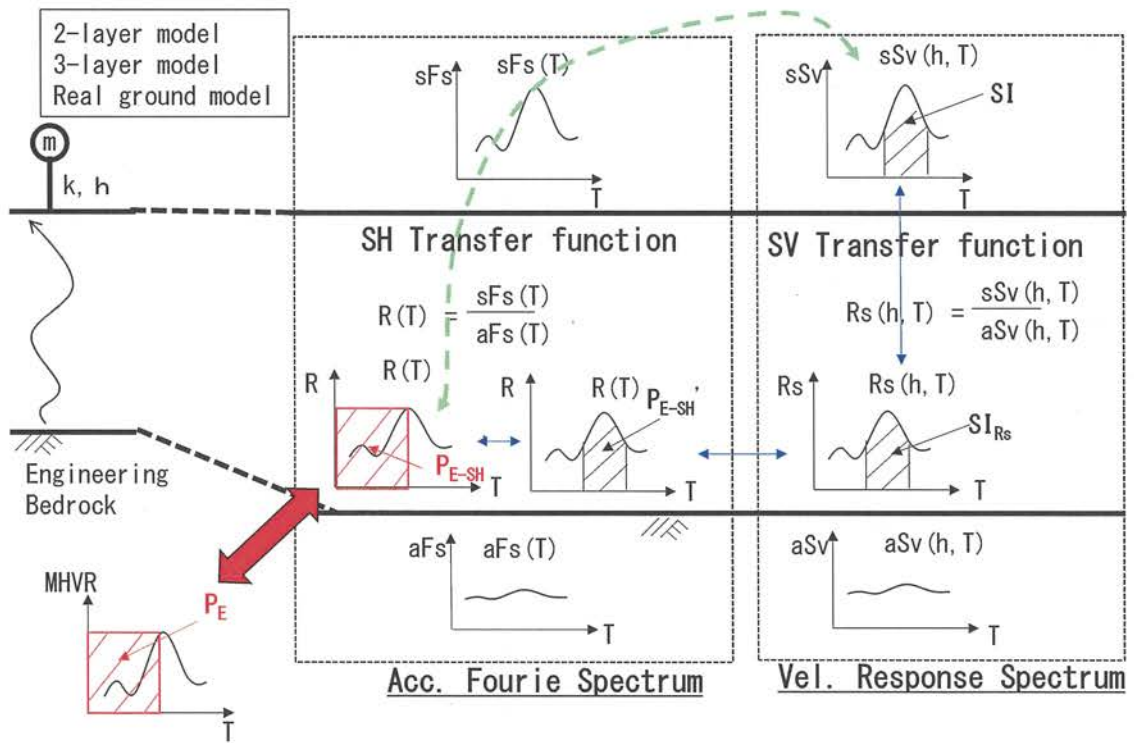


図 4.7 SH 波伝達関数による地盤ハザード値と SI 値の関係のイメージ

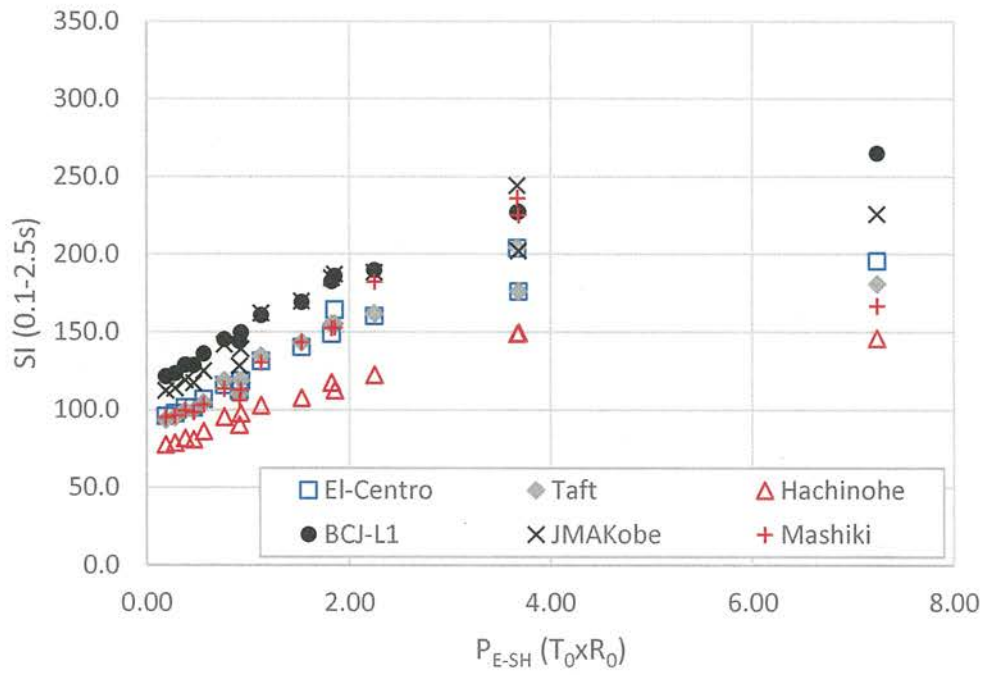


図 4.8 SH 波伝達関数による地盤ハザード値と SI 値の関係 (2 層地盤)

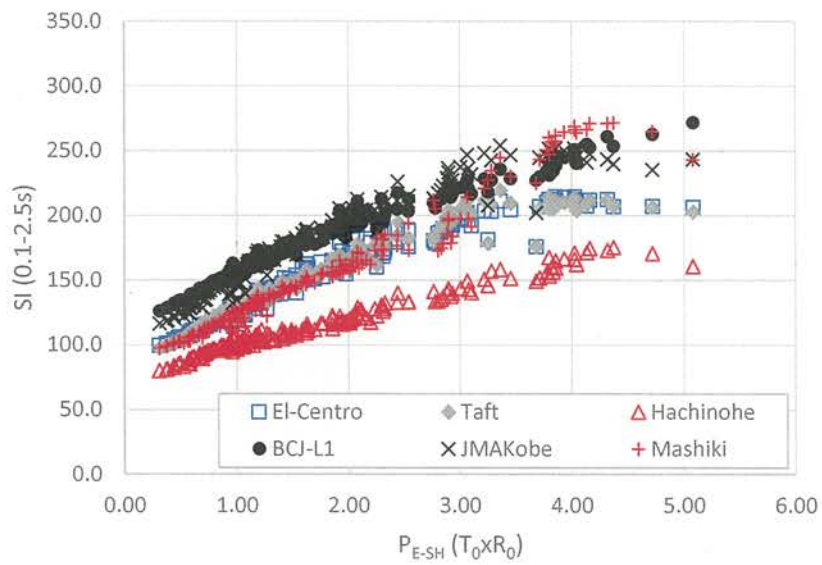


図 4.9 SH 波伝達関数による地盤ハザード値と SI 値の関係 (3 層地盤)

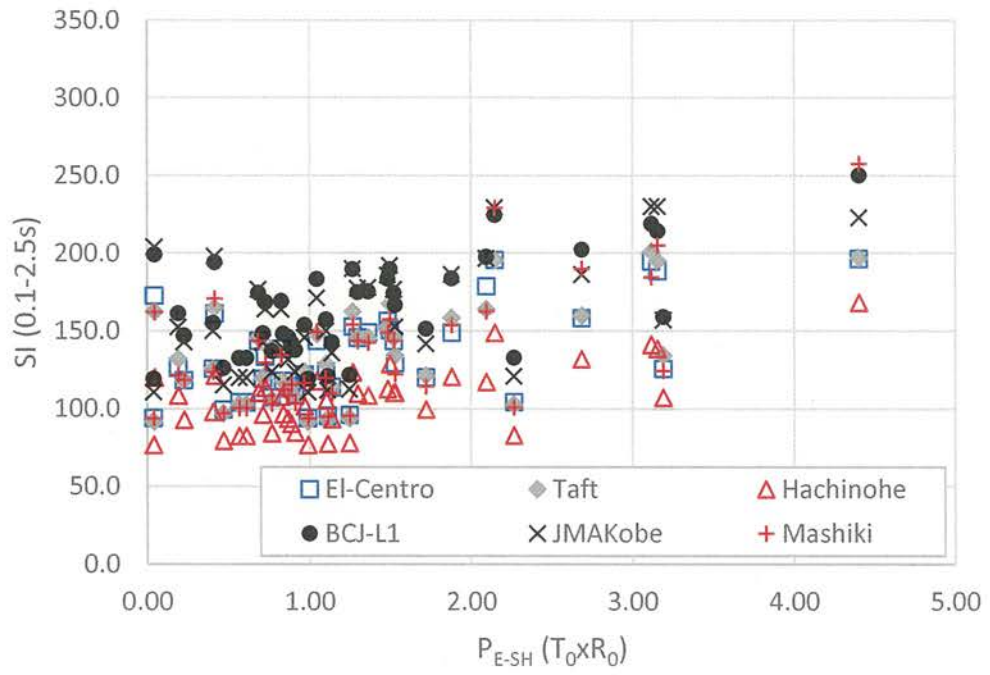


図 4.10 SH 波伝達関数による地盤ハザード値と SI 値の関係 (実地盤)

### 4.3 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の関係

#### (1) 微動観測地点

実地盤の検討地点である 42 地点で単点微動観測を実施し、単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の関係を確認する。「4.2 SH 波伝達関数と SI 値の関係」の図 4.2 を再掲し、図 4.11 に示す。本節では、図の赤矢印である SH 波伝達関数による地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) と微動による地盤ハザード値 ( $P_E$ ) の比較を行う。

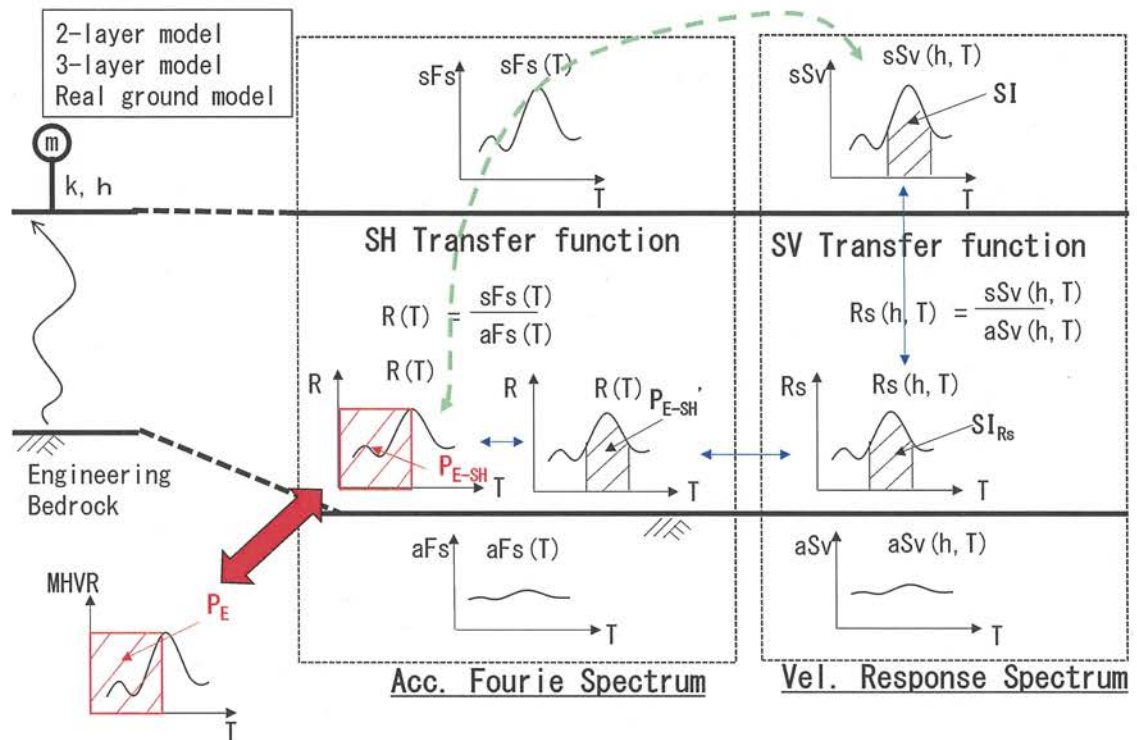


図 4.11 数値解析を用いた検討のイメージ

42 地点の観測地点を微地形区分と重ねて再掲する。また、観測地点の微地形区分の一覧を表 4.3 に示す。観測や解析手法は「2.2 新たな地盤ハザード評価手法の提案」に記載の通りである。

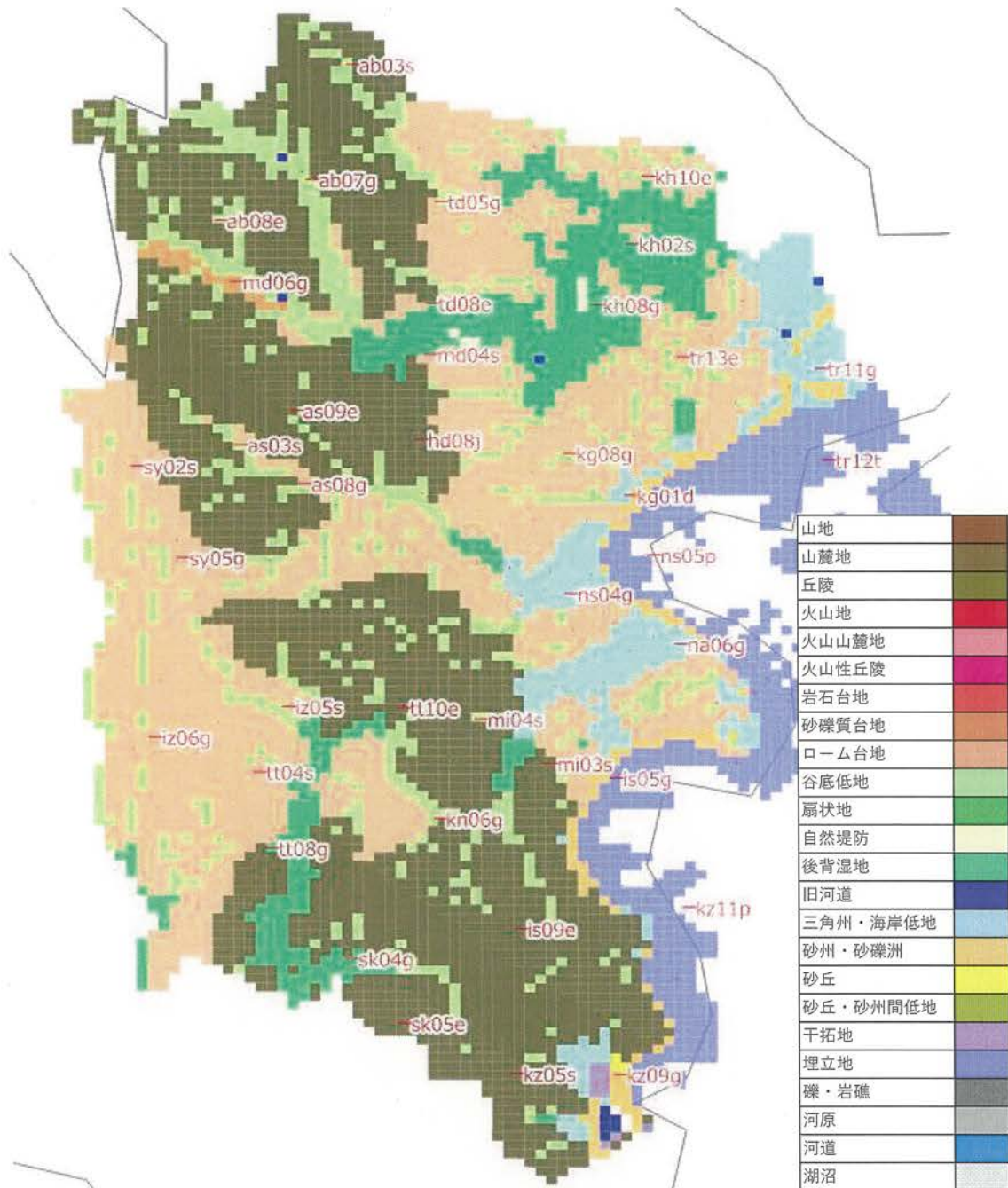


図 4.12 微動観測地点と微地形区分の分布

表 4.3 微動観測地点と微地形区分の一覧

地点名	微地形
mi03s	丘陵
hd08j	丘陵
as09e	丘陵
is09e	丘陵
kz05s	丘陵
td01d	丘陵
tt10e	丘陵
sk05e	丘陵
tr13e	口一ム台地
as08g	口一ム台地
kh10e	口一ム台地
td08e	口一ム台地
tt04s	口一ム台地
iz06g	口一ム台地
sy02s	口一ム台地
sy05g	口一ム台地
md06g	砂礫質台地

地点名	微地形
kg08g	谷底低地
mi04s	谷底低地
kn05s	谷底低地
kn06g	谷底低地
as03s	谷底低地
ab03s	谷底低地
ab07g	谷底低地
ab08e	谷底低地
iz05s	谷底低地
kh02s	後背湿地
kh08g	後背湿地
md04s	後背湿地
tt08g	後背湿地
sk04g	後背湿地
tr11g	三角洲・海岸低地
kg01d	三角洲・海岸低地
ns04g	三角洲・海岸低地
na01d	三角洲・海岸低地
na06g	三角洲・海岸低地
hd06g	三角洲・海岸低地
kz09g	砂州・砂礫洲
tr12t	埋立地
ns05p	埋立地
is05g	埋立地
kz11p	埋立地

(2) 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の地形毎の比較

単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを、微地形区分毎に以下より示す。

①丘陵地

丘陵地は、一般的に地盤が良い地形と区分され、地盤増幅も小さいことが想定される地盤である。丘陵地の単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを図 4.13、図 4.14 に示す。

地盤特性に整合し、全体に SH 波伝達関数の増幅特性は小さい。それと整合するように、微動の H/V スペクトル比のピークも不明確な地点が多い。よって、後述する他の地微地形区分と比較すると、相対的に両者の一致度は低い。kz05 や td01 の微動 H/V スペクトル比では、SH 波伝達関数と異なりやや長周期にピークが確認できる。これは、工学的基盤より深い地盤構造の影響が想定される。

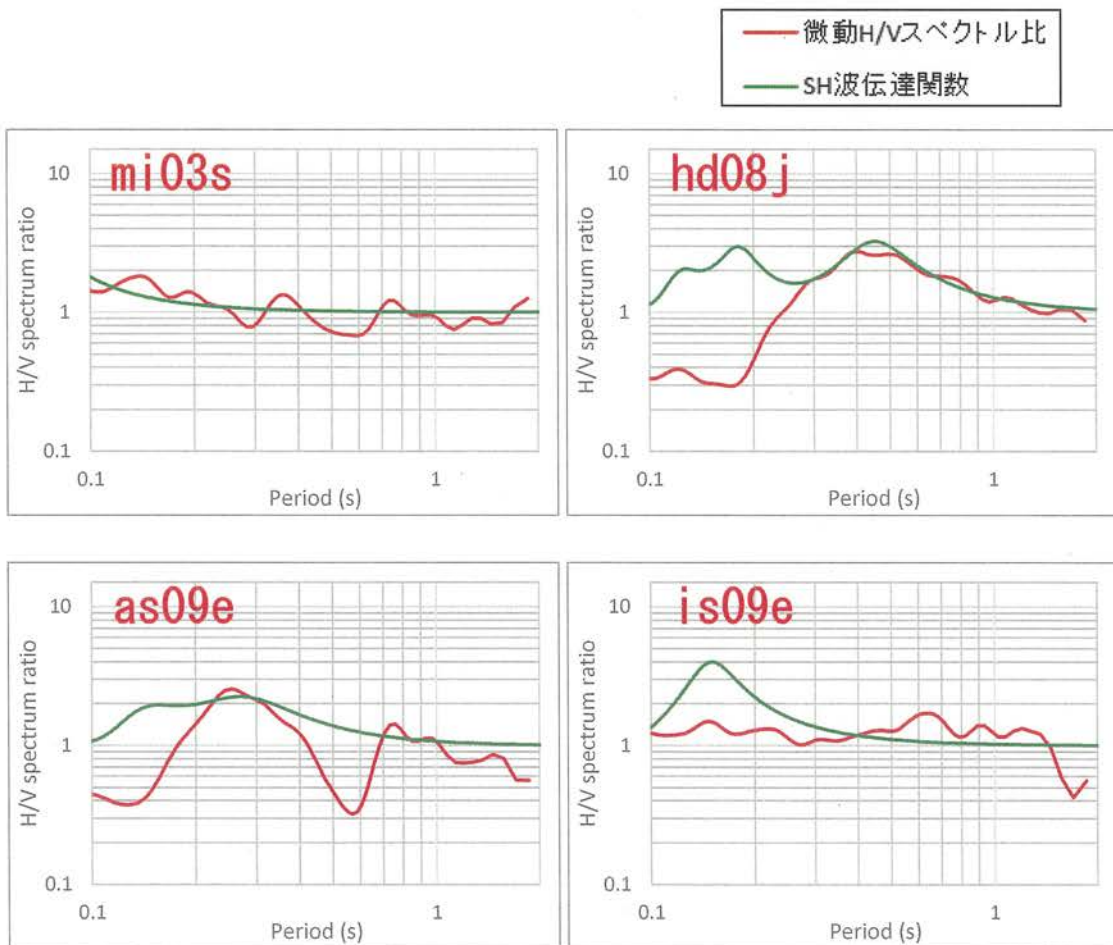


図 4.13 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 丘陵地 1



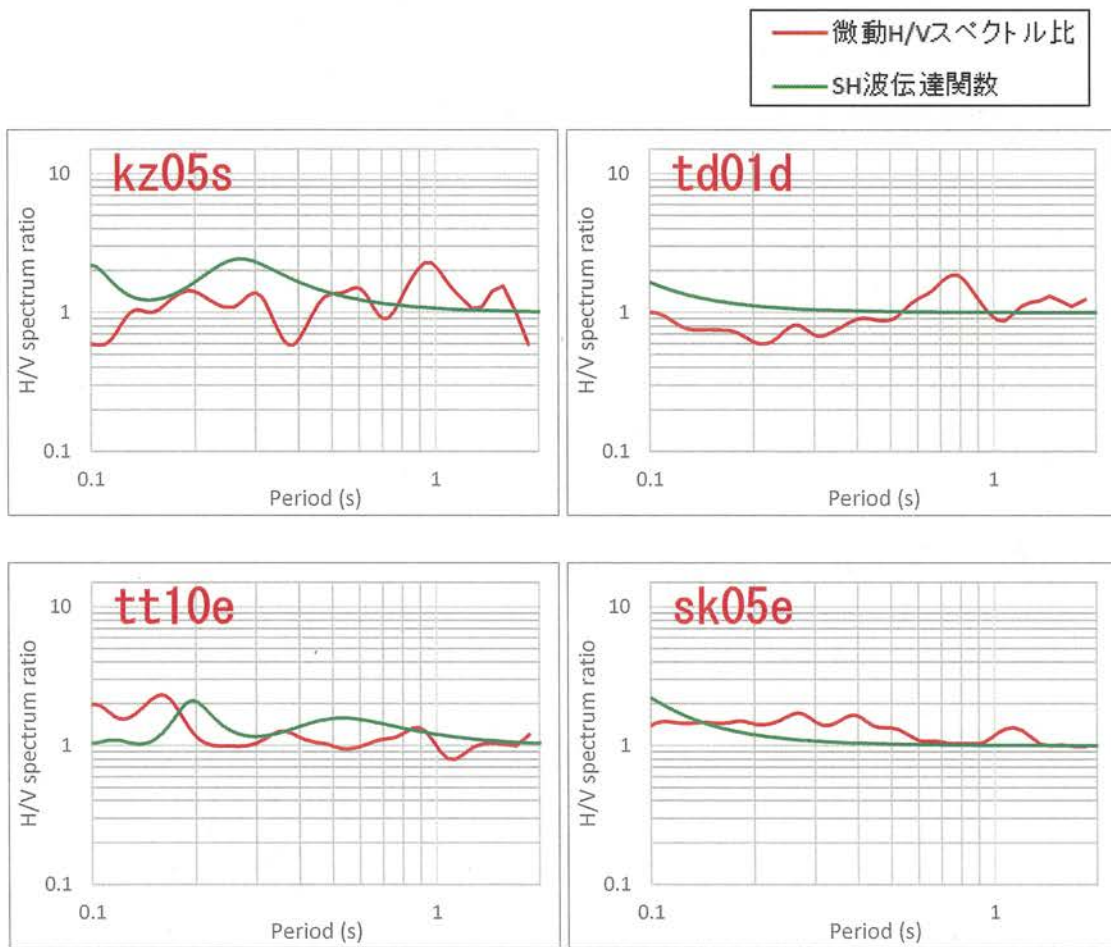


図 4.14 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 丘陵地 2

## ②ローム台地

ローム台地は、一般的には台地の上となり地盤構造はそれほど悪くないと認識されている。しかし、対象地域である横浜市内は、ロームの層厚が厚い部分もあり比較的地盤が揺れやすいとの既往研究もある。ローム台地の単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを図 4.15、図 4.16 に示す。

全体に、両者が一致する地点が多いが、td08 のように乖離が大きな地点も確認できる。

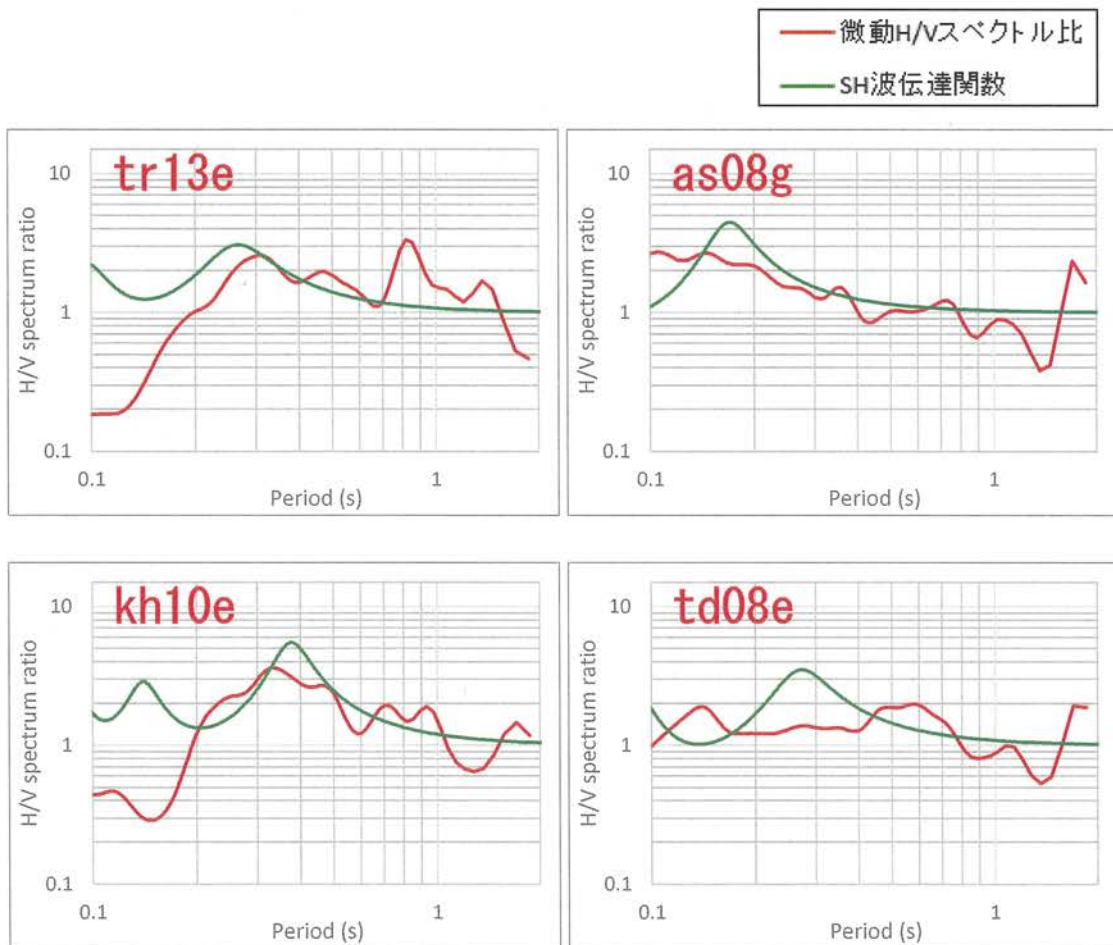


図 4.15 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 ローム台地 1

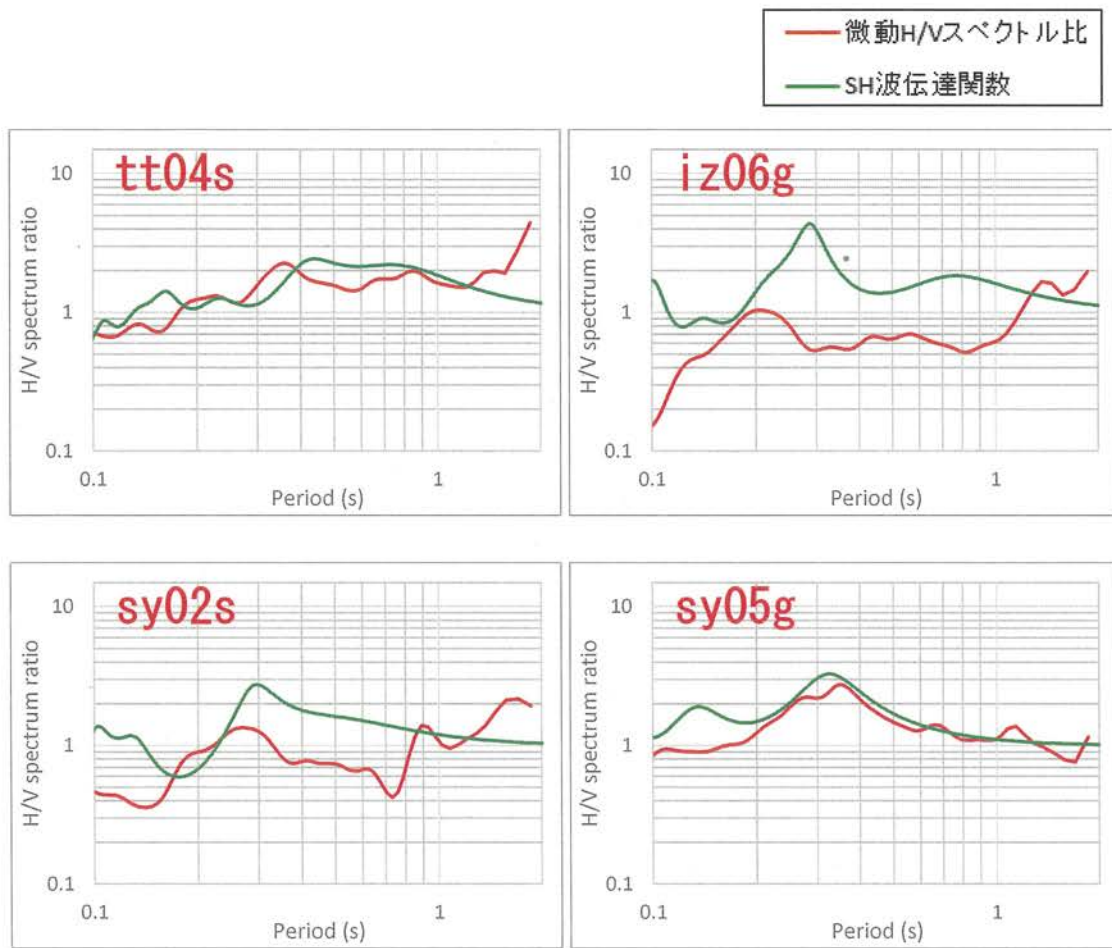


図 4.16 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 ローム台地 2

### ③砂礫質台地

砂礫質台地は、横浜では丘陵地の中に細長く分布している。全体には丘陵地や台地と同様に比較的良好な地盤に分類される。1地点だけであるが、単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを図 4.17 に示す。

ピーク周期にややずれはあるものの、全体にはよく整合している。

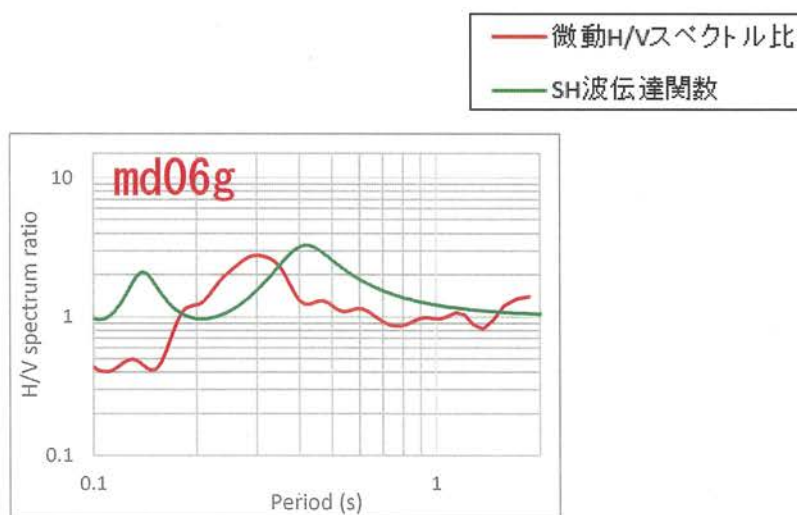


図 4.17 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 砂礫質台地

#### ④谷底低地

谷底低地は、ローム台地が河川によって開析され堆積物によって埋められた地形となり、一般的にあまり地盤が良くない。ローム内に樹枝状に分布し、開析の上流部付近や、谷の端部では堆積物が薄く、谷の中央や河口側では堆積物が厚い傾向がある。谷底低地の単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを図 4.18、図 4.19 に示す。

全体に、比較的明確にピークが表れている地点と、ほとんどピークが確認できない地点の 2 つに分けられる。この違いは、上記したとおり同じ谷底低地でも谷部のどこに位置するかによる特性の違いと整合的である。

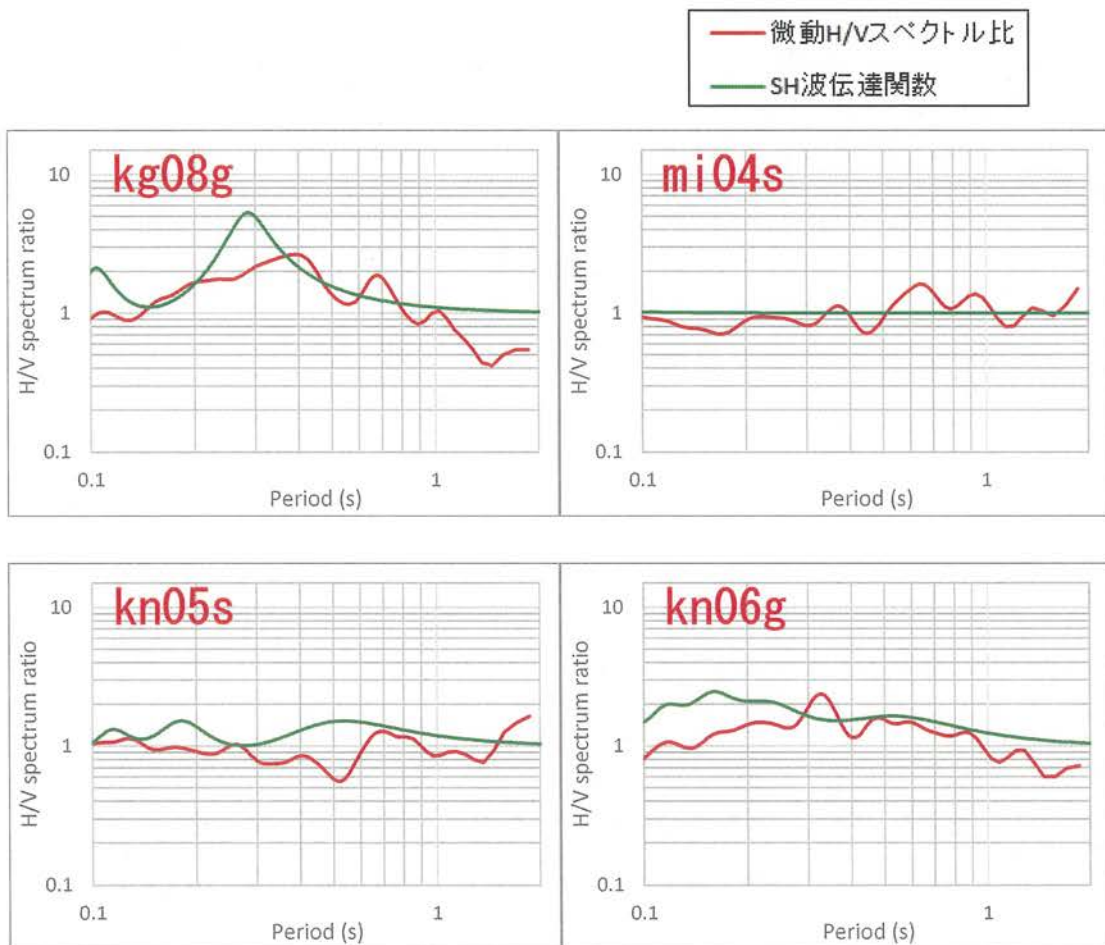


図 4.18 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 谷底低地 1

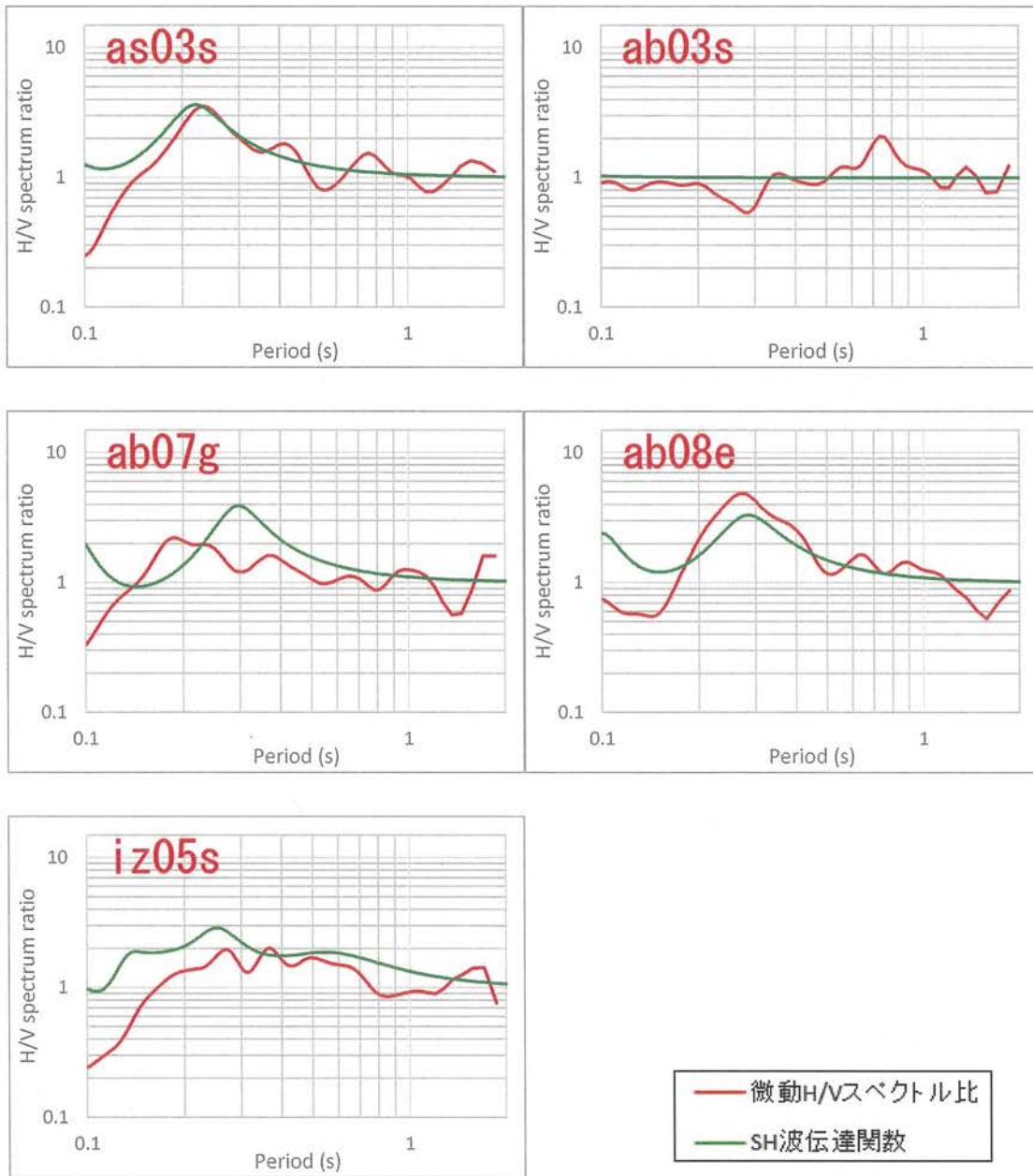


図 4.19 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 谷底低地 2

⑤後背湿地

後背湿地は、河川の氾濫による泥質な堆積物によって構成され、一般的に軟弱地盤に分類され地盤も悪い。後背湿地の単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを、図 4.20 に示す。

全体に両者は良く一致し、ピーク周期もやや長く増幅率も大きい傾向が確認できる。

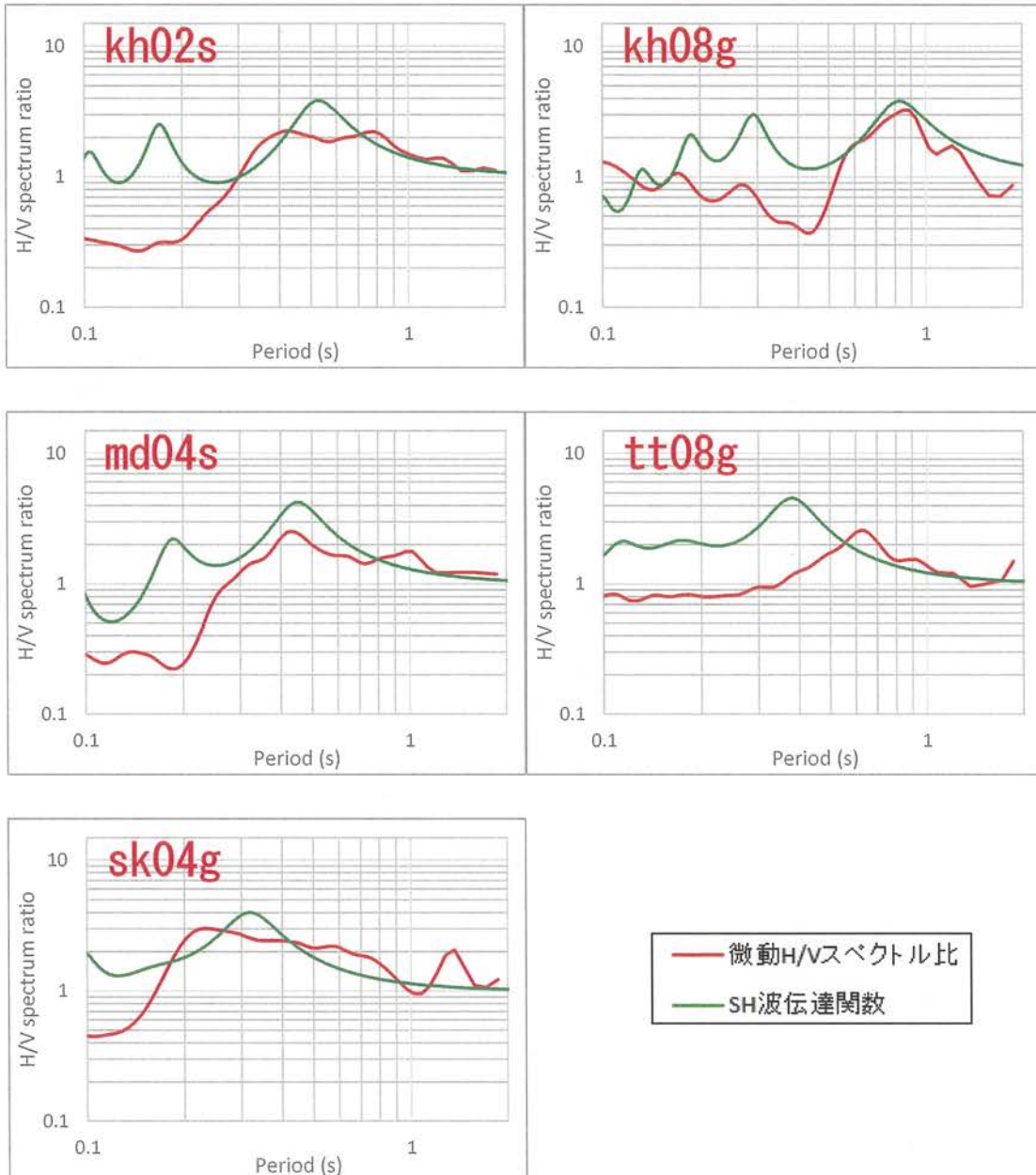


図 4.20 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 後背湿地

⑥三角州・海岸低地

三角州・海岸低地は、河川の河口付近に広がる砂主体の地盤である。一般に軟弱地盤に含まれるが、前述した泥質である後背湿地よりは地盤が良い。三角州・海岸低地の単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを、図 4.21、図 4.22 に示す。

両者を比較すると、ピークは地点によって短周期から長周期と幅広い範囲で確認できるが、両者はよく一致している。

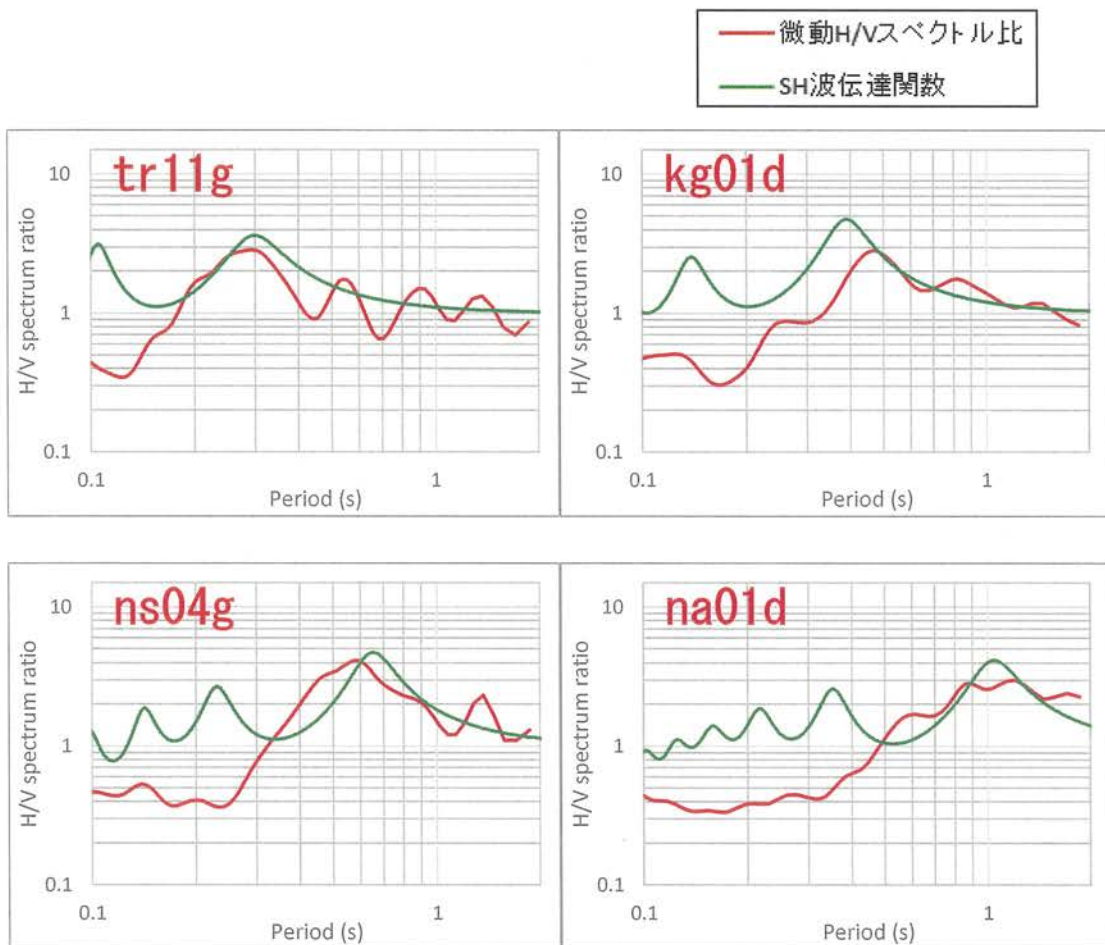


図 4.21 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 三角州・海岸低地 1



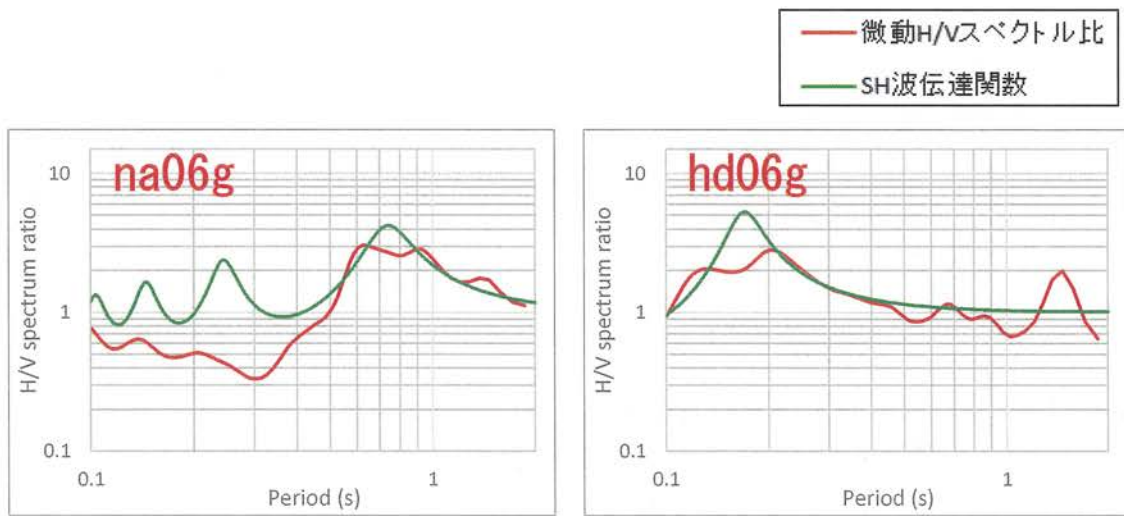


図 4.22 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 三角州・海岸低地 2

⑦砂州・砂礫洲

砂州・砂礫洲は、海岸沿いの潮流などの作用によってつくられる地形であり、堆積する砂層の厚さや締まり具合によってその特徴が異なる。横浜市内で広く分布するのは、金沢区の沿岸部に限られる。砂州・砂礫洲の単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを、図 4.23 に示す。

両者を比較すると、短周期ピークがあることは共通しているが、そのピークにややずれが確認できる。

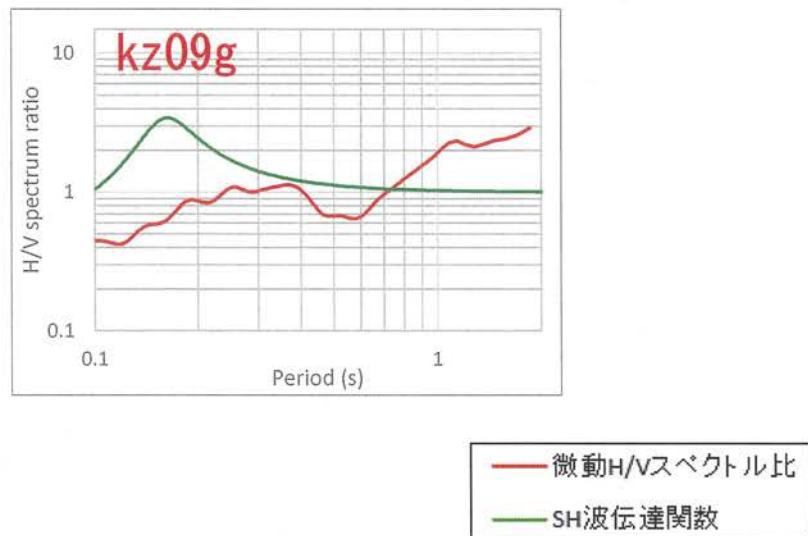


図 4.23 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 砂州・砂礫洲

### ⑧埋立地

埋立地は、人工的に埋め立てられた地盤であり、横浜市の沿岸部はほぼ全域が埋立地から構成されている。一般的に自然地盤と比べて、堆積してからの時代が圧倒的に短いため、軟弱地盤となることが多い。ただし、近年は地盤改良などの技術も進んでおり、一概に地盤は悪い場所とも言えず、判断が難しい地盤である。埋立地の単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の重ね合わせを、図 4.24 に示す。

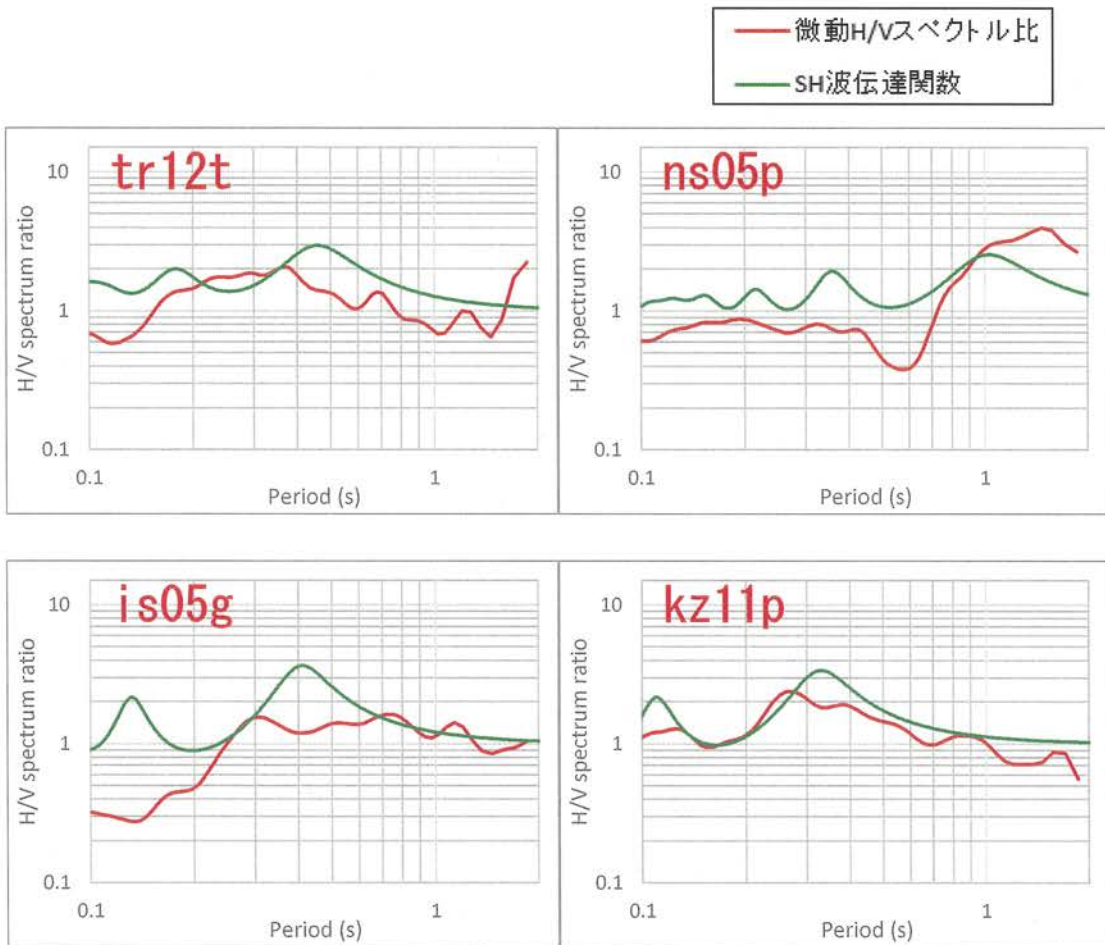


図 4.24 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数 埋立地

### (3) 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の卓越周期等の比較

前述した通り、単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数は、地盤特性によってややばらつきがみられるものの、ピーク周期などは整合している地点が多い。ここでは、卓越周期とそのピーク値、および本手法で提案している両者を乗じて求める地盤ハザード値の比較を行う。なお、比較は全 42 地点のものと、SH 波伝達関数の卓越周期が 0.1 秒以下で、ほとんど増幅が認められない 4 地点を除いた 38 地点の結果を併記する。卓越周期の比較を図 4.25 に、増幅率の比較を図 4.26 に、地盤ハザード値の比較を図 4.27 にそれぞれ示す。なお、この図 4.27 は、「4.2 SH 波伝達関数と SI 値の関係」の図 4.2 の赤矢印の比較となる。

卓越周期の関係では、微動による卓越周期がやや小さい地点が確認されるが、その他の地点は  $Y=X$  の直線上であり全体に整合が良い。38 地点の結果の方がより整合性が高くなるが、まだ一部で微動の卓越周期が小さい地点が確認できる。

増幅率の関係では、卓越周期に比べるとばらつきが大きい。全体に、プロットは  $Y=X$  の上側に分布し、微動による卓越周期より SH 波伝達関数の増幅特性の方が大きい。

地盤ハザード値の関係では、卓越周期の関係に比較的近く、概ね線形回帰の関係となる。SH 波伝達関数による地盤ハザード値を  $P_{E-SH}$ 、単点微動 H/V スペクトル比による地盤ハザード値を  $P_E$  とすると、両者は下式の関係となる。

$$P_{E-SH} = \alpha \times P_E \quad (4-6)$$

今回の検討では  $\alpha = 0.9$  程度となるが、今後さらに地点を増やし検討を進める必要がある。また、地盤ハザード値が大きくなると両者の乖離が大きくなることも確認でき、このことは前節で述べた通り SI 値から地盤ハザード値を求める際にも確認されており、地盤ハザード値の適用限界についても検討を進める必要がある。

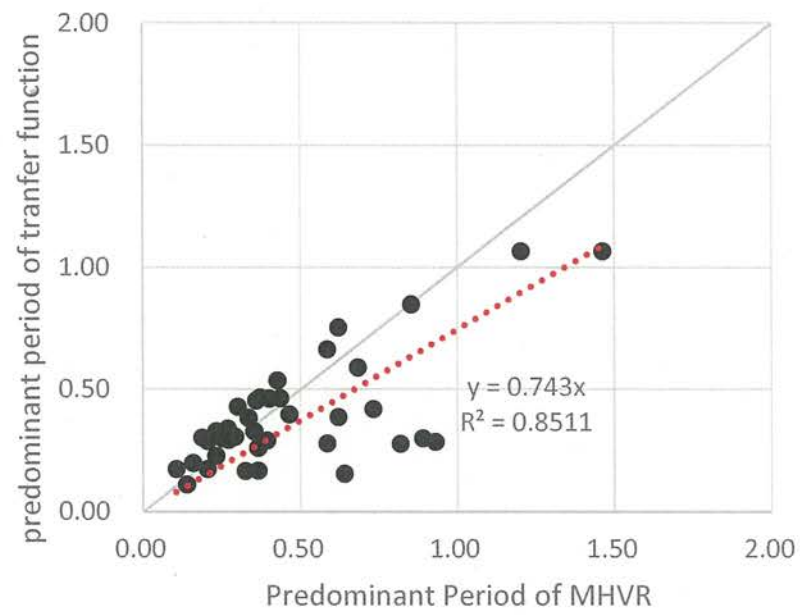
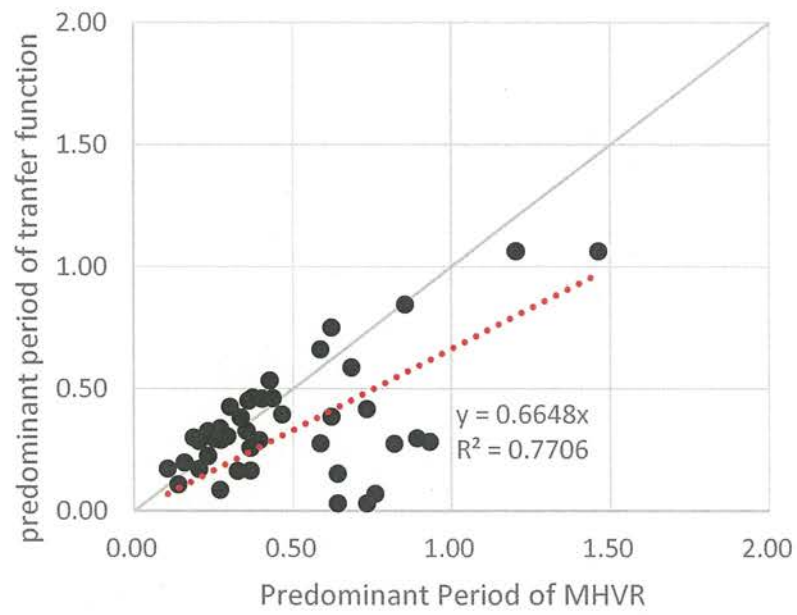


図 4.25 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の卓越周期の比較  
(上段：全 42 地点、下段：38 地点)

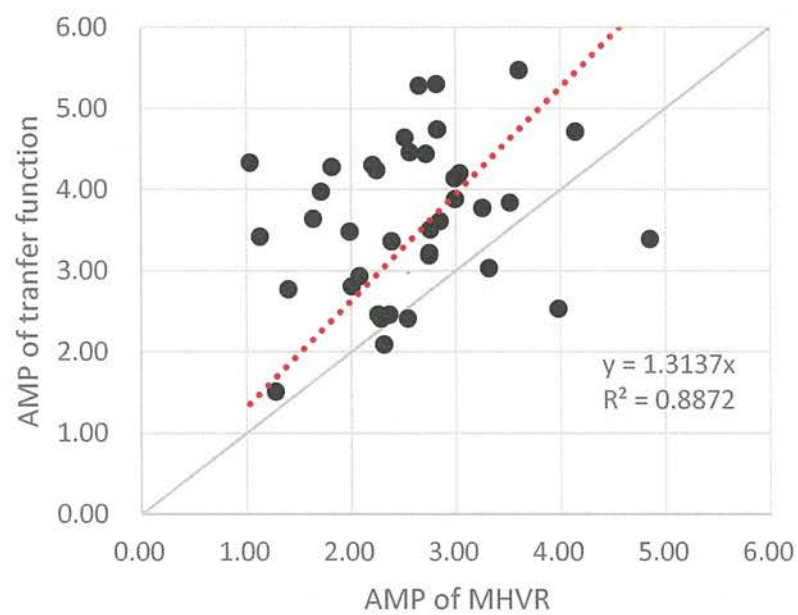
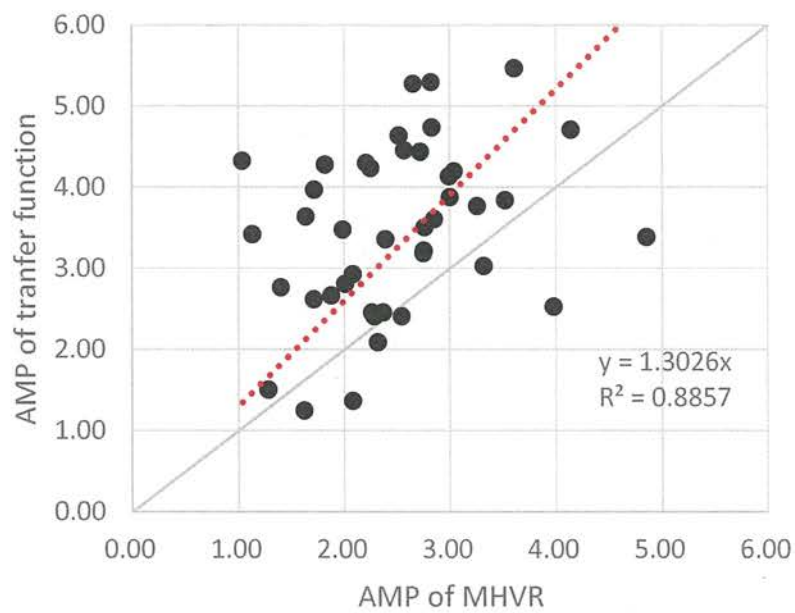


図 4.26 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の増幅率の比較  
(上段：全 42 地点、下段：38 地点)

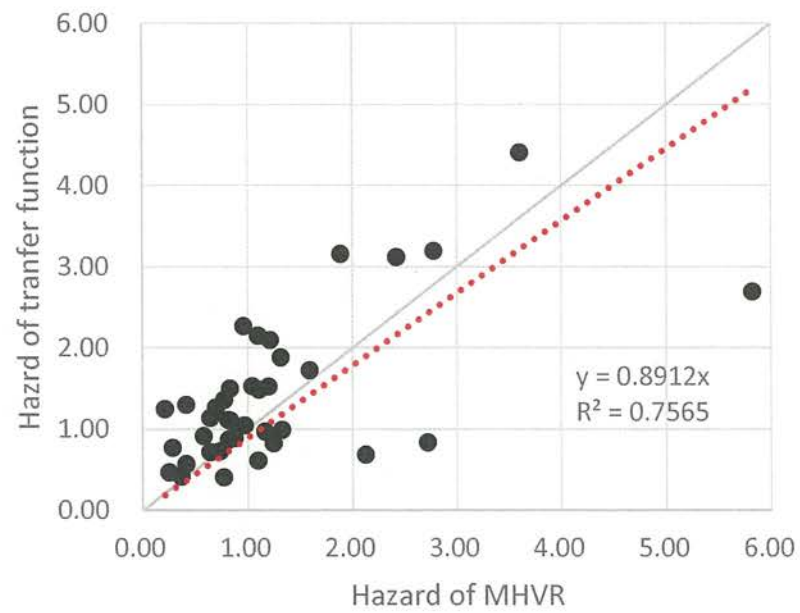
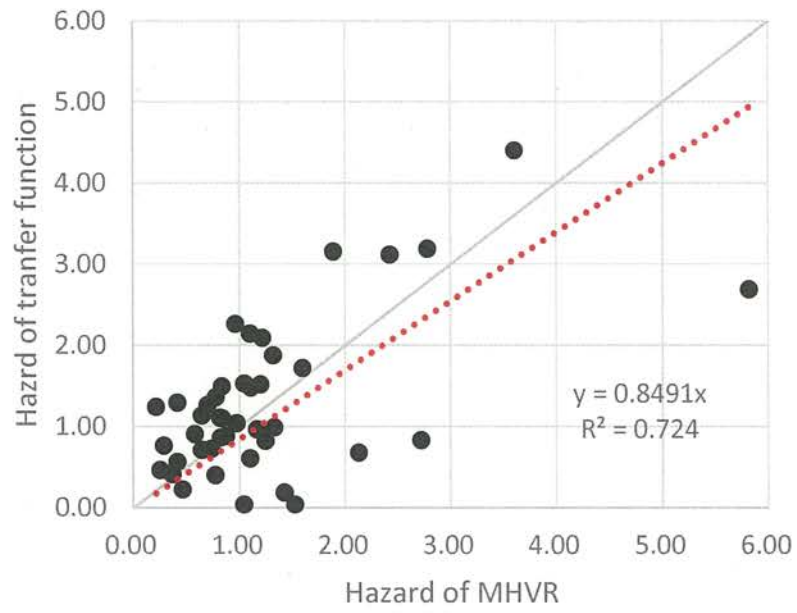


図 4.27 微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の地盤ハザード値の比較  
(上段：全 42 地点、下段：38 地点)

#### 4.4 SH 波伝達関数による地盤ハザード値関係

##### (1) SH 波伝達関数と SI 値の関係の補足検討

4.2 節では、数値解析による SH 波伝達関数と SI 値の関係を整理している。ここではその補足検討として、(2) で SH 波伝達関数による地盤ハザード値と積分値の比較、(3) で SI 値と速度応答スペクトル増幅率の比較、(3) で SH 波伝達関数と速度応答スペクトル増幅率の比較を示す。それぞれの確認箇所を図 4.28 に示す。

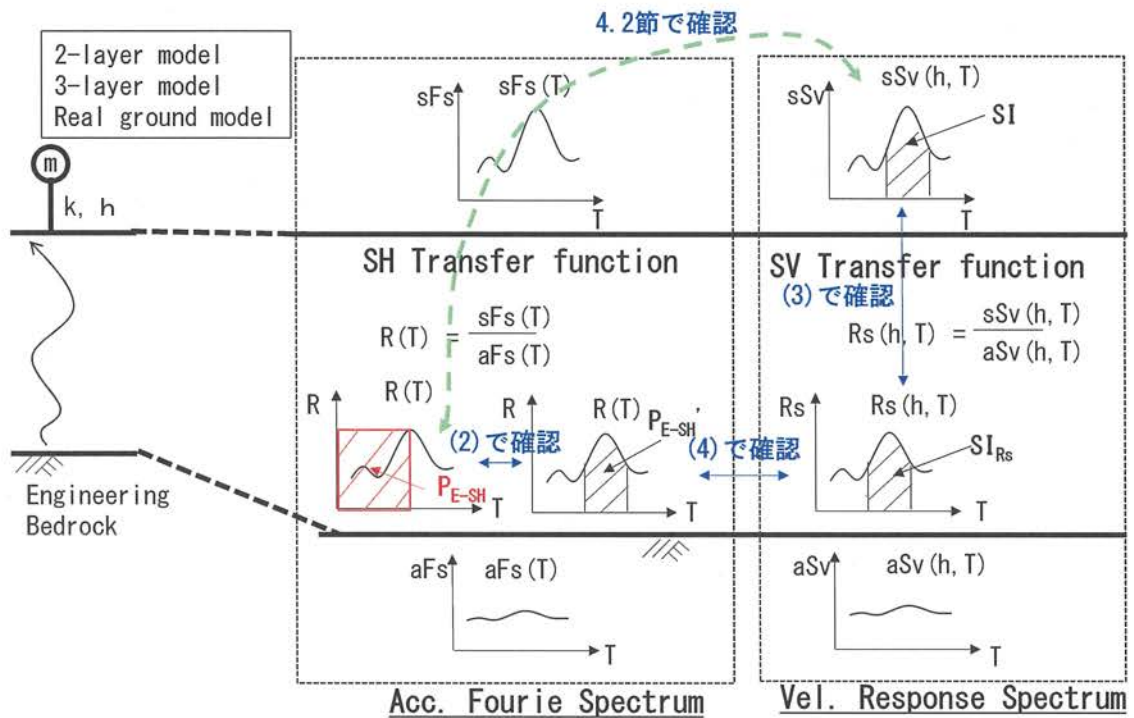


図 4.28 4.2 節の補足検討の説明 (図の青文字)

##### (2) SH 波伝達関数による地盤ハザード値 (最大値同士の乗数) と積分値の関係

地盤ハザード値は、簡便に算出することを目的に、縦軸と横軸の最大値同士を乗ずることで算出している。一方で、SI 値などエネルギーの釣り合いの考え方では積分値とした方がより正確な値となる。ここでは、(4) の補足検討として、SI 値算出と同様な区間で求める SH 波伝達関数の積分値 ( $P_{E-SH}'$ ) と、SH 波伝達関数の卓越周期と増幅率を乗じて求めた仮の地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) の関係性を確認する。

2 層地盤の結果を図 4.29 に、3 層地盤の結果を図 4.30 に、実地盤の結果を図 4.31 にそれぞれ示す。いずれのケースも正の相関が確認でき、ばらつきも小さい。すなわち、細かく積分値として算出する  $P_{E-SH}'$  は、最大値の乗数として求めた  $P_{E-SH}$  に置き換えらえると考えられる。



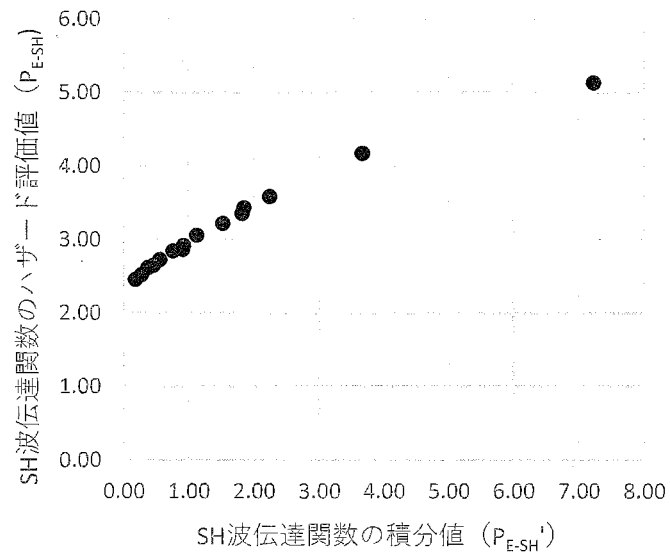


図 4.29 SH 波伝達関数の積分値と SH 波伝達関数の地盤ハザード値の関係 (2 層地盤)

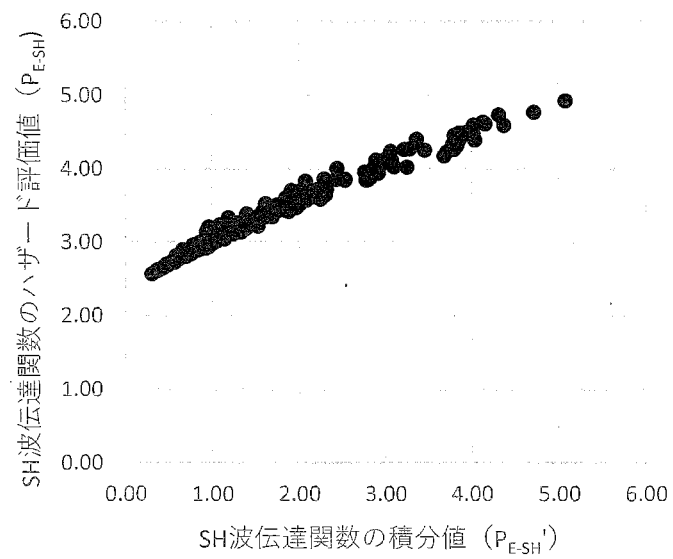


図 4.30 SH 波伝達関数の積分値と SH 波伝達関数の地盤ハザード値の関係 (3 層地盤)

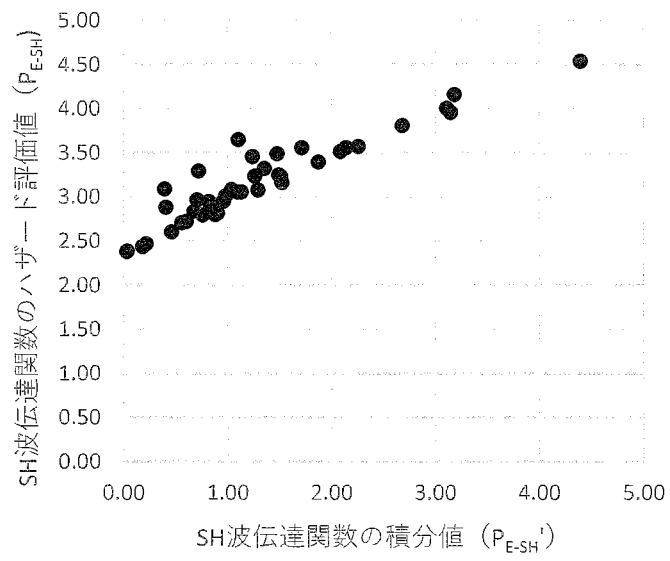


図 4.31 SH 波伝達関数の積分値と SH 波伝達関数の地盤ハザード値の関係 (実地盤)

### (3) SI 値と速度応答スペクトル増幅率の積分値の関係

SI 値は地表面の速度応答スペクトルの積分値として定義されている。一方で、実設計では工学的基盤でのスペクトルが定義されている例も多く、近年は応答スペクトル増幅率の重要性も議論されている。また、本節では、最終的にフーリエスペクトルの増幅率である SH 波伝達関数と SI 値の関係性を論じている。よって、ここでは予備検討の一つとして、地表面の速度応答スペクトルの積分値から得られる SI 値と、速度応答スペクトル伝達関数の積分値 ( $SI_{Rs}$ ) の関係を確認した。

2 層地盤の結果を図 4.32 に、3 層地盤の結果を図 4.33 に、実地盤の結果を図 4.34 にそれぞれ示す。2 層地盤と 3 層地盤は、地震動によらず正の相関が確認でき、そのばらつきも小さい。一方で、実地盤は全体には右肩上がりの正の相関が確認できるものの、他の地盤モデルと比べるとばらつきが大きい。相関が良いケース例の地表面の速度応答スペクトルと速度応答スペクトル増幅率を図 4.35～図 4.37 に、悪いケースの例を図 4.38～図 4.40 にそれぞれ示す。相関が良いケースは、両スペクトルの卓越周期が一致し、スペクトル形状も比較的単純である。一方で相関が悪いケースは、両者のピークのずれや、複数のピークが確認されるなど複雑な地盤特性を有する。ただ、いずれにせよ大局的には正の相関が確認でき、SI 値が大きいと、応答スペクトル増幅率による  $SI_{Rs}$  も大きくなる傾向は確認された。

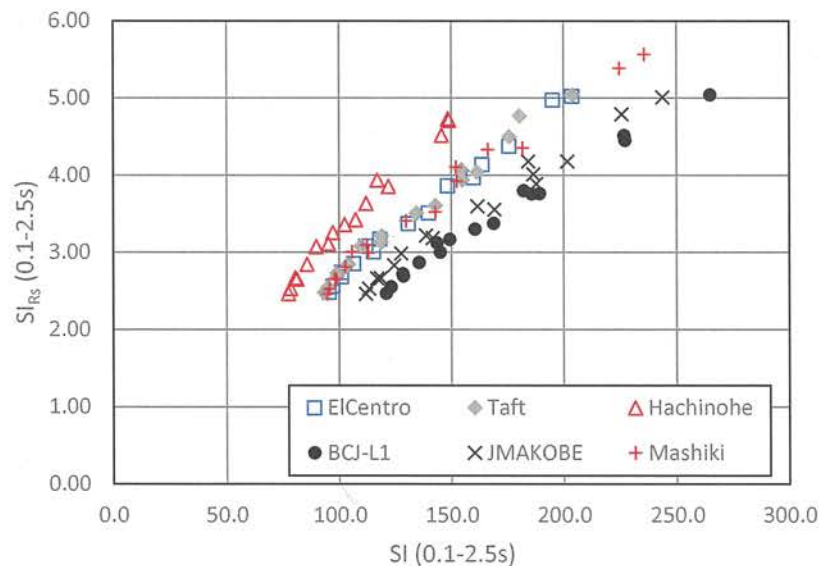


図 4.32 SI 値と速度応答スペクトル増幅率から求めた  $SI_{Rs}$  値の関係 (2 層地盤)

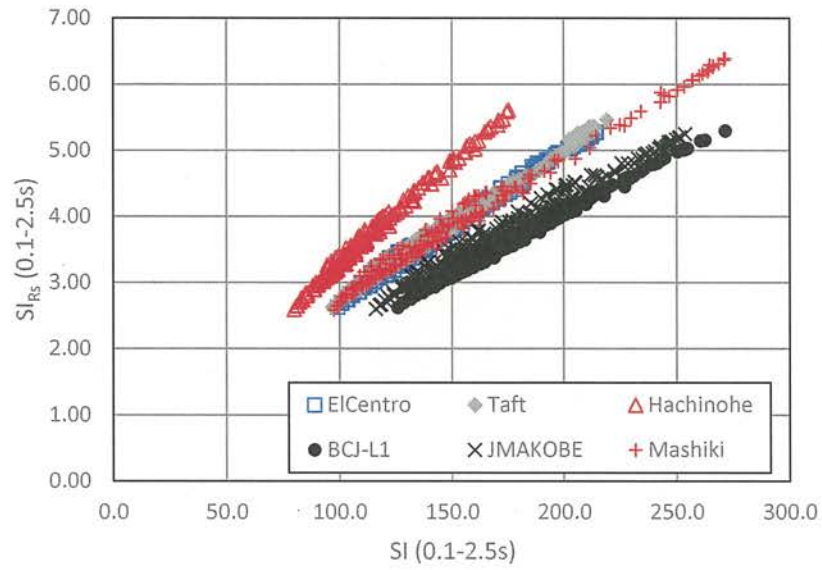


図 4.33 SI 値と速度応答スペクトル増幅率から求めた  $SI_{R_s}$  値の関係 (3 層地盤)

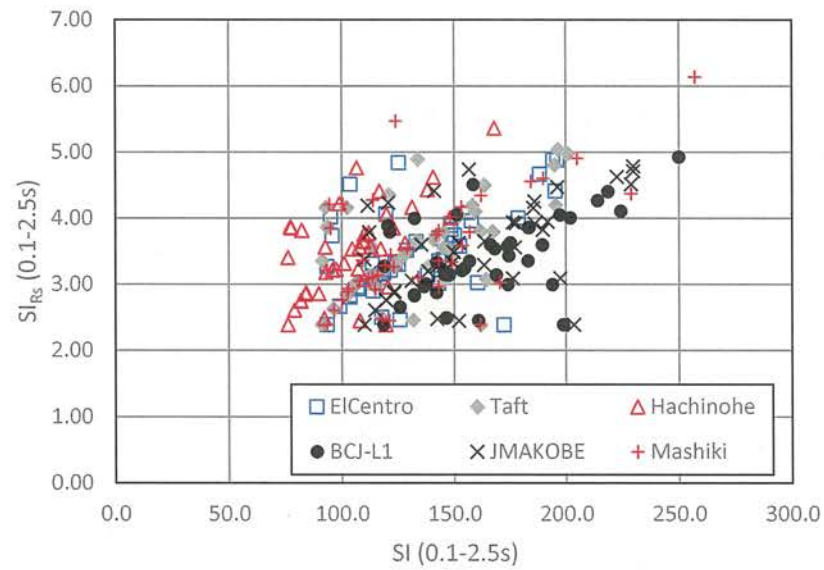


図 4.34 SI 値と速度応答スペクトル増幅率から求めた  $SI_{R_s}$  値の関係 (実地盤)

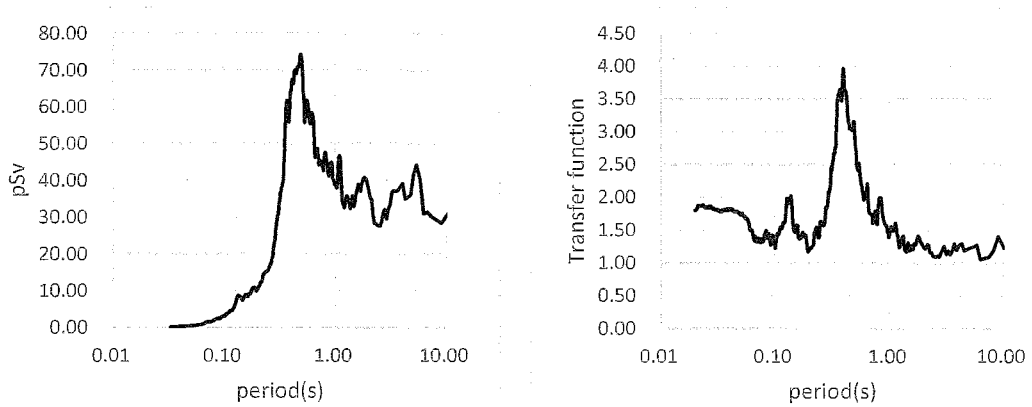


図 4.35 地表面の速度応答スペクトルと応答スペクトル増幅率の比較例 1  
 相関が良い例 (2層地盤②\_BCJ-L1)

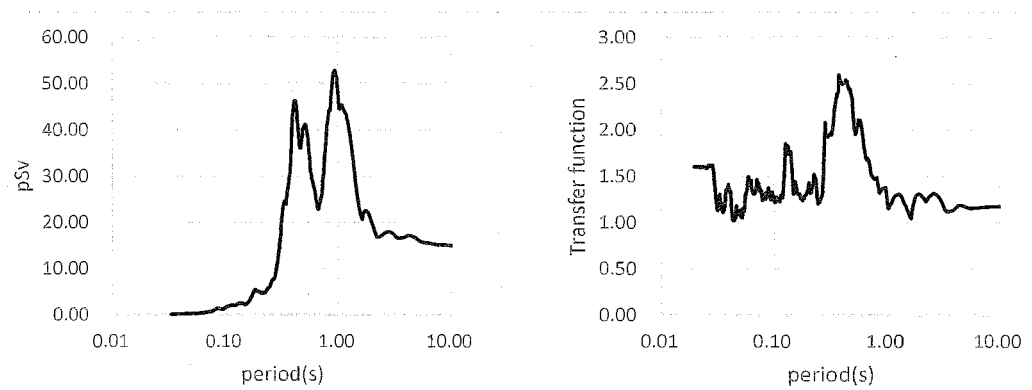


図 4.36 地表面の速度応答スペクトルと応答スペクトル増幅率の比較例 2  
 相関が良い例 (2層地盤①\_Mashiki)

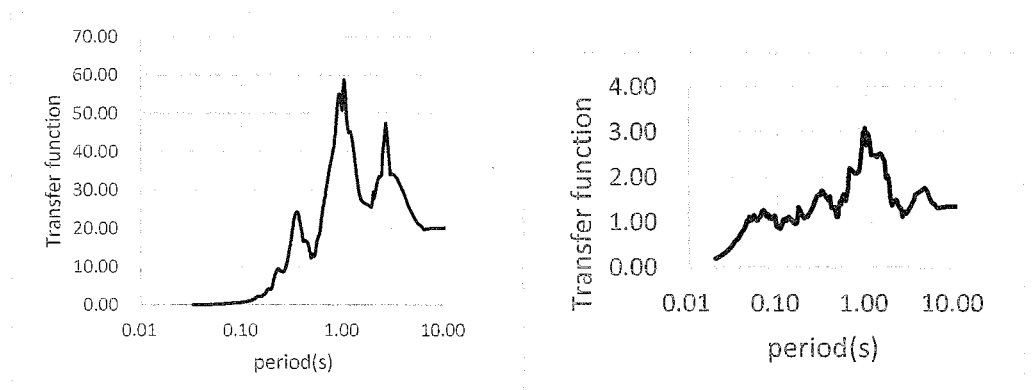


図 4.37 地表面の速度応答スペクトルと応答スペクトル増幅率の比較例 3  
 相関が良い例 (3層地盤⑫(5)\_Hachinohe)

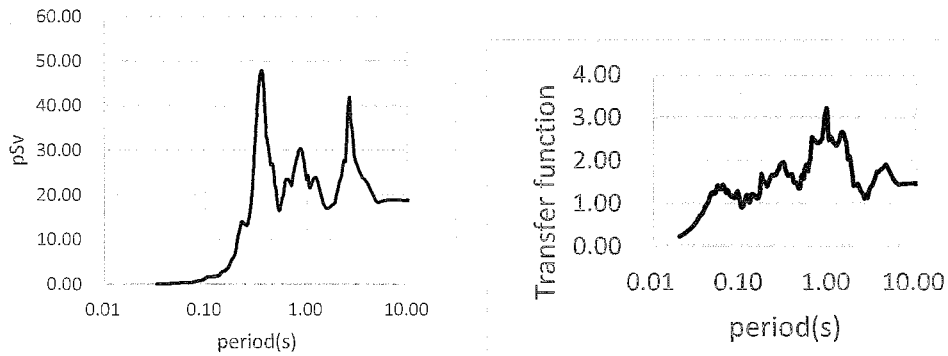


図 4.38 地表面の速度応答スペクトルと応答スペクトル増幅率の比較例 4  
 相関が悪い例 (実地盤 kh08g\_Hachinohe)

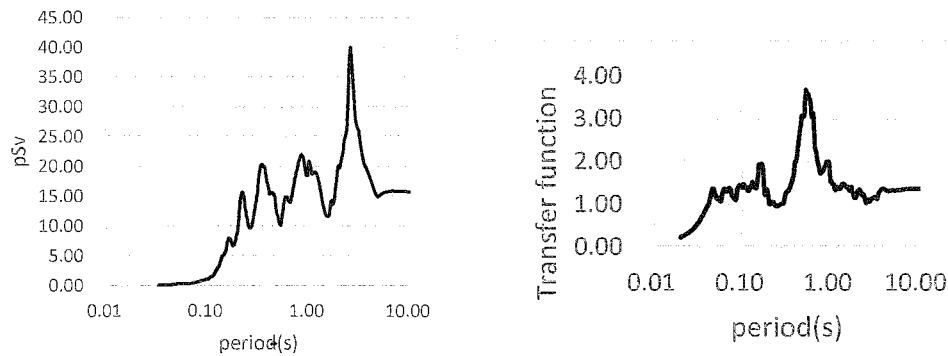


図 4.39 地表面の速度応答スペクトルと応答スペクトル増幅率の比較例 5  
 相関が悪い例 (実地盤 kh02s\_Hachinohe)

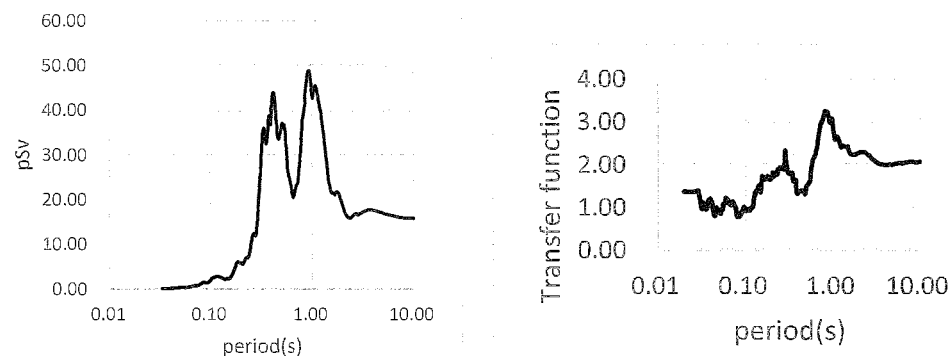


図 4.40 地表面の速度応答スペクトルと応答スペクトル増幅率の比較例 6  
 相関が悪い例 (実地盤 kh08g\_Mashiki)

(4) SH 波伝達関数積分値と速度応答スペクトル増幅率積分値の関係

SH 波伝達関数の卓越周期や増幅率は、一般に地盤の増幅特性を示し指標として用いられるため、その積分値である  $P_{E-SH}$  も安定した地盤特性を示す指標と考えられる。一方で、速度応答スペクトル増幅率は、地震動によって変化するため、その積分値とした  $SI_{Rs}$  の特性を把握しておく必要があると考え、両者の関係を確認した。

2層地盤の結果を図 4.41 に、3層地盤の結果を図 4.42 に、実地盤の結果を図 4.43 にそれぞれ示す。

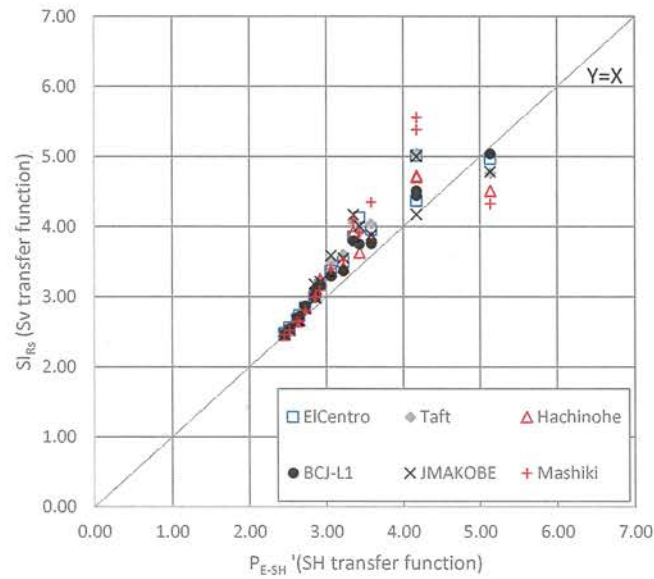


図 4.41 SH 伝達関数の積分値と速度応答スペクトル増幅率の積分値の関係 (2層地盤)

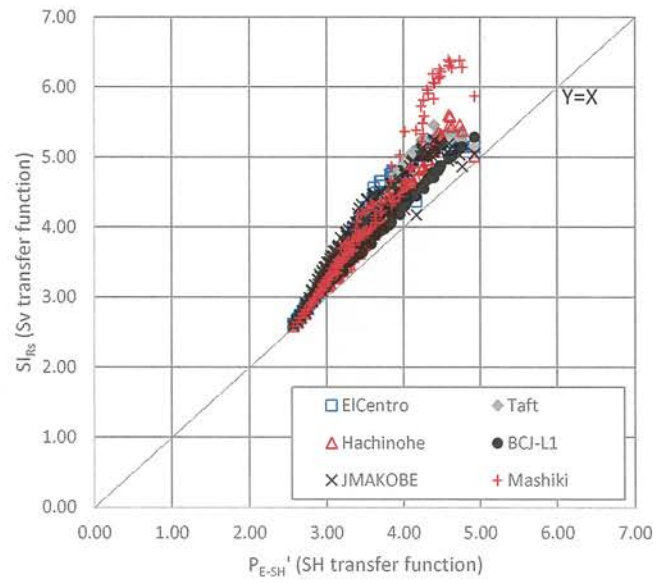


図 4.42 SH 伝達関数の積分値と速度応答スペクトル増幅率の積分値の関係 (3 層地盤)

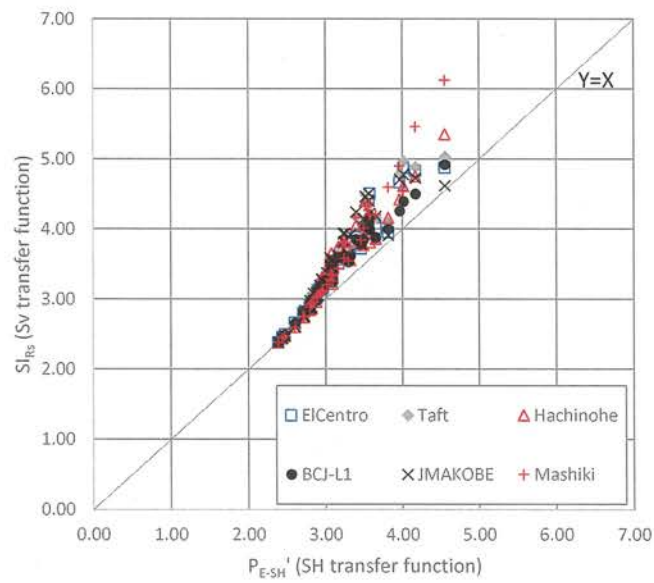


図 4.43 SH 伝達関数の積分値と速度応答スペクトル増幅率の積分値の関係 (実地盤)



#### 4.5 まとめ

本章では、主に数値解析を用いて以下の 2 点の検討を行った。SH 波伝達関数と SI 値や単点微動 H/V スペクトル比の関係を検討した。結果を以下にまとめる。

- SH 波伝達関数から求める地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) と速度応答スペクトルから求める SI 値の比較を行った。両者は地盤モデルや入力地震動によらず、概ね正の相関関係が確認できた。
- 微度 H/V から求めた地盤ハザード値 ( $P_E$ ) と  $P_{E-SH}$  の関係でも、ややばらつきはあるものの両者に正の相関が確認できた。
- SI 値は木造建物などの地震被害と相関が確認されている。ここから、単点微動から求めた  $P_E$  によって、簡易的に木造建物などの地震被害リスク評価をおこなえる可能性が示唆された。

# 第 5 章

## 第5章 強震記録との比較と横浜市全域の地盤ハザード評価

### 5.1 はじめに

ここでは、微動観測から得られた H/V スペクトル比と、実際の地震記録を比較することで微動の適用性について検討を行った。また、横浜市全域で実施済みの微動観測記録を用いて、地盤ハザード値の算出結果とボーリングデータによる地盤評価との比較を行った。

5.2 節では、強震記録と単点微動の H/V スペクトル比を比較し、微動観測結果が実際の地震時の振動特性を反映していることを確認した。

5.3 節では、横浜市全域で地盤ハザード評価の算出を行い、それをランク分けした分布図とボーリング資料から得られている AVS30 と比較を行った。

5.4 節では、本章の結果をまとめる。

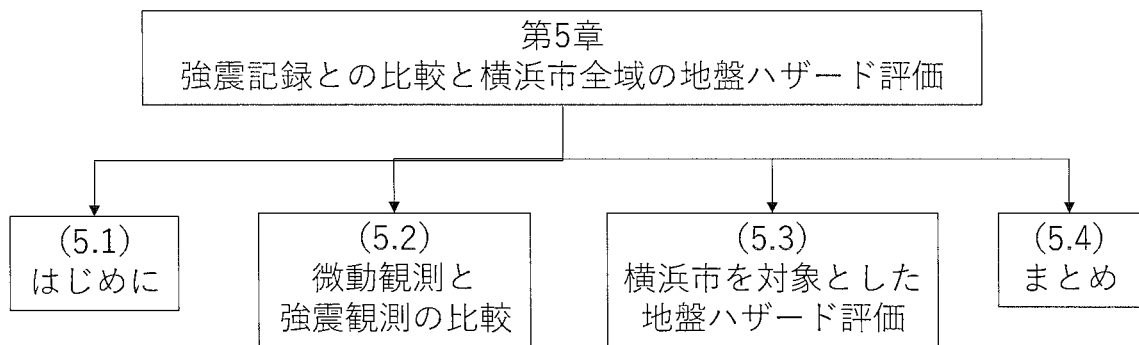


図 5.1 5章の構成

## 5.2 微動観測と強震記録の比較

### (1) 検討方法

微動の結果と地震観測記録の比較は、これまでの検討でも用いている横浜市の 42 か所を対象に、複数の地震記録を用いた検討を行った。検討は、それぞれの H/V スペクトル比の卓越周期とそのピーク値を比較することで実施した。

なお、微動観測の概要は「3.2.2 横浜市の卓越周期分布」に記載の通りであり、その結果を用いる地盤ハザード値の算出方法は、「2.2 新たな地盤ハザード評価手法の提案」に記載のとおりである。

### (2) 強震観測

横浜市では、「横浜市強震計ネットワーク」<sup>53)</sup>によって強震観測記録の収集・公開が行われている。ここでは、2002~2003 年の 8 地震と、2012~2018 年の 5 地震を対象に、現在でも観測が継続されている 42 地点について、強震観測記録を整理した。強震観測記録は、以下の基準で抽出している。強震観測記録の一覧を表 5.1 に、震央分布を図 5.2 にそれぞれ示す。

- ①M (マグニチュード) が比較的大きい (4.5 以上)
- ②震源深さが 30km 以上 (全地点で概ね鉛直下方からの入力を想定)
- ③全観測地点の 9 割 (37 地点) 以上で観測記録が得られている

強震観測記録は、主要動を含む区間 (観測開始から 60 秒間) と常時微動の主成分である表面波成分が多くなると考えられるコーダ部の 2 つの区間に着目し整理した。コーダ部は、時刻歴波形から振幅絶対値により累積曲線を求め、累積値が 80% に達した部分から 20.48 秒を切り出しフーリエ変換によりスペクトルを求めた。解析は、微動記録と同様にバンド幅 0.3Hz の Parzen Window で平滑化を行い、水平 2 成分の相乗平均を鉛直成分で除して H/V スペクトル比を求めた。

表 5.1 強震観測記録の一覧

既往検討地震					追加検討地震				
No	発生日時	震源位置	規模	震央位置	No	発生日時	震源位置	規模	震央位置
1-1	2002年2月12日 22時44分	北緯35度59分 東経141度09分 深さ48km	M5.5	茨城県北東部	2-1	2012年11月24日 17時59分	北緯35度64分 東経140度02分 深さ72km	M4.8	千葉県西部
1-2	2003年5月12日 0時57分	北緯35度87分 東経140度09分 深さ47km	M5.2	茨城県南部	2-2	2013年4月14日 10時22分	北緯36度 東経139度50分 深さ97km	M4.6	埼玉県東部
1-3	2003年5月17日 23時33分	北緯35度73分 東経140度65分 深さ47km	M5.1	千葉県北東部	2-3	2014年5月5日 5時18分	北緯34度95分 東経139度48分 深さ156km	M6.0	相模湾南部
1-4	2003年5月26日 18時24分	北緯38度80分 東経141度65分 深さ71km	M7.0	宮城県北部	2-4	2014年9月16日 9時16分	北緯36度09分 東経139度86分 深さ47km	M5.6	茨城県南西部
1-5	2002年9月20日 12時55分	北緯35度22分 東経140度30分 深さ70km	M5.8	千葉県南部	2-5	2016年11月23日 3時45分	北緯34度54分 東経140度07分 深さ101km	M4.5	千葉県南部沖
1-6	2003年10月15日 16時30分	北緯35度61分 東経140度05分 深さ74km	M5.1	千葉県北部					
1-7	2003年10月31日 10時06分	北緯37度33分 東経142度70分 深さ33km	M6.8	宮城県東部					
1-8	2003年11月15日 3時44分	北緯36度43分 東経141度17分 深さ48km	M5.8	茨城県東部					

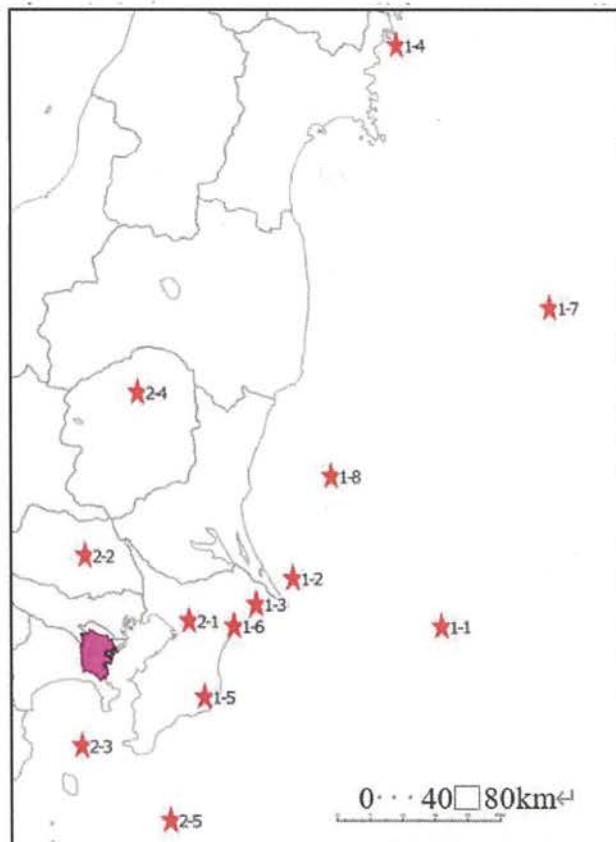
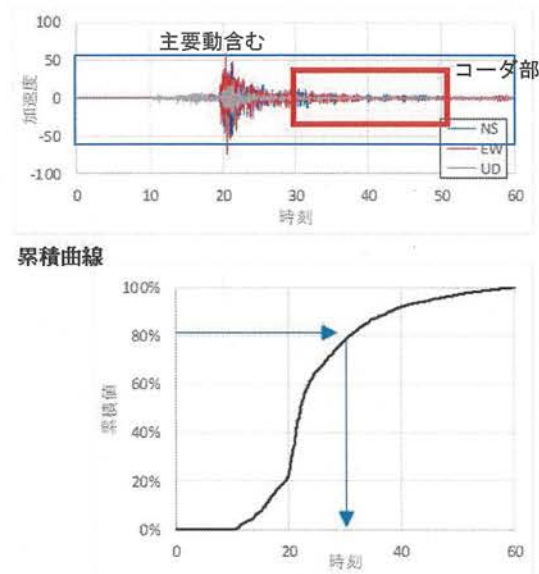


図 5.2 強震観測記録の震央分布

強震記録の時刻歴波形（3成分）と切り出し区間



フーリエスペクトル（上）とHVSR（下）

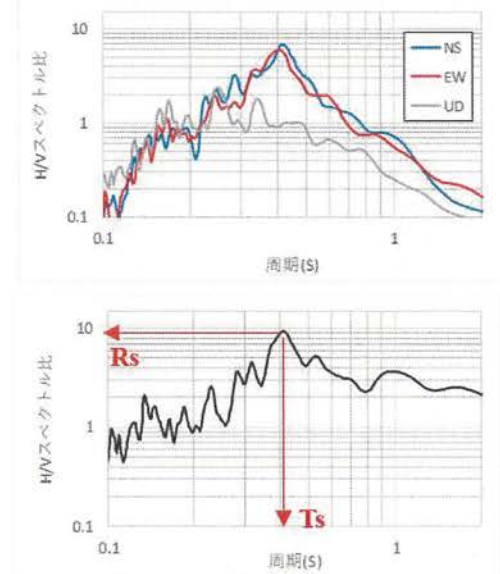


図 5.3 強震観測記録のデータ整理フロー

### (3) 微動観測と強震観測の比較

強震観測記録（コダ波、主要動を含む）と単点微動 H/V スペクトル比を重ねて図 5.4~図 5.9 に示す。強震観測記録は、主要動を含む区間とコダ部のスペクトルが概ね同様な傾向を示した。H/V スペクトル比でピークがほぼ認められないものを除くと、強震記録と微動の卓越周期は、全体のおおよそ 7 割以上で概ね一致している。また、伝達関数についてもほぼ同様な傾向を示す。一方で既往検討と同様、ピーク値もある程度の関係性は認められるものの、卓越周期ほど明確な相関性は認められない。それぞれの結果の卓越周期が概ね一致しているのは、対象地域の工学的基盤と表層地盤のコントラストが比較的明確であることなどが要因の一つと考えられるが、地震動の数を増やすなど今後はさらなる検討を行う予定である。

既往検討<sup>56)</sup>によるプロットと、今回のプロットを重ね描き図 5.10 に示す。図にはそれぞれのプロットから得られた回帰曲線（直線）と相関係数も併記している。常時微動と強震記録（コダ部）の卓越周期は、既往検討と概ね同程度の傾向を示し、特に周期 0.5s より小さいとよく一致している。常時微動と強震記録（コダ部）のピーク値でも既往検討と概ね同様な傾向を示す。ピーク値が 3 より小さいと概ね同様な値となるが、それより大きくなるとやや強震記録（コダ部）の方が大きい傾向が確認された。全体にばらつきが大きくなるのは、周期が大きい側、ピーク値が大きい側であることから、地盤の非線形性などに起因することなどが推察できるが、今後さらなる検討が必要である。また、既往検討と比べると周期・ピーク値共に相関係数（R）はやや悪化している。これは、対象地点が 150 か所から 42 か所に減っていることに起因していると推察される。

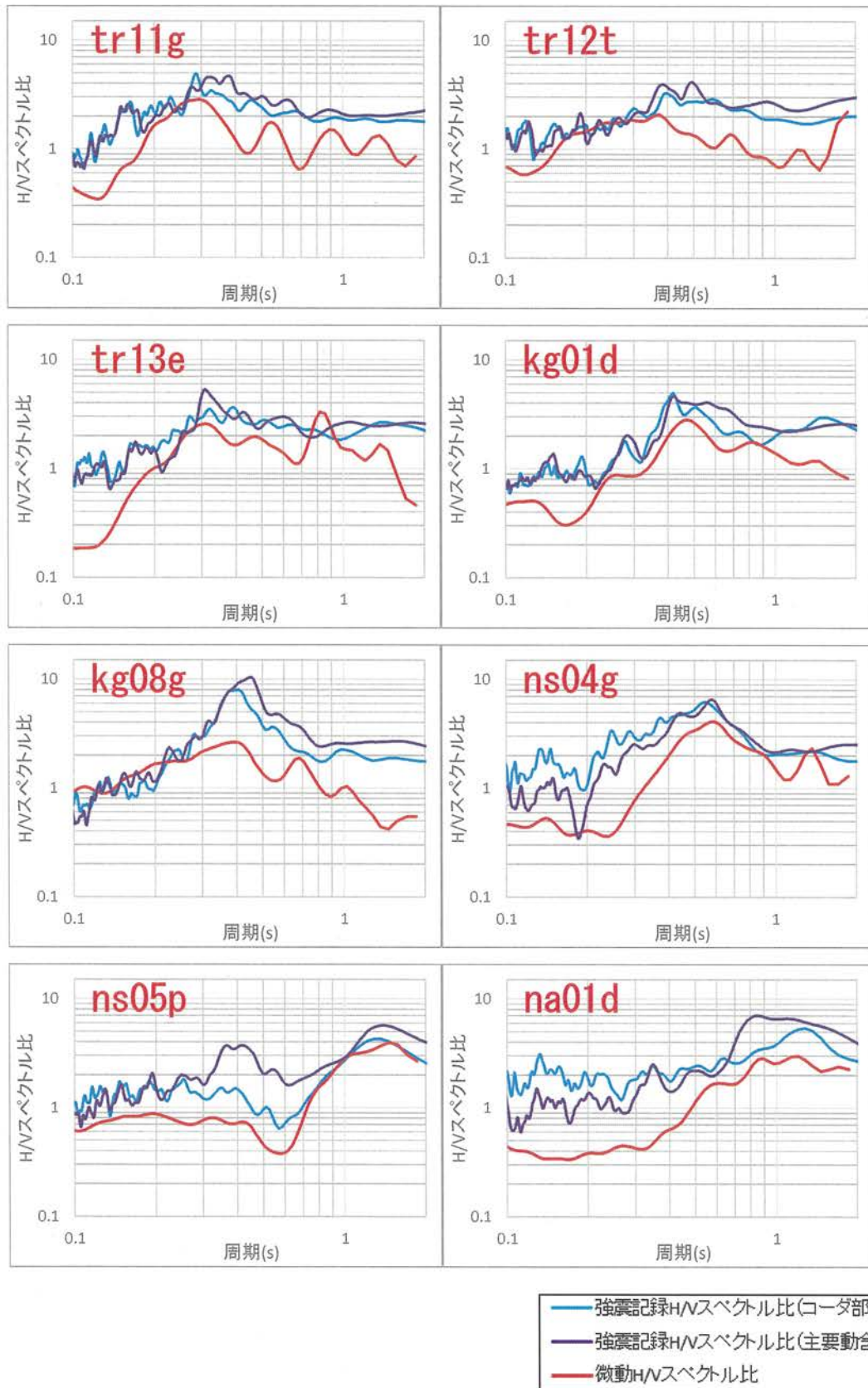


図 5.4 強震観測記録と常時微動の H/V スペクトル比 1

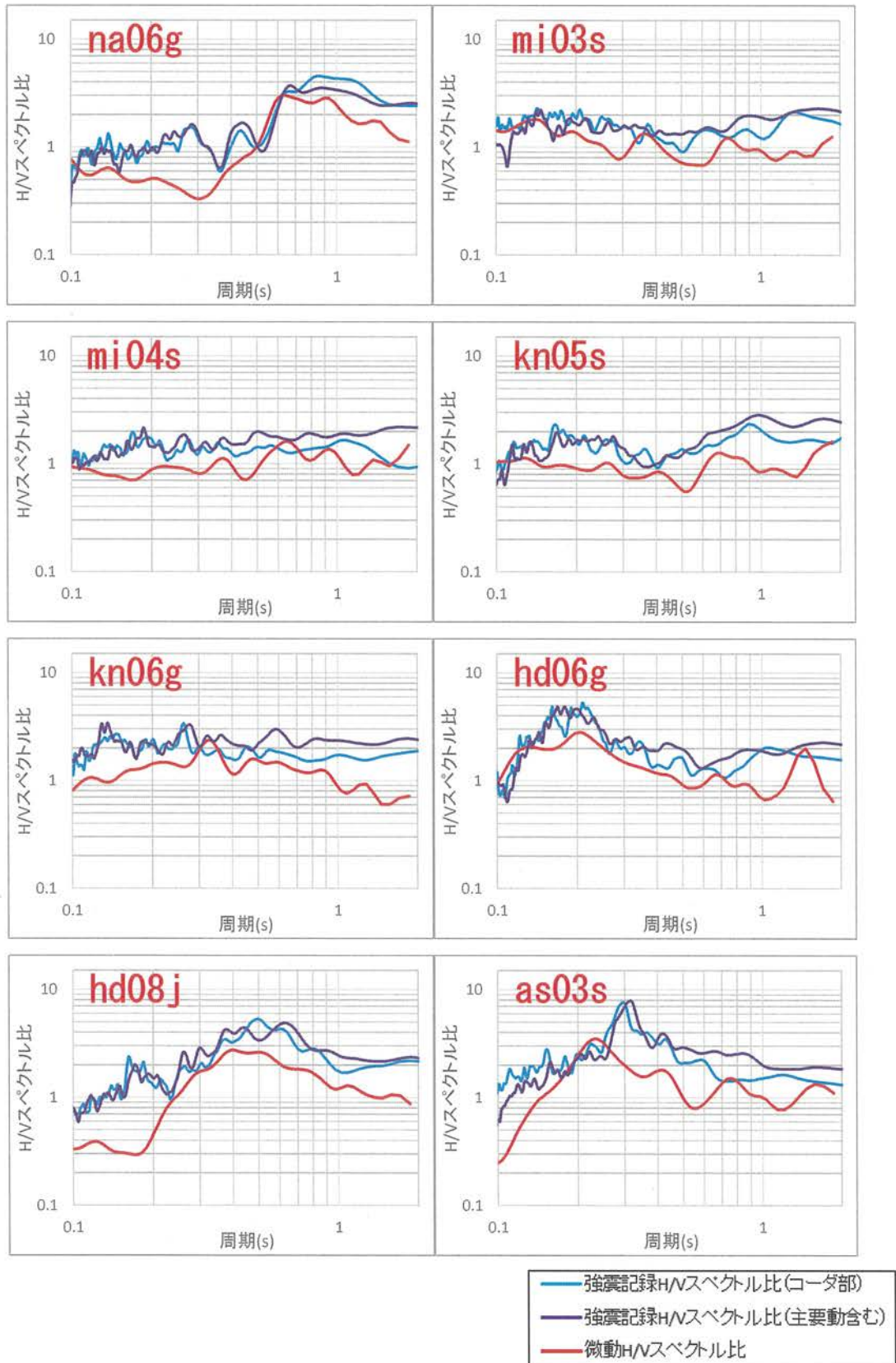


図 5.5 強震観測記録と常時微動の H/V スペクトル比 2



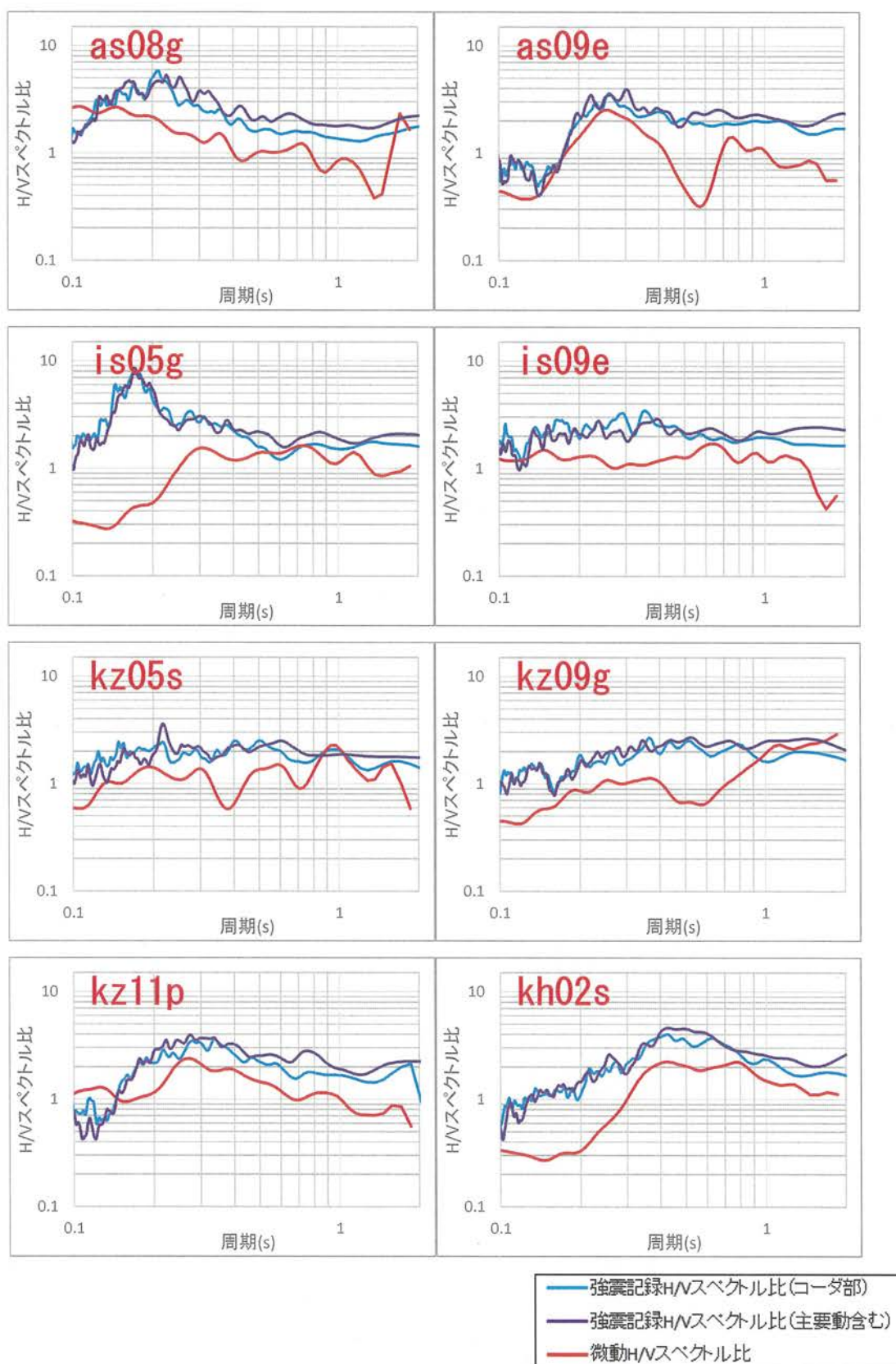


図 5.6 強震観測記録と常時微動の H/V スペクトル比 3

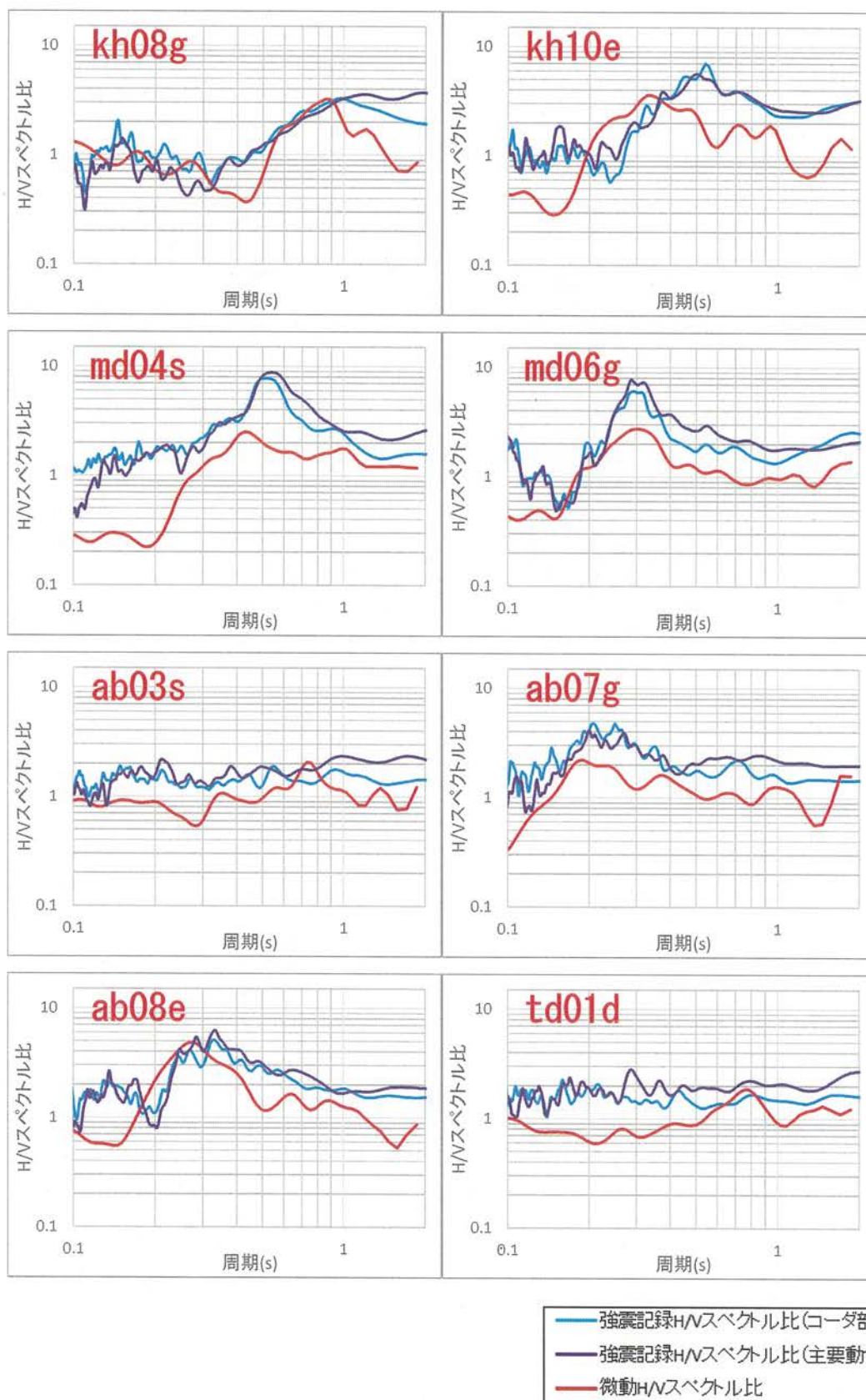


図 5.7 強震観測記録と常時微動の H/V スペクトル比 4

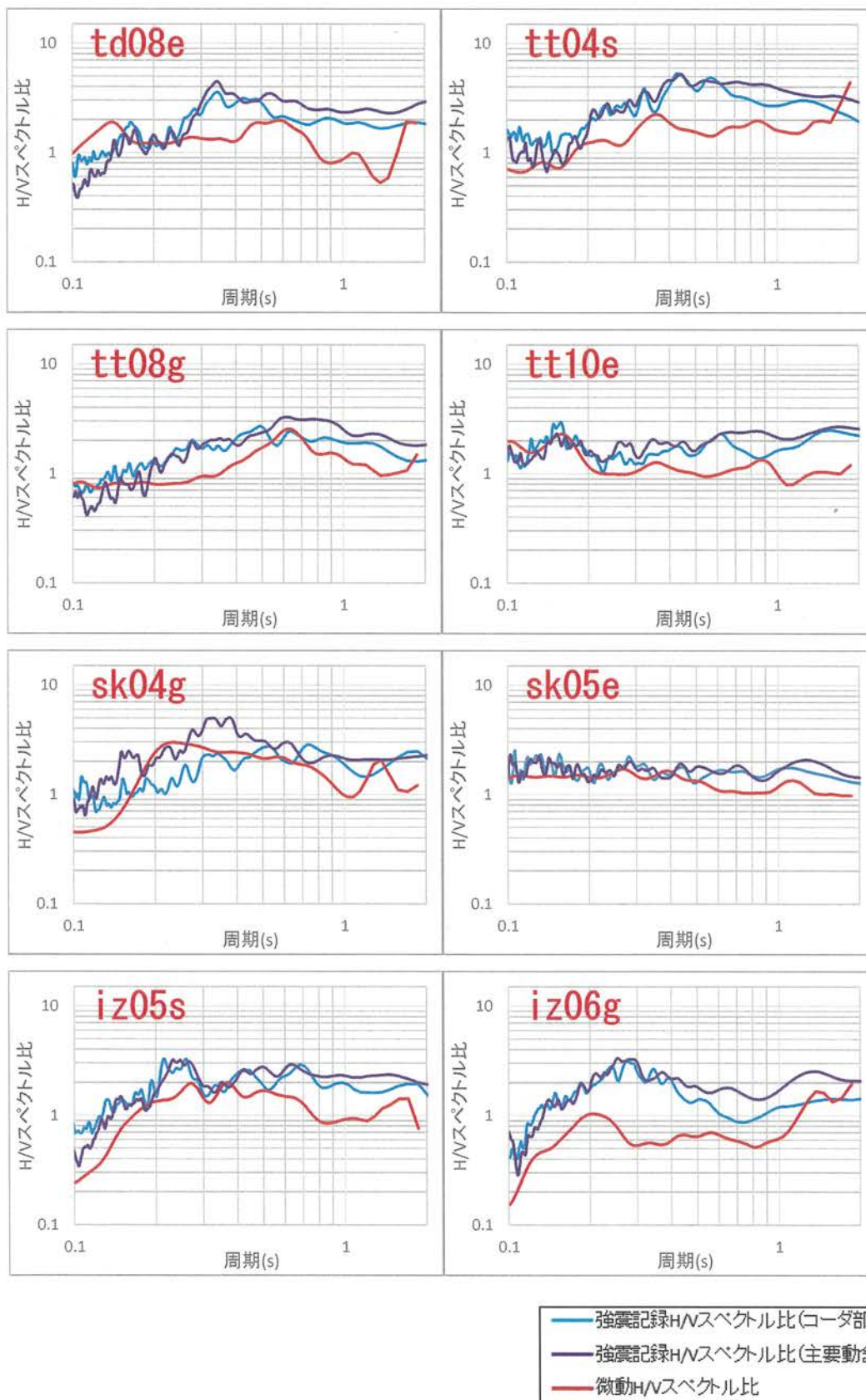


図 5.8 強震観測記録と常時微動の H/V スペクトル比 5

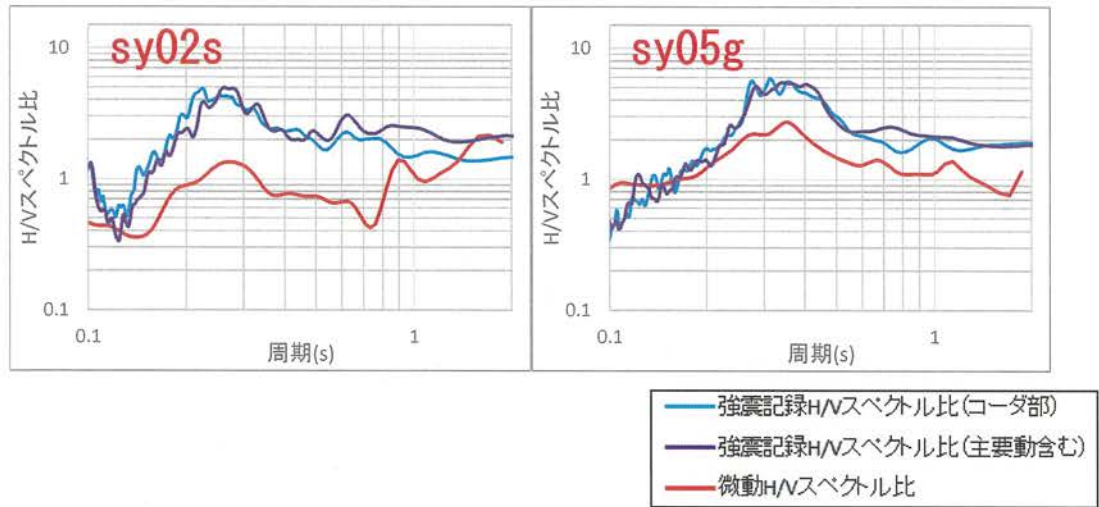


図 5.9 強震観測記録と常時微動の H/V スペクトル比 6

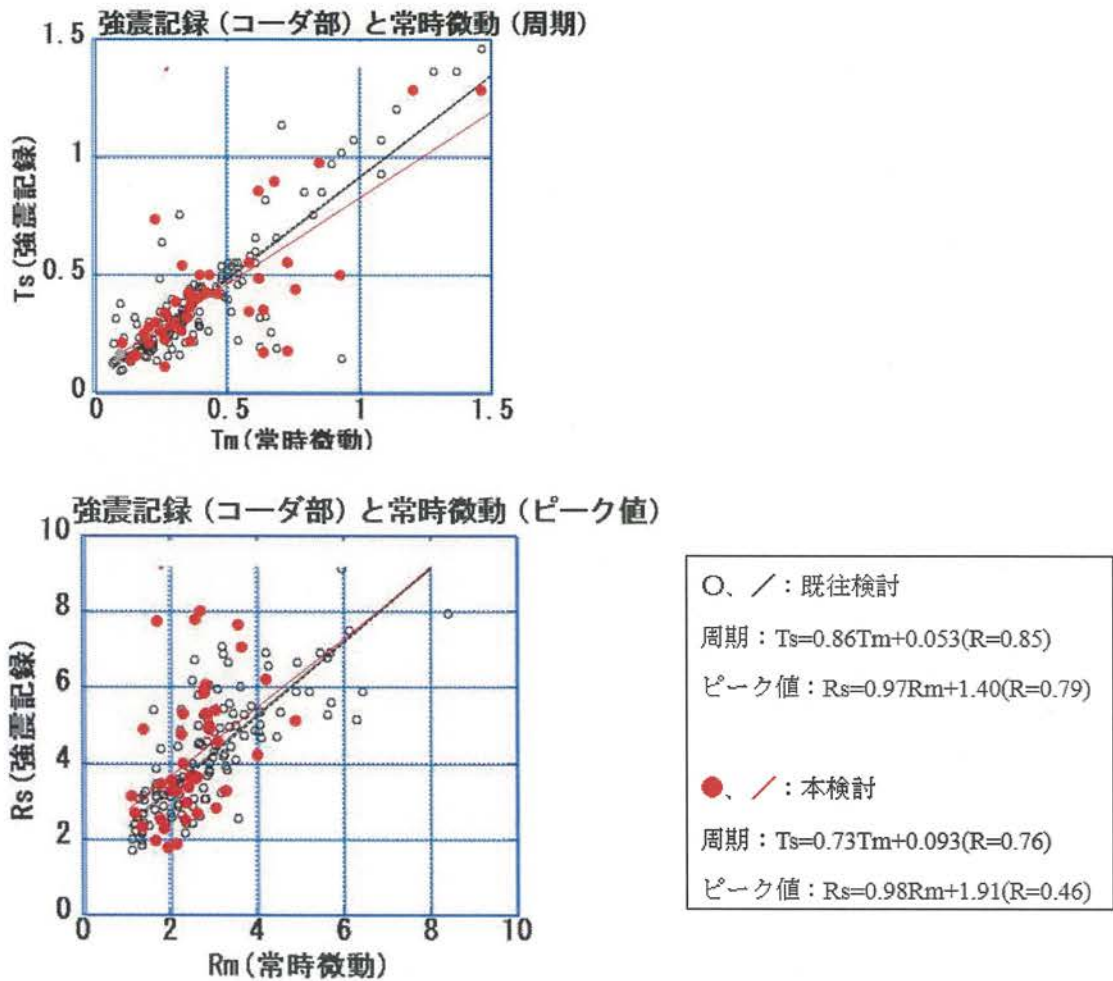


図 5.10 強震記録と常時微動の比較 (上段：卓越周期、下段：ピーク値)

### 5.3 横浜市を対象とした地盤ハザード評価

#### (1) AVS30 との比較

これまでの検討で単点微動による地盤ハザード値の妥当性が確認されていることから、横浜全域で実施した微動観測結果から地盤ハザード値を算出した。②では、その結果とボーリング調査から得られる AVS30 との比較を行った。

微地形毎に整理した、卓越周期とピーク値のばらつき程度（図 5.11）と分布図（図 5.12、図 5.13）をまとめた。ばらつきは、卓越周期・ピーク値共に相対的に後背湿地や三角州・海岸低地、干拓地などの低地系の微地形で大きい。

分布図によると、河川沿いで卓越周期やピーク値が共通して値が大きいエリアいくつか確認できる（A）。一方で、卓越周期はそれほど大きくないが、ピーク値が大きなエリア（B）や、両者が中程度の大きさのエリア（C）、両者が小さいエリア（D）などが確認できる。

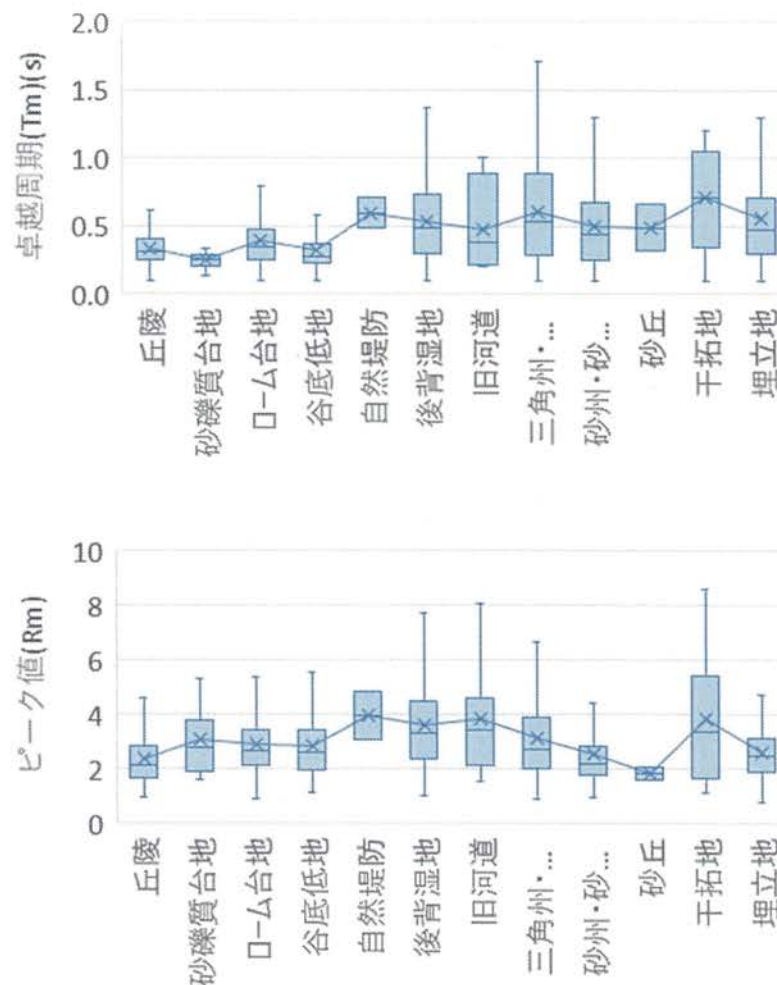


図 5.11 微地形毎の卓越周期とピーク値のばらつき（上段：卓越周期、下段：ピーク値）

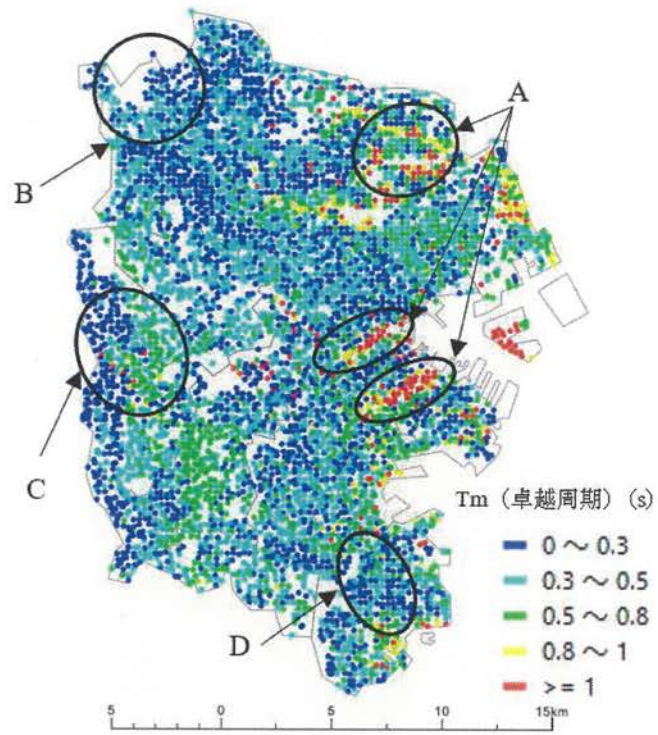


図 5.12 H/V スペクトル比による卓越周期の分布

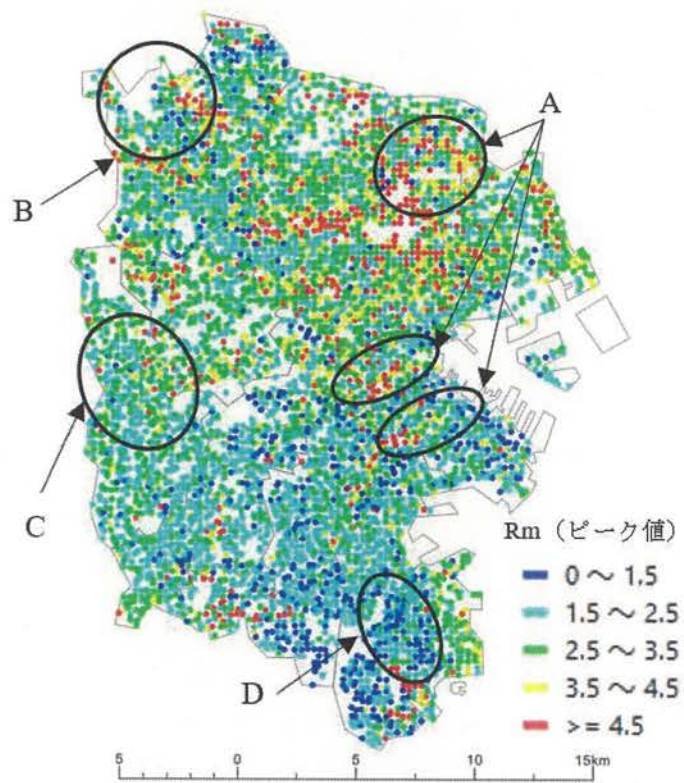


図 5.13 H/V スペクトル比によるピーク値の分布

これらの単点微動観測結果から、横浜市全域の簡易地盤ハザード評価を試みた。地盤ハザード評価の算出は、「2.2 新たな地盤ハザード評価手法の提案」記載のとおりである。地盤ハザード値の微地形毎のばらつき程度を図 5.14 に示す。図 5.11 に示した卓越周期・ピーク値と同様、後背湿地や三角州・海岸低地、干拓地などの低地系でばらつきが大きい。

地盤ハザード値は、東京都地域危険度判定<sup>57)</sup>を参考に、5つの区分を割合でランク分けをした。割合の閾値は、合算割合がランク 1 を全体の 50%とし、それ以降は正規分布のばらつきを参考に設定した（～68.3%：ランク 2、～95.4%：ランク 3、～99.7%：ランク 4、～100%：ランク 5）。

強震観測地点である 42 地点に対し、AVS30 と簡易地盤ハザード評価値の関係を図 5.15 に、AVS30 と地盤ハザード値ランクの関係を図 5.16 にそれぞれ示す。AVS30 は PS 検層結果から算出している。AVS30 と地盤ハザード値やそのランクは、ややばらつきはみられるものの全体には負の相関となる。相関係数は、AVS30-地盤ハザード値で 0.44、AVS30-地盤ハザードランクで 0.49 とややハザードランクの方が高くなる。

地盤ハザードランクと AVS30 の比較を図 5.17 に示す。AVS30 は約 2 万本のボーリングデータを用いて作成されている。図 5.12 や図 5.13 と同様に、地盤ハザード分布は、AVS30 が小さい河川沿いで地盤ハザードランクが大きくなる A エリアや、AVS30 が大きく地盤ハザード値が小さくなる D エリアで特性をよくとらえている。また、卓越周期・ピーク値単独では評価が難しい B エリア（AVS30 がやや大きい地盤ハザードは小さい）や C エリア（AVS30 がやや小さく地盤ハザード値もやや大きい）でも地盤ハザード値にするとそれなりに良い相関を示す。

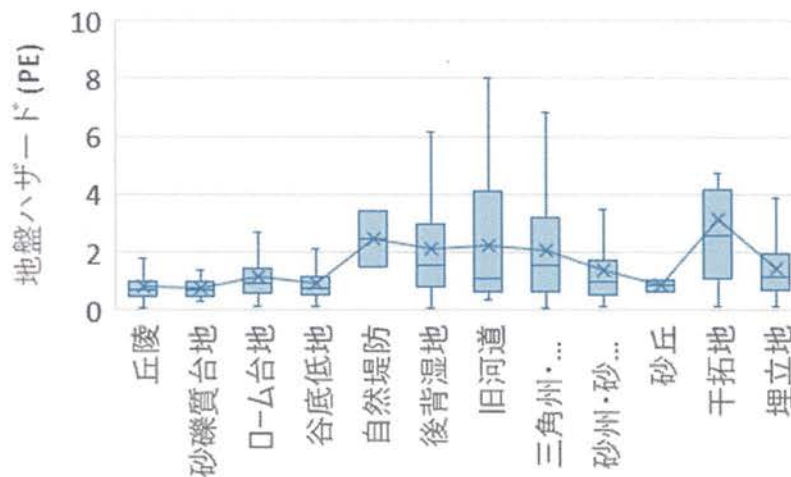


図 5.14 微地形毎の地盤ハザード値のばらつき

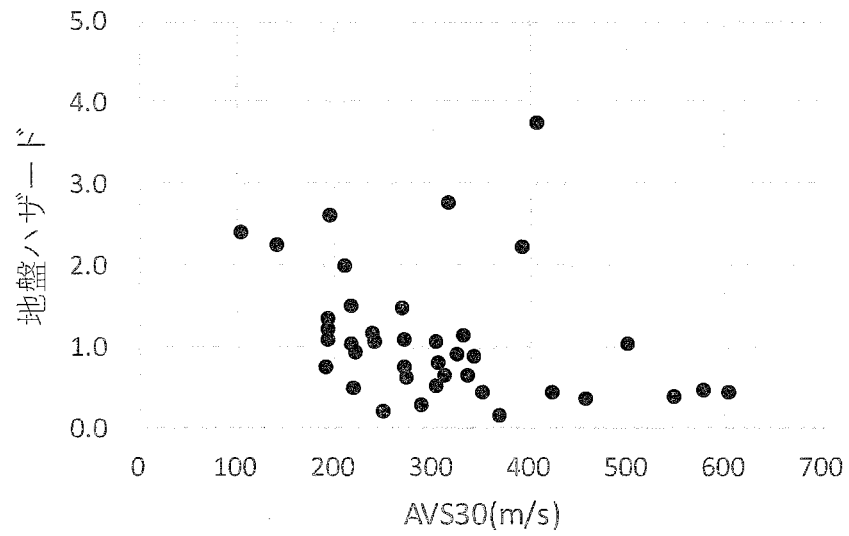


図 5.15 強震観測地点の地盤ハザード値と AVS30

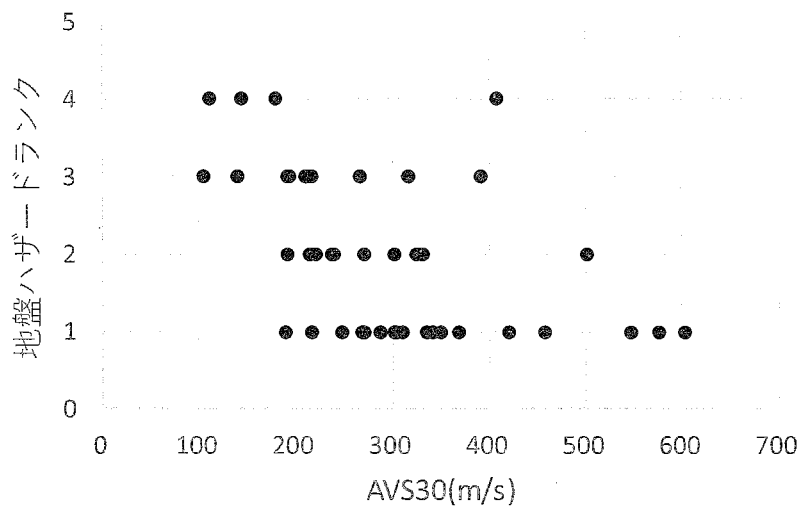


図 5.16 強震観測地点の地盤ハザードランクと AVS30



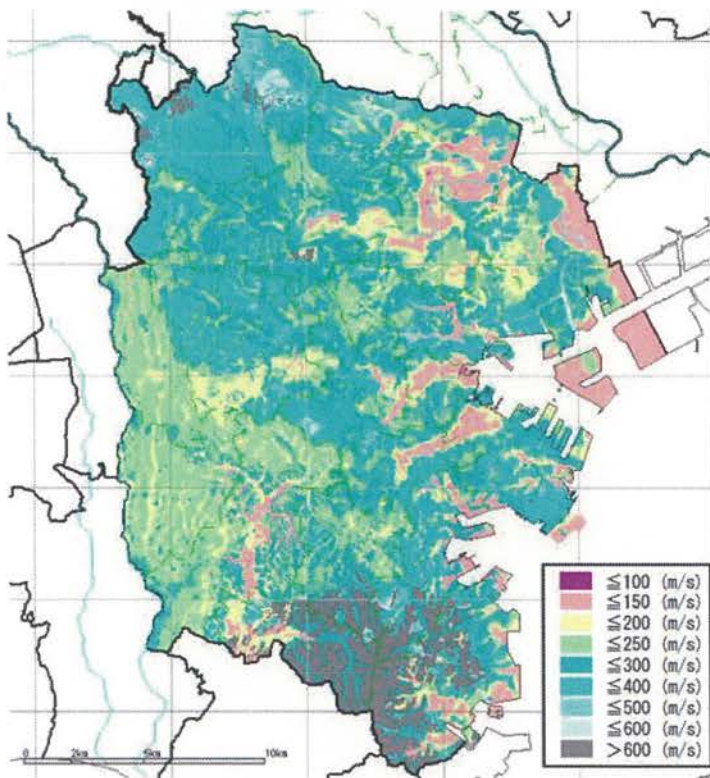
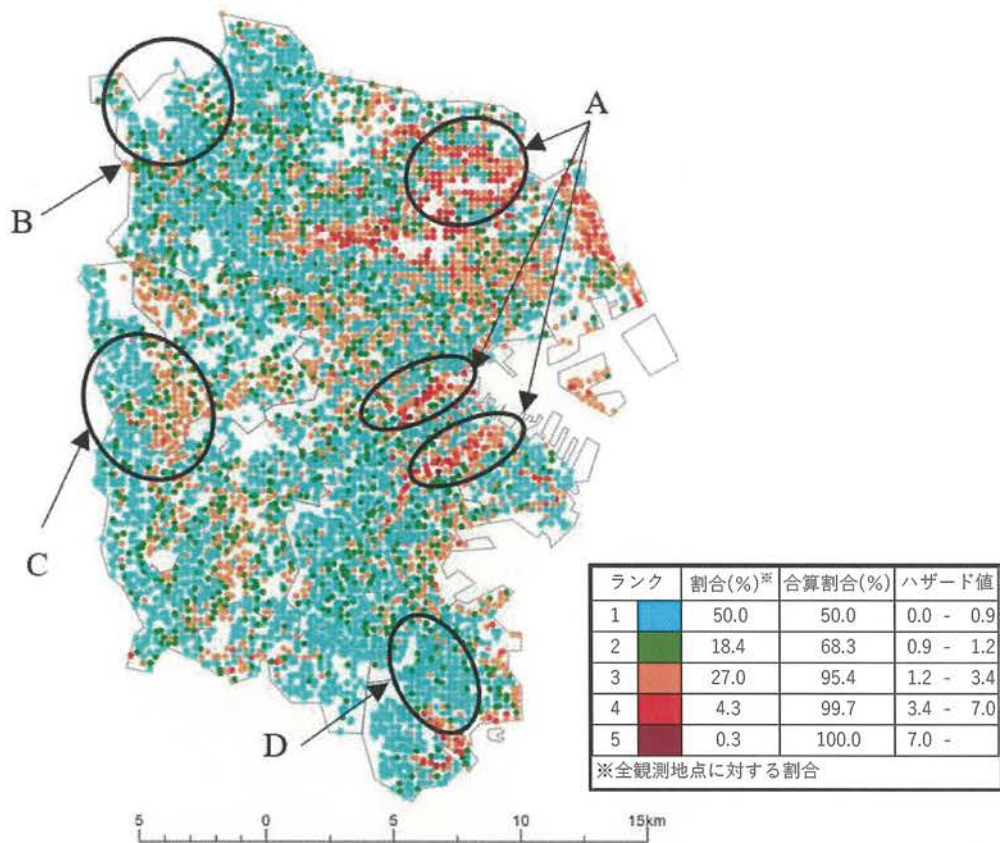


図 5.17 地盤ハザードランク（上段）と AVS30（下段）の分布

## (2) 複数ハザードを評価した検討結果との比較

横浜市を対象に、オープンデータを用いて複数ハザードを評価した検討を進めている<sup>58)</sup>。ハザードは、地震 (seismic)、洪水 (flood)、津波 (tsunami)、土砂災害 (sediment)、人口 (population) の 4 つの指標を統合しマルチハザードとして評価を実施している。マルチハザード評価の詳細はここでは省略し、地盤ハザード値との比較についてのみ示す。

両者の比較を図 5.18 に示す。まず、実測による地盤ハザード評価と、地震ハザードの分布を比較する。両者は沿岸部と河川沿いで地盤ハザード値が高くなる点、中央部から北西や南東にかけて地盤ハザード値が小さくなる点など全体にその傾向は一致する。

次に、実測による地盤ハザード評価とハザードを統合したクラスター分析結果の分布図とも比較を行った。地震のハザードと比べるとやや差異もあるが、地震ハザードが大きいクラスター2、4、6 は実測でもハザードが大きい。一方で、全ハザード値が小さいグループ1 が広がる内陸の中央部付近では、実測に基づく地盤ハザード値も小さい。

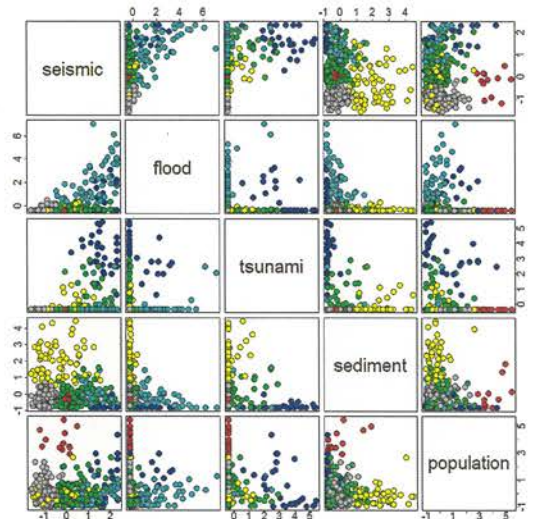
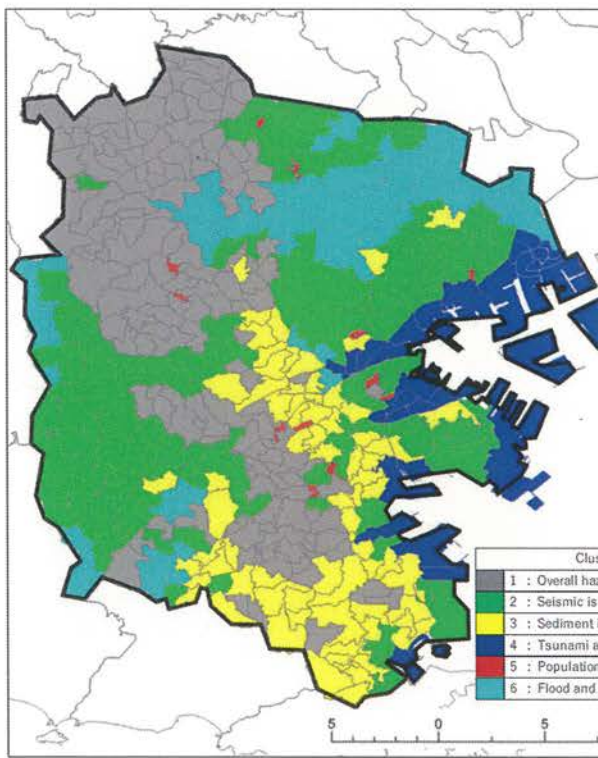
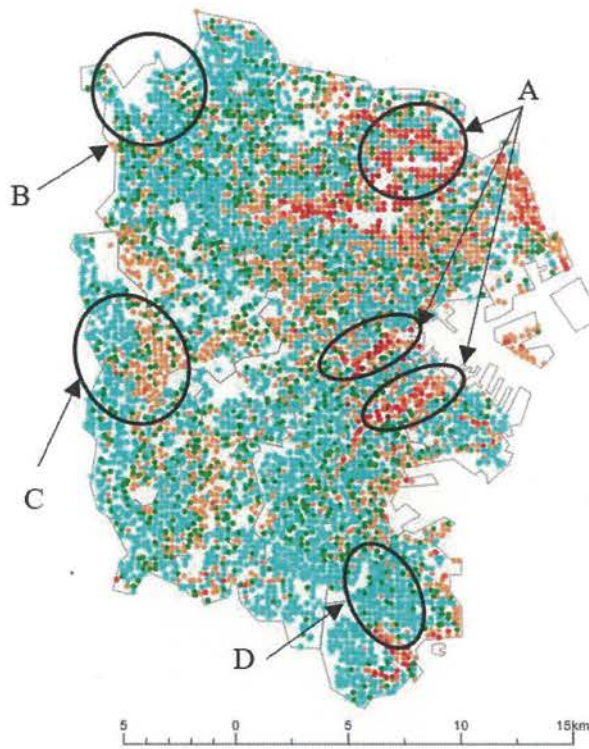


図 5.18 地盤ハザードランク（上段）とマルチハザード評価（下段）の分布

#### 5.4 まとめ

本章では、強震観測記録と単点微動による H/V スペクトル比を比較することで、微動から得られる地盤特性の適用性について確認した。また、その微動結果から得られる簡易地盤ハザード評価を横浜市全域で算出し、既往の地盤評価資料と比較した。結果を以下にまとめる。

- ・強震観測記録と単点微動による卓越周期（Ts）とピーク値（Rs）を比較すると、ピークが確認される地点の 7 割以上で卓越周期は概ね一致し、ピーク値も概ね同様な傾向を示した。
- ・単点微動結果から得られる地盤ハザード値は、微地形によってばらつきがあるものの、ボーリング資料から得られる AVS30 の分布と整合的であることが確認できた。

# 第 6 章

## 第6章 地震被害を用いた適用性の検討

### 6.1 はじめに

ここでは、提案している単点微動 H/V スペクトル比から得られる地盤ハザード値と過去の地震被害を直接比較することで、その適用性について検討を行う。

6.2 節では、過去の被害地震として「1923 年関東地震」、「1974 年伊豆半島沖地震」、の 2 つの地震を対象として、地盤ハザード値と地震被害の比較を行う。

6.3 節では、比較的近年の被害地震として「2016 年熊本地震」を対象に、同様な比較を行う。また、近年発生した熊本地震では過去の被害地震と比べると、建物被害や地震動強さなどやや詳細なデータが整理されている。そこで、それらの条件を変更した検討を行い、最終的に地盤ハザード値を用いた評価方法の適用性の確認を行った。

6.4 節では、本手法と J-SHIS による地盤増幅率を用いた場合の比較を行い、本手法の適用性の確認をした。

6.5 節では、本章の結果をまとめる。

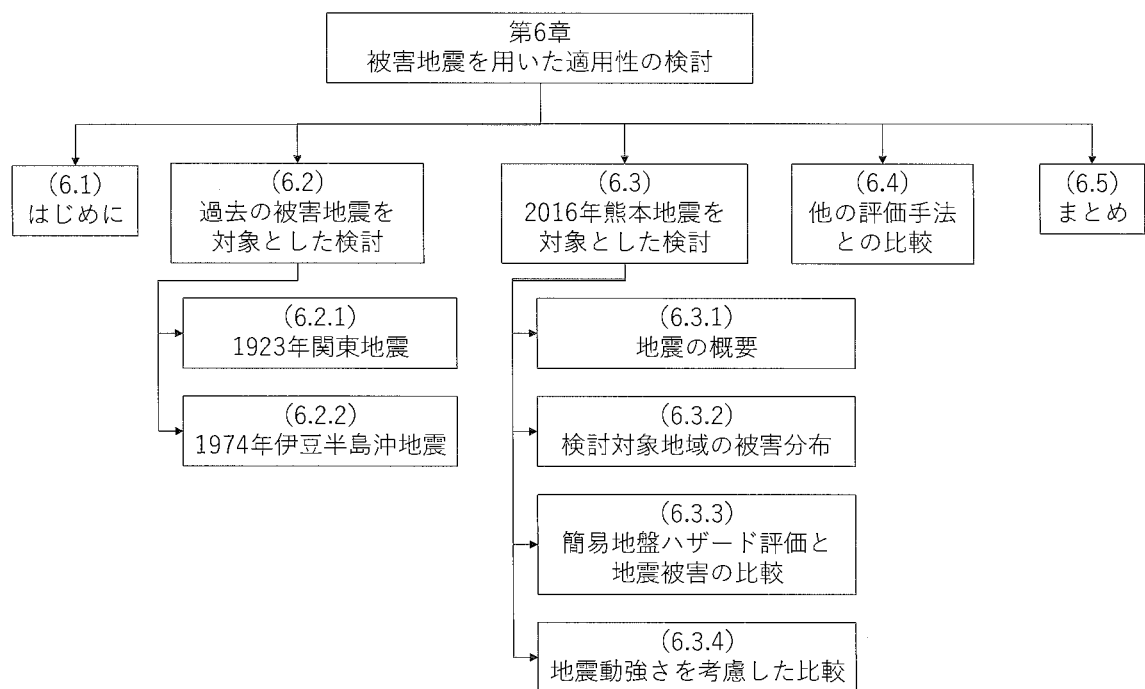


図 6.1 6 章の構成

## 6.2 過去の被害地震を対象とした検討

### 6.2.1 1923年関東地震

#### (1) 地震の概要

1923年関東地震は、1923年（大正12年）9月1日午前11時58分に発生したマグニチュード7.9の地震である。関東地震の詳細は、さまざまな研究者によってまとめられているため（例えば59）、ここでは概要のみ示す。

被害については諸説あるが、死者数は10万人以上、全壊家屋は29万戸ともいわれている。この地震では、地震動による建物倒壊に加えて、地震後に発生した火災による被害が顕著であり、死者の9割程度が火災の被害である。震源の位置は南関東地方の直下であり、特に横須賀や相模平野付近の直下で大きな滑りが発生したとされている。

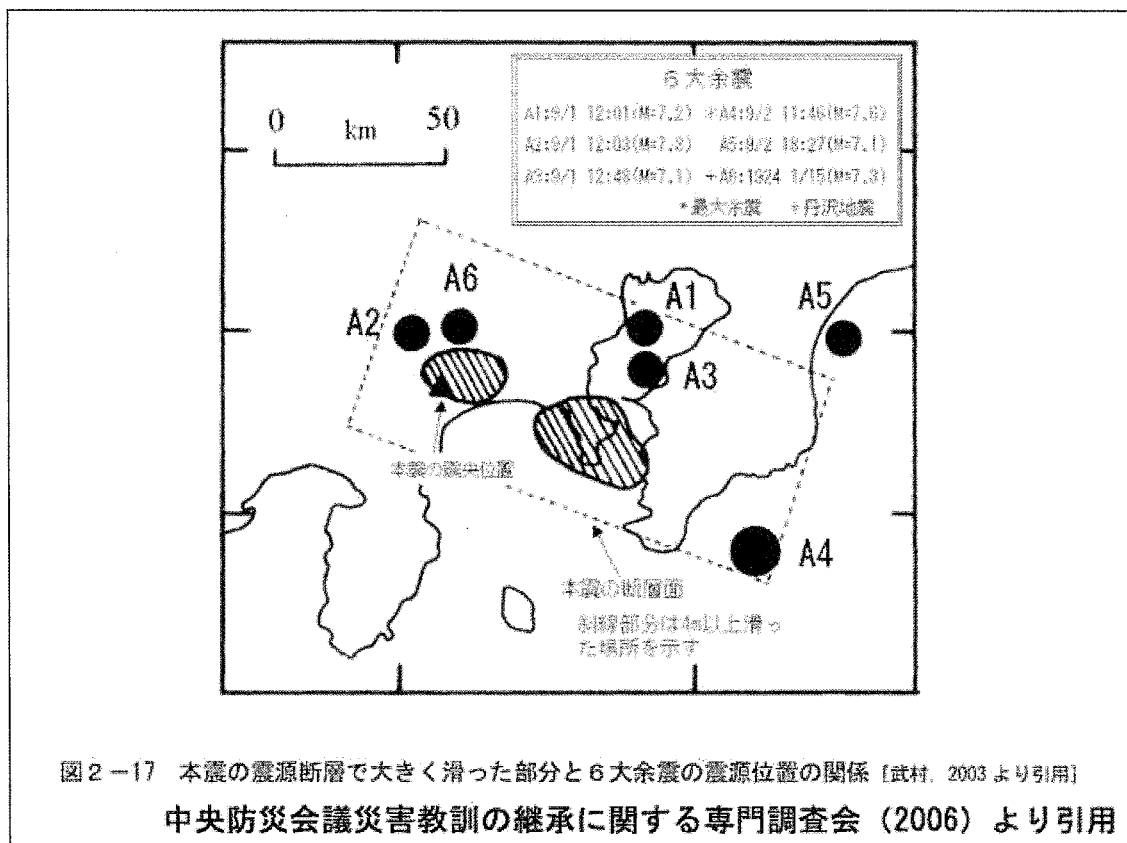


図 6.2 1923年関東地震の震源位置<sup>59)</sup>

(2) 検討対象地域の地震被害分布

ここでは、これまでまとめてきた横浜での微動観測結果を用いるため、地震被害も旧横浜市域でまとめられているものを用いる。高浜ら（2003）<sup>61)</sup>は、さまざまな被害データやヒアリング調査から、町丁目・大字を目安とした地区の全壊率を整理している（図6.4）。

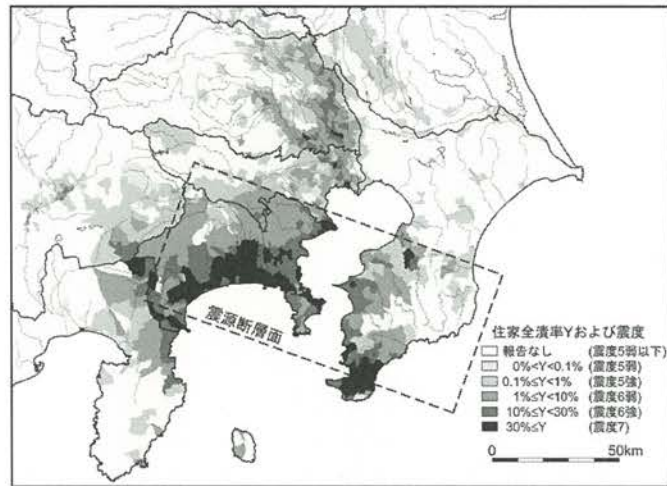


図 6.3 1923 年関東地震の震度分布 <sup>60)</sup>

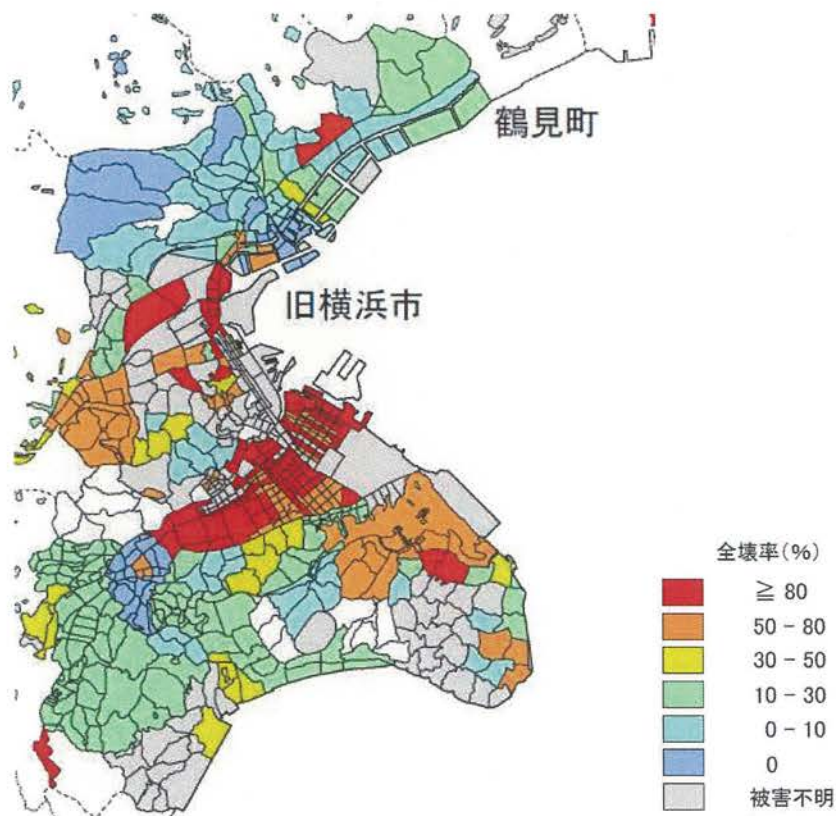


図 6.4 1923 年関東地震の旧横浜市周辺の全壊率 <sup>61)</sup>の図の一部を切り出し



(3) 地盤ハザード評価と地震被害の比較

地盤ハザード値と地震被害（全壊率）の比較は、以下の手順で実施した。なお、集計単位は、全壊率ポリゴンのサイズなどを参考に 1km メッシュと設定した。

- ①文献の全壊率から GIS データを作成
- ②微動から得られた地盤ハザード値と重ねる
- ③1km メッシュ単位で集計

全壊率 : メッシュ当たりの平均的な全壊率を算出

地盤ハザード値 : 複数地点から地盤ハザード値の平均値を算出

※全壊率データのポリゴンがごく小さい（10%未満）メッシュは信頼性が低いとして対象外とした

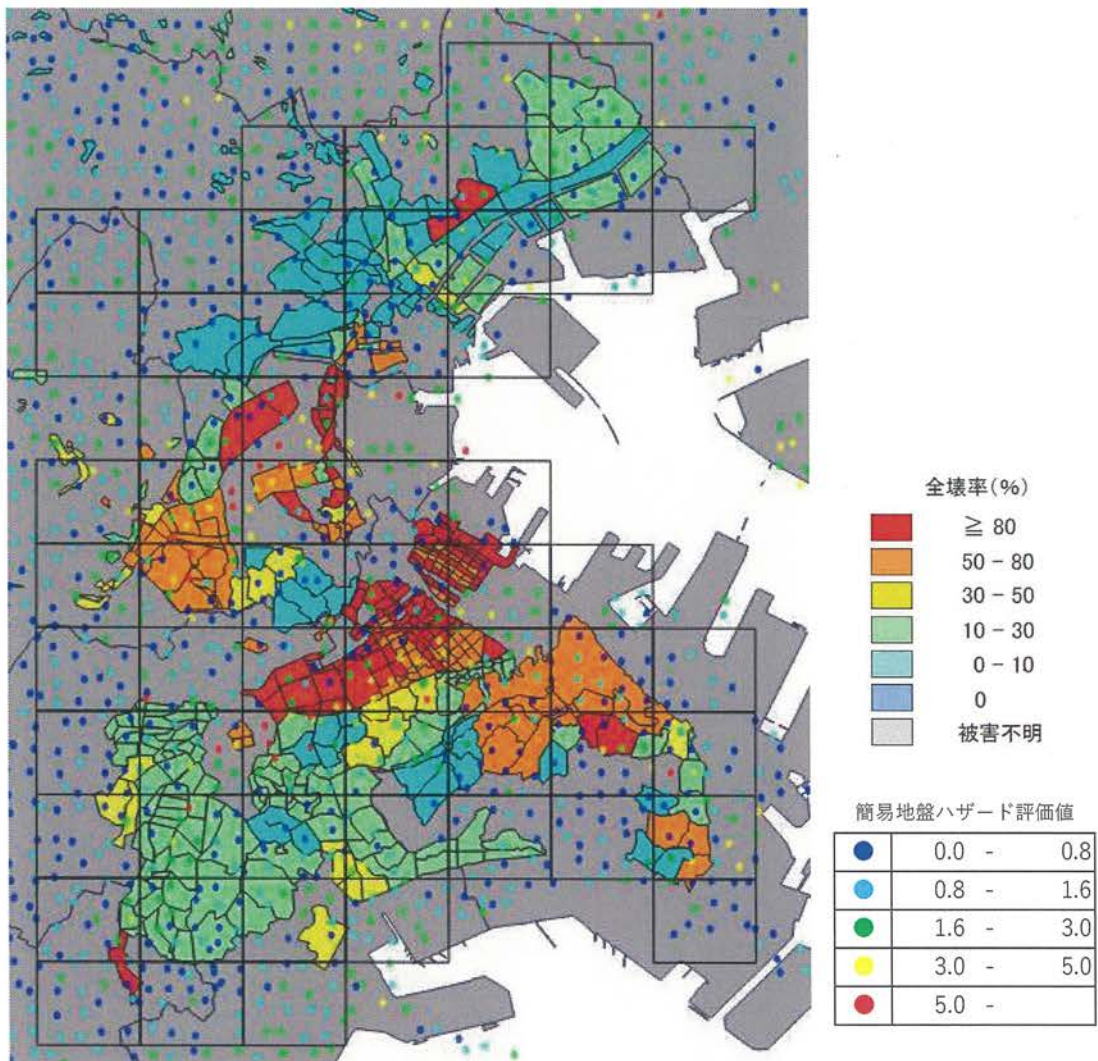


図 6.5 1923 年関東地震の全壊率と地盤ハザード値の分布

1923 年関東地震の全壊率（木造家屋）と地盤ハザード値の関係を図 6.6 に示す。全体にばらつきがやや大きいながらも正の相関が確認できる。相関係数も 0.44 とそれほど悪くない。一方で、地盤ハザード値が 2.0 以上となるとばらつきが大きくなる。

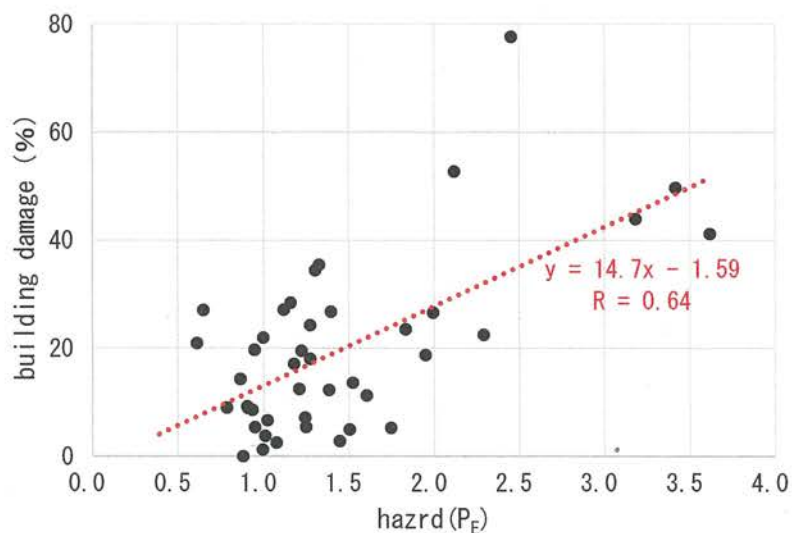


図 6.6 1923 年関東地震の全壊率と地盤ハザード値の関係

#### (4) まとめ

旧横浜市を対象に、1923 年関東地震の木造家屋の全壊率と、単点微動 H/V スペクトル比から求める地盤ハザード値の関係を比較した。

全体にはややばらつきが大きいものの、正の相関が確認できた。一方で、特に地盤ハザード値が 2.0 を超えると特にばらつきが大きくなり、本手法の適用性の限界が示唆された。

## 6.2.2 1974年伊豆半島沖地震

### (1) 地震の概要

伊豆半島沖地震は、1974年5月9日に発生し、地震の規模は6.9、震源深さ10kmであった。石廊崎で最大震度5を記録し、静岡や横浜などでも震度4を記録している<sup>62)</sup>。伊豆半島沖地震の震央位置と震度分布を図6.7に示す。

死者30名、全壊134棟など大きな被害が発生した。本検討では対象外だが、特に中木地域の被害が甚大であった。斜面が地滑りを起こし、大量の土砂により16戸が完全に埋まり、27人名の死者が発生している。

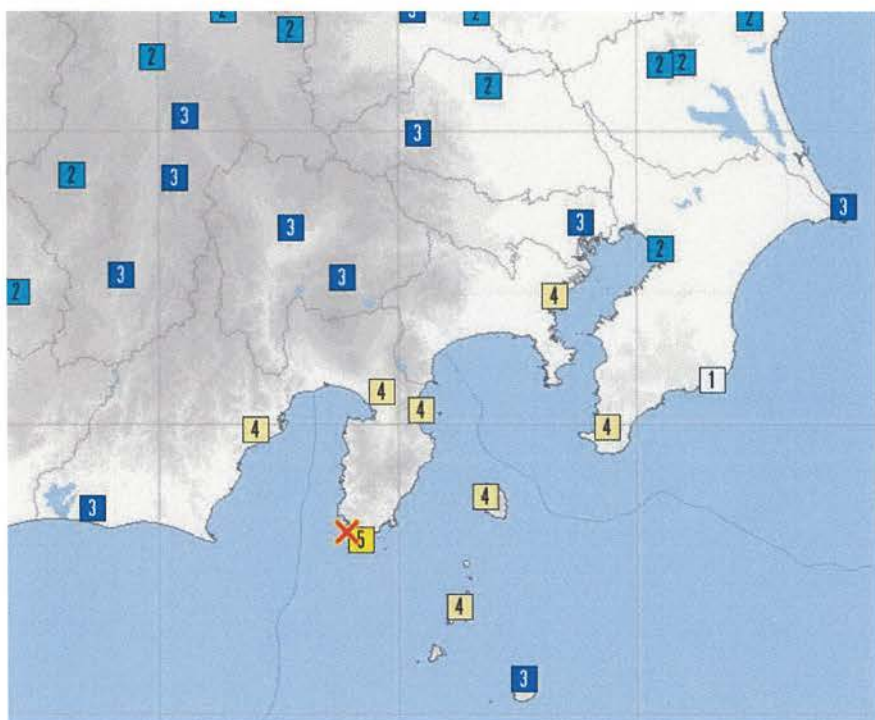


図 6.7 1974年伊豆半島沖地震の震央位置と震度分布

(2) 検討対象地域の地震被害の詳細

望月らによって、地震発生後に墓石調査や家屋の被害調査が実施された<sup>63)</sup>。その結果、今回対象とした 2 地区の推定加速度と家屋被害率は、子浦で 350gal、10.4%、入間で 400gal、25.3%であった。子浦地区と入間地区を対象に、高密度な単点微動観測を実施し地盤ハザード値を算出した (図 6.9)。

各地区の平均的な地盤ハザード値と家屋被害率の関係を図 6.10 に示す。図は図 6.6 の 1923 年関東地震の同図の結果に重ねたものである。伊豆半島沖地震の結果は、関東地震の結果のばらつきの範囲内であり、両結果は整合的である。

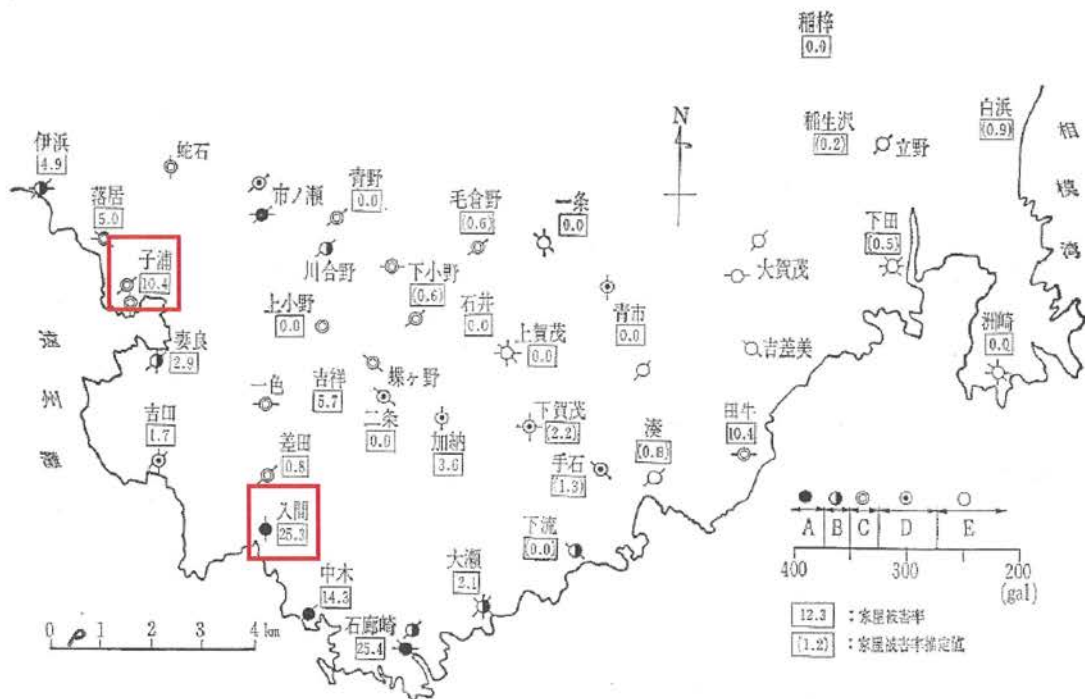


図 6.8 1974 年伊豆半島沖地震の家屋被害率<sup>63)</sup>に加筆

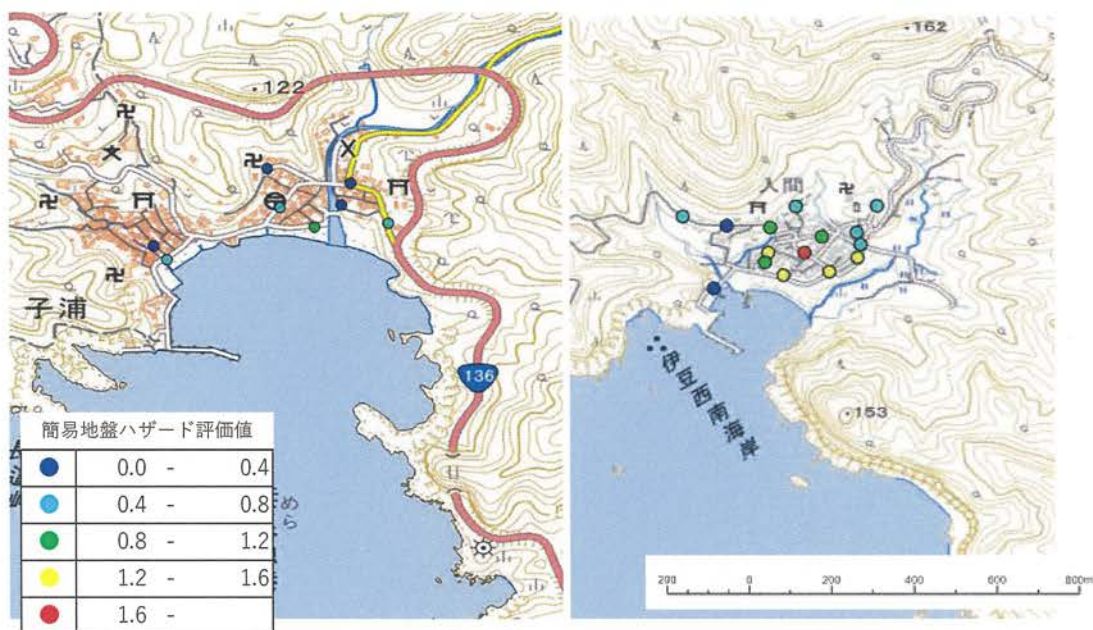


図 6.9 1974 年伊豆半島沖地震の地盤ハザード値  
(左：子浦地区、右：入間地区)

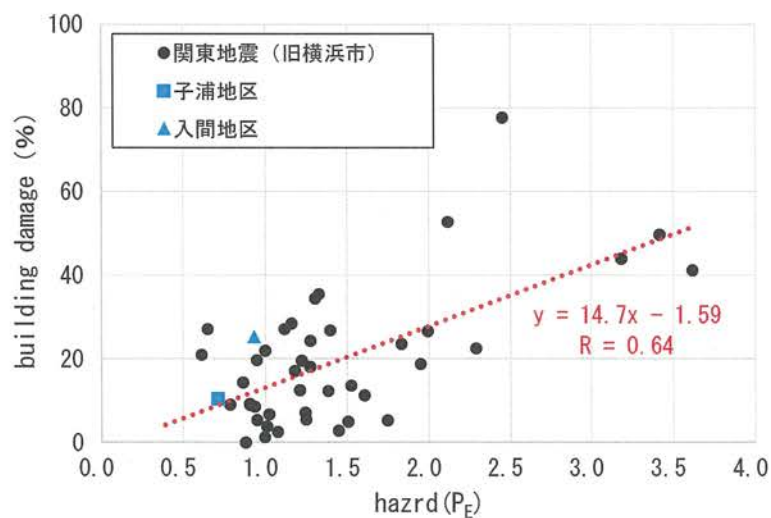


図 6.10 1974 年伊豆半島沖地震の全壊率と地盤ハザード値の関係  
(図 6.6 の 1923 年関東地震の結果に加筆)

### (3) まとめ

伊豆半島の子浦地区、入間地区を対象に、1974 年伊豆半島地震の墓石転倒率から推定された木造家屋の被害率と、単点微動 H/V スペクトル比から求める地盤ハザード値の関係を比較した。

結果を前述した関東地震の被害と重ねると、両者は整合的であることが確認できた。

### 6.3 2016年熊本地震を対象とした検討

#### 6.3.1 地震の概要

熊本地震は、2016年4月14日21時26分のM6.5の前震、4月16日01時25分のM7.3の本震と、2日間のうちに同一観測地点で2度も震度7が観測された地震である<sup>64)</sup>。それぞれの地震の推計震度分布を図6.11に示す。熊本地震の詳細は、さまざまな機関や研究者によってまとめられているため<sup>例えば65)、66)、67)</sup>、ここでは概要のみ示す。

熊本県を中心に、山口県、福岡県、佐賀県、長崎県、大分県、宮崎県で、死者267名(関連死含む)、重軽傷者2,804名および全壊8,673棟を含む205,878棟の住居被害が生じた。

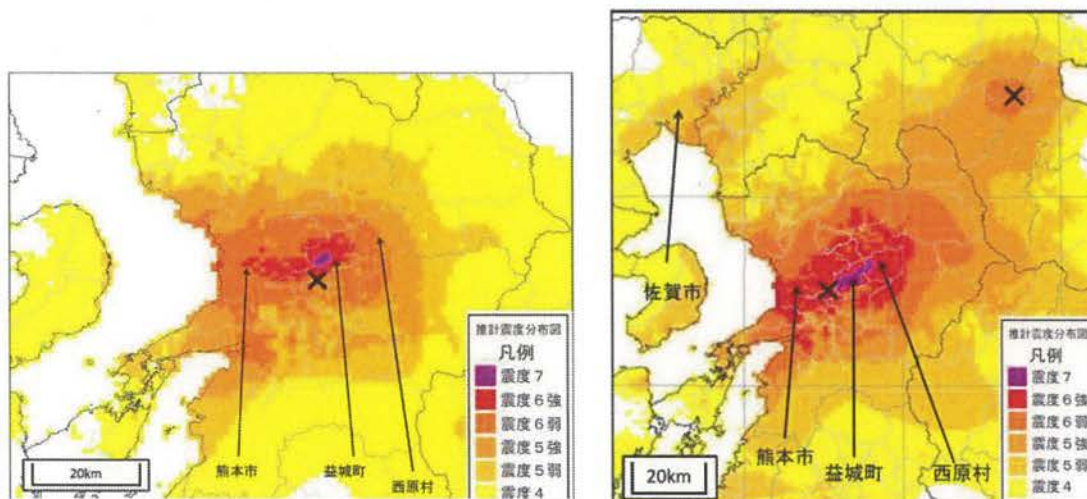


図 6.11 2016年熊本地震の推計震度分布（左：前震、右：本震）<sup>64)</sup>

#### 6.3.2 検討対象地域の被害分布

本検討では、微動観測地点周辺の建物被害の把握が重要となる。建物被害は、悉皆調査による資料や応急危険度判定による調査などいくつかの方法があるが、ここでは1棟単位の被害区分と位置情報が利用可能な航空写真目視判読にもとづく被害調査資料を利用させていただいた<sup>68)</sup>。このデータは、熊本県益城町付近に対し4つの被害区分(LEVEL1~4)や2つ年代別(1978年以前と以降)の木造・非木造と建物中心部の位置情報を持ったデータである。建物被害のポイントデータを用いて、250mメッシュで計算された被害率の分布を図6.12に、被害区分の定義を表6.1にそれぞれ示す。

一方で、防災科学技術研究所などと合同で、熊本県全域を1km間隔、益城町周辺を500m間隔で単点微動観測を実施した。微動観測から得られた地盤ハザード値の分布を図6.13に示す。

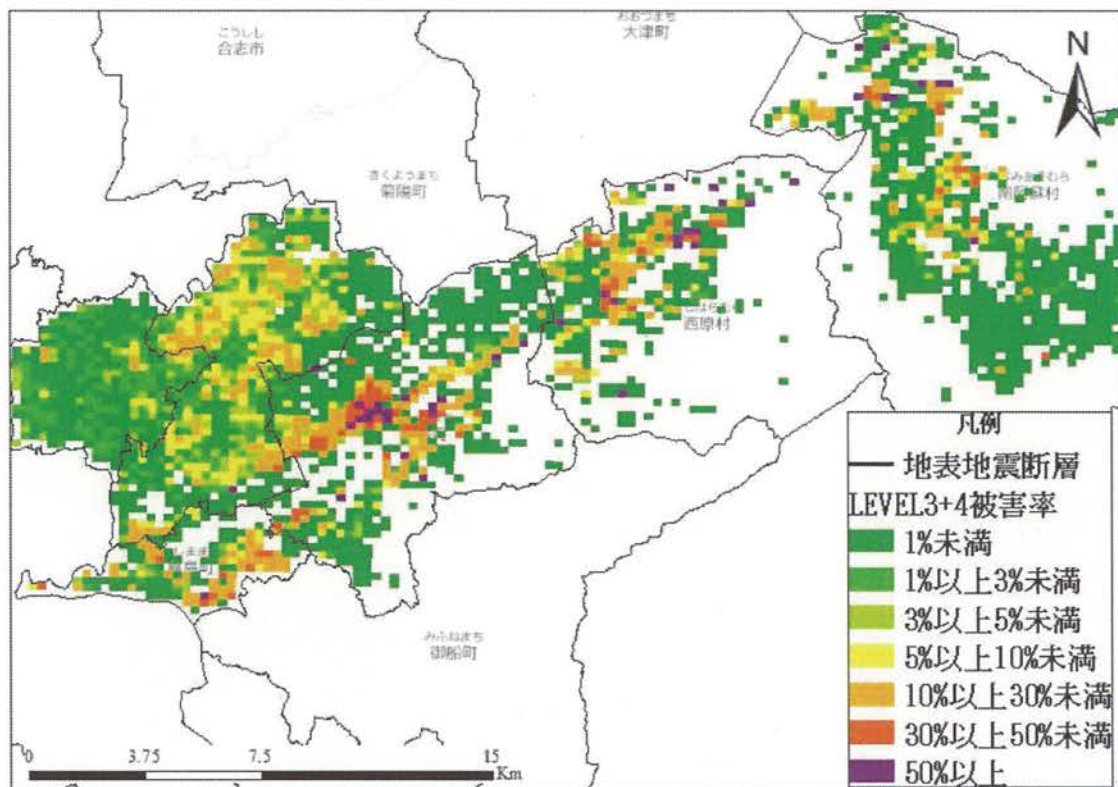


表 6.1 航空写真判読による被害区分 <sup>68)</sup>

被害区分	航空写真上の特徴	岡田・高井 <sup>9)</sup> との対応
LEVEL1 (無被害)	被害なし	D0
LEVEL2 (被害小)	屋根瓦の一部が崩落している。 または、ブルーシート面積が屋根の半分以下。	D1
LEVEL3 (被害中)	屋根瓦の大部分が崩落または壁面が落下している。 または、ブルーシート面積が屋根の半分以上。	D2,D3
LEVEL4 (被害大)	建物が傾斜している、ずれ・ねじれが確認できる。 または、層破壊もしくは倒壊している。 または、DSM高さが本震前後で3m以上変化している。	D4,D5

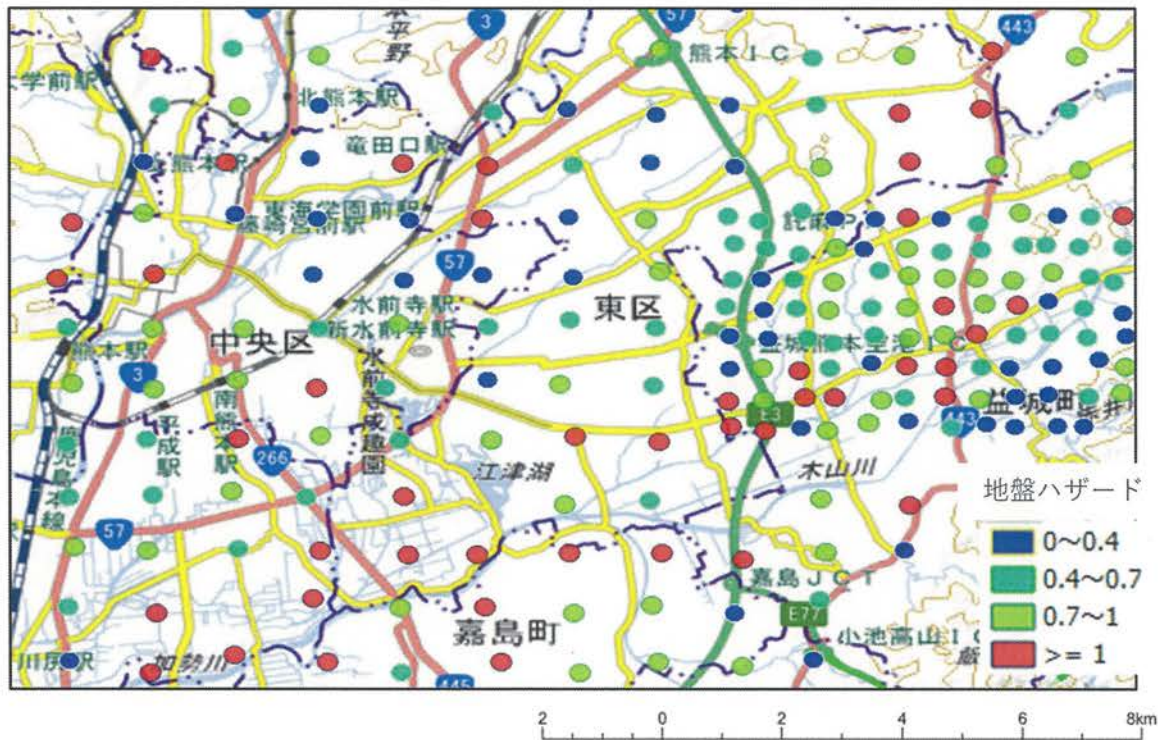


図 6.13 熊本地震被災地での微動による地盤ハザード値



### 6.3.3 地盤ハザード評価と地震被害の比較

比較は、微動観測の間隔などを考慮し、1km メッシュで実施した。建物被害は、木造建物で 2 つの年代区分を対象とし、被害率は (LEVEL3+4/全建物数) から算出した。ただし、建物数が 100 棟未満のメッシュは、データの信頼性が低いとして検討対象外とした。地盤ハザード値は、メッシュ内に複数観測結果がある場合は平均値を採用した。

2016 年熊本地震の木造建物被害率と地盤ハザード値の関係を図 6.15 に示す。図には旧耐震 (1978 以前) の建物を用いた被害率と新耐震 (1979 年以降) の建物を用いた被害率を併記している。旧耐震の建物の場合、全体にばらつきが大きい为正の相関が確認で、相関係数は 0.33 となる。新耐震の建物の場合、地盤ハザード値に関わらず全体に被害率が小さい。

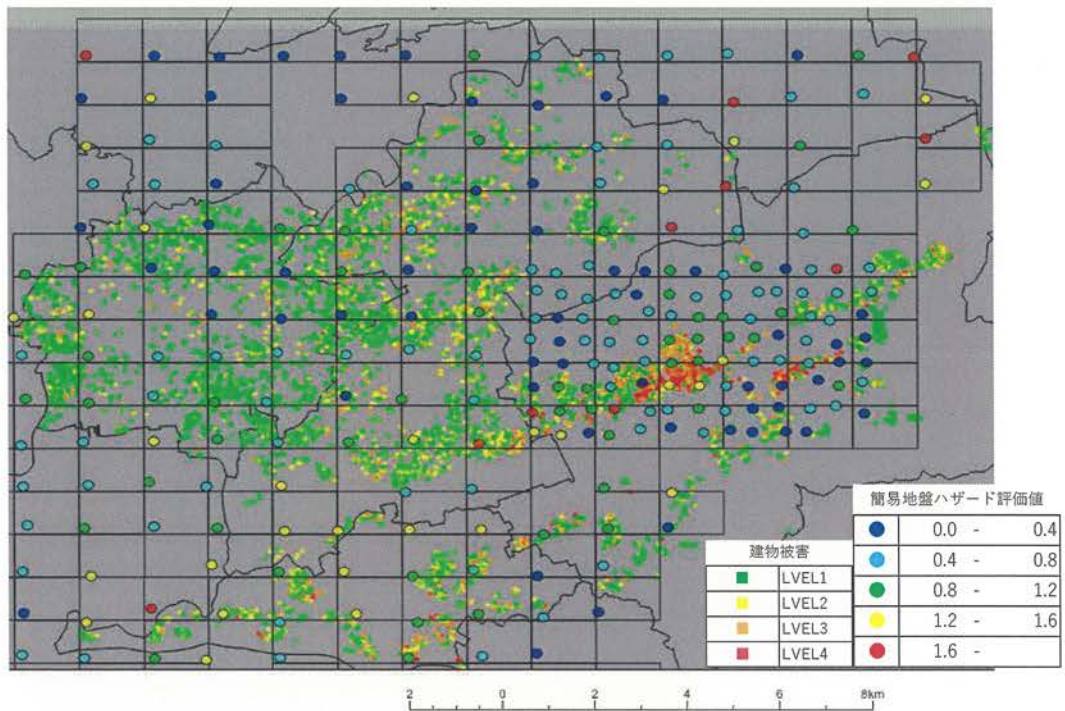


図 6.14 2016 年熊本地震の全壊率と地盤ハザード値の分布

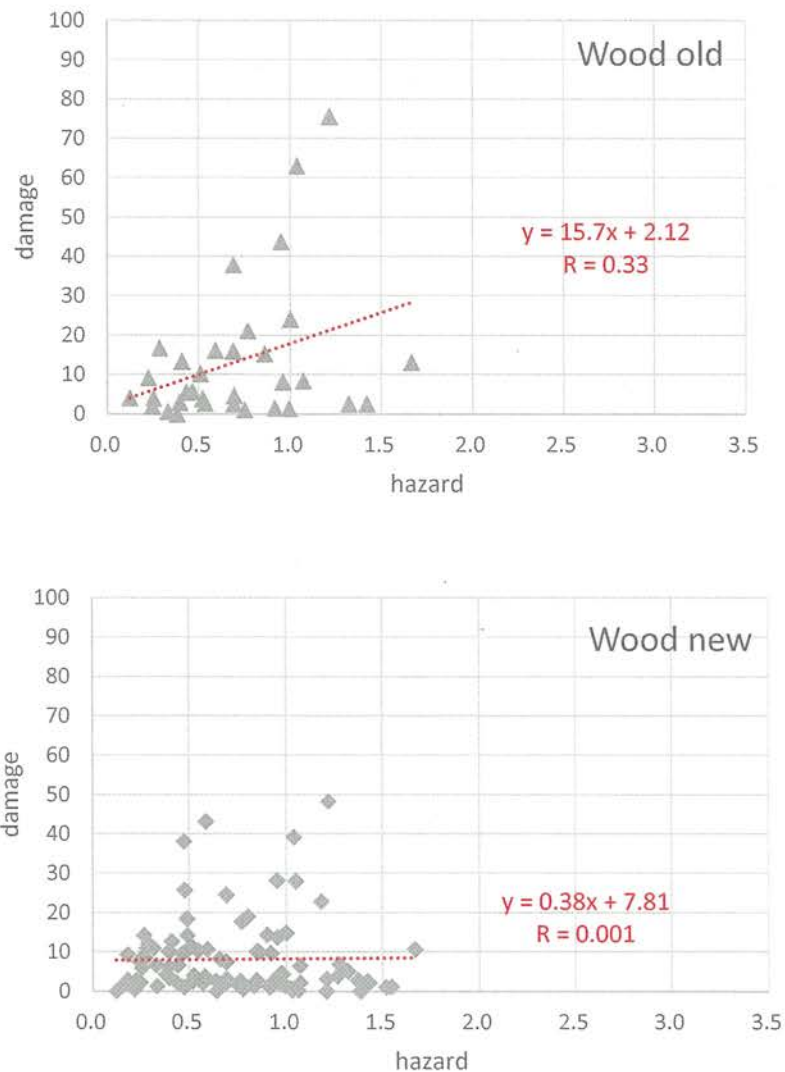


図 6.15 2016 年熊本地震の建物被害率と地盤ハザード値の関係  
(上：旧耐震（1978 年以前）、下：新耐震（1979 年以降）)

#### 6.3.4 地震動強さを考慮した比較

図 6.15 のデータに対し、地震動強さ（計測震度が 6.5 以上と未満）に分けて同様の関係を整理した（図 6.16、図 6.17）。計測震度が 6.5 未満の場合、旧耐震の建物は全体に被害率が小さくなり、相関係数は 0.24 と地震動強さにより区分しないデータに比べるとやや小さくなる。新耐震の建物は、地震動強さにより区分しないデータと同様に地盤ハザード値に関わらず全体に被害率が小さい。一方、計測震度 6.5 以上では、データ数が少ないものの旧耐震、新耐震ともに地盤ハザード値と建物被害の相関が高い。相関係数は、旧耐震で 0.96、新耐震で 0.51 となる。

参考に、木造家屋別の建物被害関数の検討事例を図 6.18 に示す<sup>69)</sup>。図によると、旧耐

震（1978年以前）の建物の被害関数をみると（図 6.18 の(2)）、計測震度 6.5 では被害率が 40~60%となる。一方で計測震度が 6.5 未満であると被害率は 20%程度となり、本検討結果と整合的である。

また、同様に 1979 年以降の被害関数は図 6.18 の(3)となり、計測震度 6.5 未満ではほとんど被害は発生せず、6.5 以上でも被害率は 20%程度である。本検討結果でも、計測震度 6.5 未満ではほとんど被害が発生せず、6.5 以上でばらつきが大きいものの被害率が 20%程度となっていることと整合している。

これらの結果を踏まえて、地盤ハザード値を用いた建物被害評価の適用性について整理し、表 6.2 に示す。1978 年以前の旧耐震の木造建物に対しては、地震動強さが小さい地域ではややばらつきが大きくなるものの、概ね地盤ハザード値の大きさと建物被害は整合的である。一方で 1979 年以降の新耐震の木造建物では、計測震度が小さいとその被害はほとんど発生しない。一方で、計測震度が 6.5 を超えるような大きな震度の地域では、地盤ハザード値の大きさと建物被害は整合的である。

ただし、本検討は熊本地震に限られた地域での結果であり、今後他の地震や地域での整合性などを確認する必要がある。

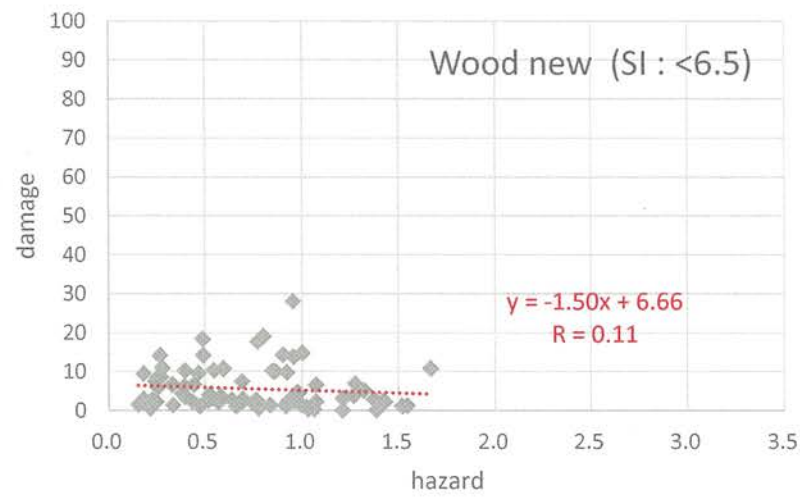
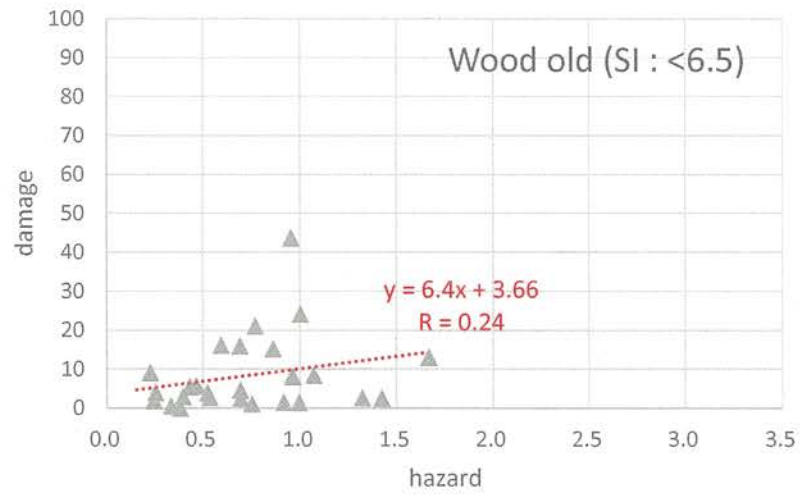


図 6.16 M6.5 未満の 2016 年熊本地震の建物被害率と地盤ハザード値の関係  
(上：旧耐震（1978 年以前）、下：新耐震（1979 年以降）)

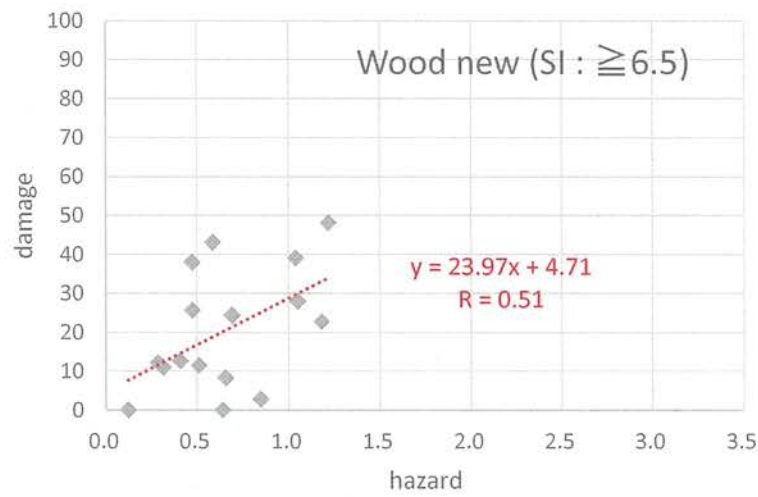
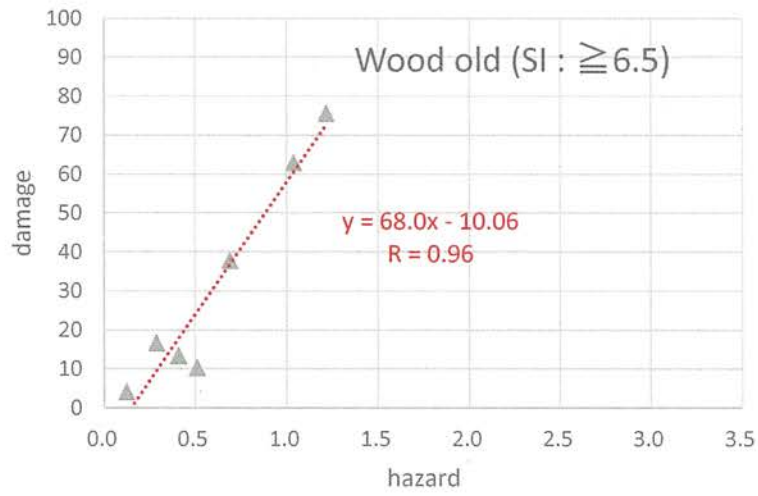


図 6.17 M6.5 以上の 2016 年熊本地震の建物被害率と地盤ハザード値の関係  
 (上 : 旧耐震 (1978 年以前)、下 : 新耐震 (1979 年以降))

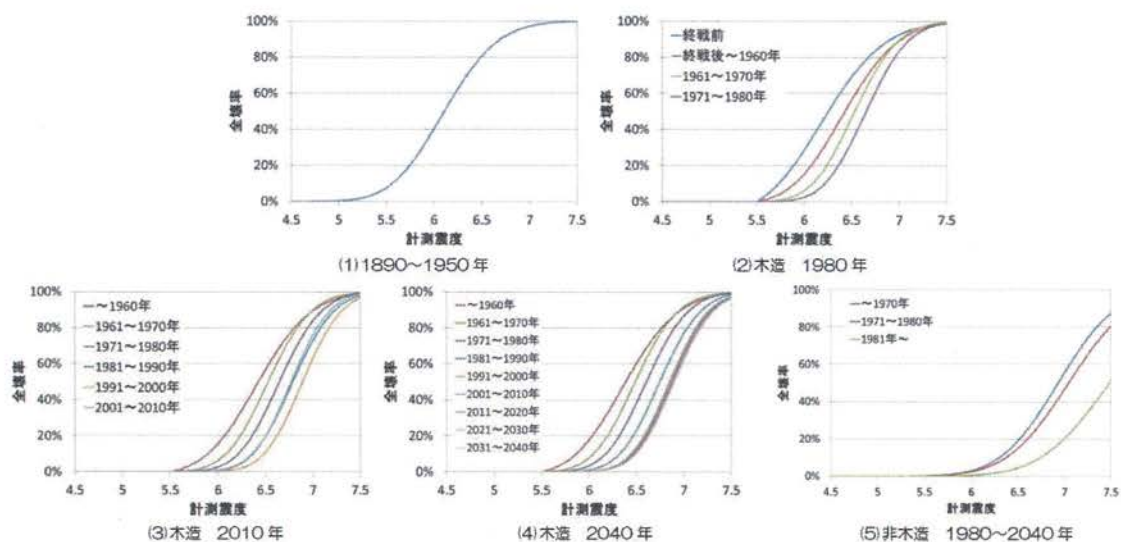


図 6.18 住宅の年代別被害関数<sup>69)</sup>

表 6.2 地盤ハザード値を用いた建物被害評価の適用性

	旧耐震の 戸建て木造	新耐震の 戸建て木造
地震動強さ非区分	○	×
地震動強さ大 (計測震度 6.5 以上)	○	○
地震動強さ小 (計測震度 6.5 未満)	△	×

※旧耐震は 1978 年以前、新耐震は 1979 年以降

#### 6.4 現在提案されている他の評価指標との比較

地盤の面的評価として、全国で統一した基準で評価され比較的多くの検討で用いられている J-SHIS<sup>36)</sup>による地盤増幅特性と建物被害との関係を整理し、本手法との比較を行った。J-SHIS による地盤増幅率は 250m メッシュで提供されているが、今回の比較は 1km メッシュで実施しているため、地盤増幅率は 1km メッシュ内の平均値を用いている。比較は、図 6.6 の 1923 年関東地震と図 6.15 の 2016 年熊本地震で実施した。1923 年関東地震の比較を図 6.19 に、2016 年熊本地震の比較を図 6.20 に示す。図には比較のために微動による結果の図を再掲している。

本手法を用いた場合と既往の J-SHIS を用いた地盤増幅率を用いた場合を比較すると、建物被害との関係は前者の相関係数が高く、その適用性を確認できた。

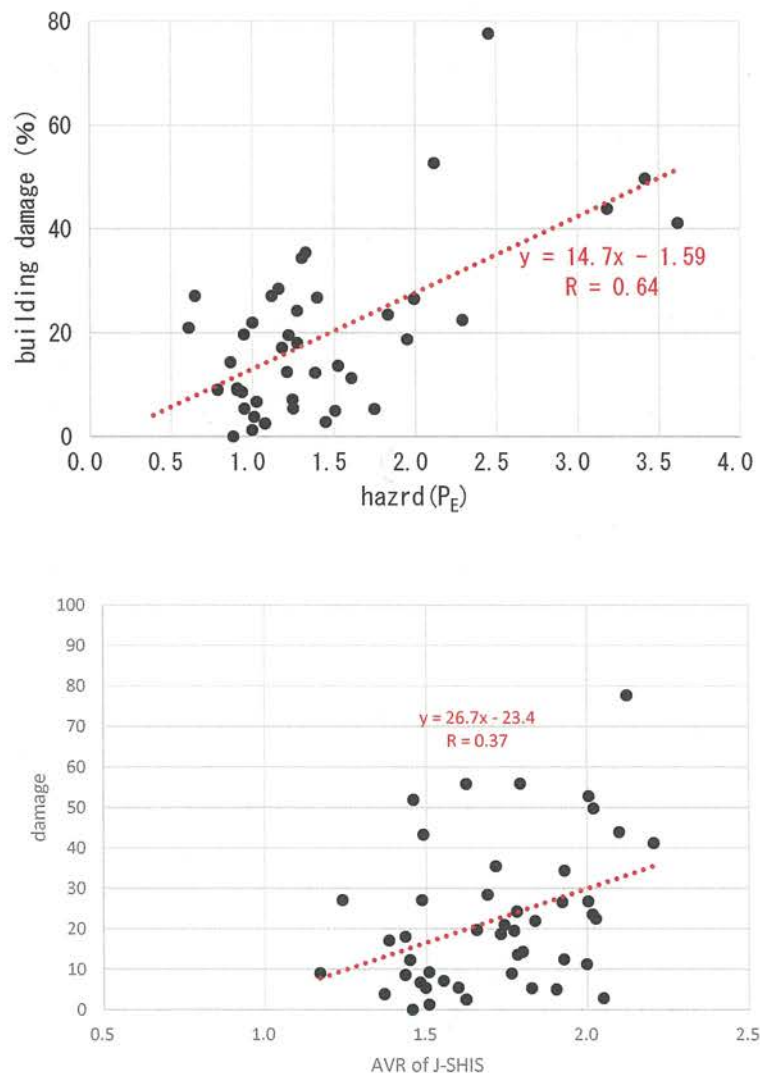


図 6.19 単点微動による地盤ハザード値と建物被害（上：再掲）と J-SHIS による地盤増幅率（AVR）と建物被害（下）の比較（1923 年関東地震）

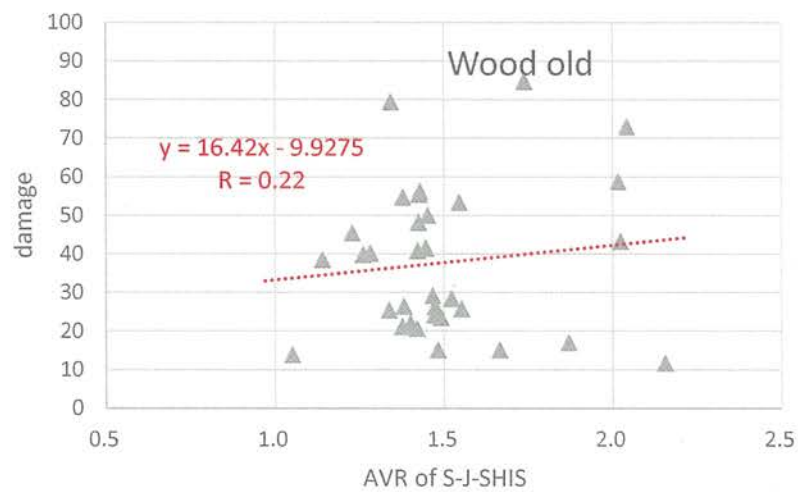
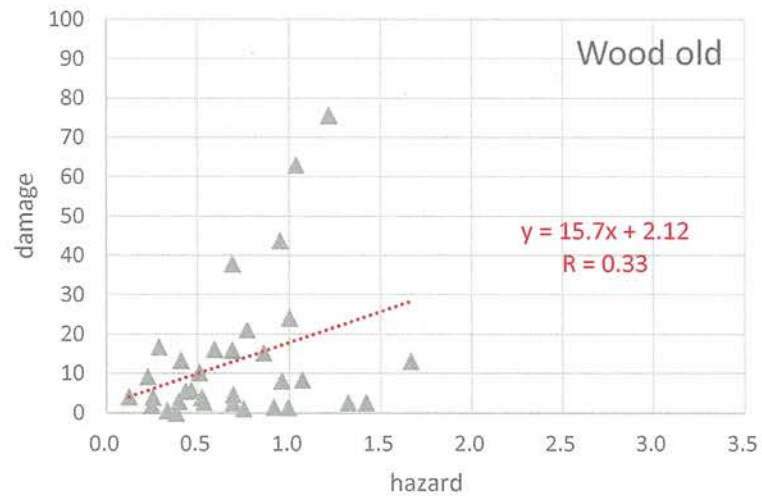


図 6.20 単点微動による地盤ハザード値と建物被害（上：再掲）と J-SHIS による地盤増幅率（AVR）と建物被害（下）の比較（2016 年熊本地震）



## 6.5 まとめ

本章では、過去の被害地震（1923 年関東地震、1974 年伊豆半島沖地震）や近年の被害地震である 2016 年熊本地震を対象に、地震被害と地盤ハザード値の比較を行った。結果を以下にまとめる。

- いずれの地震でも、ばらつきはあるものの地盤ハザード値が大きくなると地震による建物被害は大きくなる。
- 熊本地震のみでの検討であるが、地震動強さが大きな地域（計測震度 6.5 以上）では、特に地盤ハザード値と建物被害の相関性が高い。
- これらの結果から、地盤ハザード値を用いた建物被害評価の適用性を整理した表をまとめた。
- 本手法を用いた場合と既往の J-SHIS を用いた地盤増幅率を用いた場合を比較すると、建物被害との関係は前者の相関係数が高く、その適用性を確認できた。

# 第 7 章

## 第7章 結論

本論文では、主に広域での防災・減災のための利活用を目的に、単点微動観測結果である H/V スペクトル比を用いた新たな地盤ハザード評価手法を提案した。

第 1 章では、まず研究背景と目的について整理した。研究背景では、「サイト増幅特性の重要性」、「近年の地震活動の状況」、「微動研究の進展と活用」に分けて、それぞれの状況を整理した。また、常時微動に関する既往研究として、常時微動全体の既往研究の概要と微動の理論的背景の最新の知見を整理した。また、本論文でも基本とした手法である、単点微動 H/V スペクトル比を用いた地盤評価の研究について、いくつかの事例を挙げてまとめた。これらの成果から、本論文の位置づけと目的を以下のように明確にした。

- ・地震防災を考えるうえでサイト増幅特性を把握することは重要である
- ・近年は地震活動が活発化しており、広域を対象としてサイト増幅特性から地震ハザードを評価するためには、安価で簡便な手法の開発が必要である

第 2 章では、具体的な地盤ハザード評価手法の提案を行っている。建物被害を評価するためには、現在の耐震理論ではエネルギーの釣り合いを考慮した地震動評価指標が採用されている。このことに配慮しつつ地盤ハザードの評価が必要である。一方で、地震防災のために広域評価での適用を目的としているため、簡便に評価できることが重要である。これらの考えに基づき、単点微動 H/V スペクトル比の卓越周期とピーク値を乗じたものを地盤ハザード値と定義し提案した。

また、合わせて主な研究対象地である神奈川県地形・地質を整理した。具体的には、紙ベースの資料をスキャニングし、GIS を用いて詳細なデジタルデータとすることで、以降の比較検討のベースとなるデータが整理できた。

第 3 章では、微動による地盤の卓越周期評価と課題として、筆者がこれまで実施してきた単点微動の卓越周期を用いた地盤評価について、「神奈川県中央部」、「横浜市」、「神奈川県東部」の 3 つの地域に関する結果を整理した。

神奈川県中央部の検討では、定点連続観測で微動 H/V スペクトル比の安定性を確認するとともに、卓越周期分布からのマイクロゾーニングが地形や地震被害と整合的であったことを確認した。横浜市の検討では、250m 間隔と非常に詳細にかつ横浜全域と広範囲の単点微動観測を行い、詳細な卓越周期分布図を整理した。神奈川県東部の検討では、地形発達史を考慮した地形区分毎に微動の卓越周期と堆積層厚を整理し、その関係性が地形区分毎に異なる特性があることを確認した。

これらの結果から、単点微動による地盤の卓越周期評価の有用性は確認できた。

第 4 章では、表層地盤モデルを用いた数値解析を用いた検討として、SH 波伝達関数と

SI 値の関係や単点微動 H/V スペクトル比と SH 波伝達関数の関係を整理した。

3 種類の地盤モデル (2 層モデル (16 ケース)、3 層モデル (208 ケース)、実地盤モデル (42 ケース)) を対象に、位相特性が異なる 6 波の入力地震動を用いた地震応答解析を実施した。その結果から、SH 波伝達関数による地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) とスペクトル強度 (SI 値) を算出し、両者を比較した。 $P_{E-SH}$  が 4 を超えると関係性の傾きが変わるものの、いずれの地震動でも正の相関性が確認できた。なお、既往の検討から SI 値は木造建物などの被害と高い相関性があることが確認されている。

また、実地盤モデルの 42 地点で、単点微動観測を行い H/V スペクトル比を算出した。地盤モデルを用いた数値解析による SH 波伝達関数による地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) と、実測である単点微動 H/V スペクトル比による地盤ハザード値 ( $P_E$ ) を比較した。両者は良い相関があり、相関係数も 0.85 以上と高いことが確認できた。

結果を整理すると、まず SH 波伝達関数による地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) と建物被害と相関が高い SI 値で正の相関が確認できた。一方で SH 波伝達関数による地盤ハザード値 ( $P_{E-SH}$ ) と単点微動 H/V スペクトル比による地盤ハザード値 ( $P_E$ ) も良好な相関が確認できた。すなわち、微動を用いた地盤ハザード値 ( $P_E$ ) は、建物被害と相関がある SI 値と相関が高く、 $P_E$  を使うことで直接建物被害の地盤ハザードを評価できる可能性があることが示唆された。

第 5 章では、強震記録の比較と横浜市全域の地盤ハザード評価を行った。

まず、横浜市の 42 か所の強震観測地点の単点微動観測記録と強震記録を比較した。強震観測記録は、近年の 13 地震を対象とした。比較は、地盤ハザード値の算出で用いる卓越周期とそのピーク値とし、両者とも良好な相関性が確認できた。

また、横浜全域の約 5700 地点を対象に、単点微動を用いた地盤ハザード値 ( $P_E$ ) を求めた。結果を横浜市地震被害想定で用いている AVS30 (地下 30m までの平均 S 波速度で一般的な地盤の揺れやすさに用いられる) と比較を行った。AVS30 が小さい (地盤が悪い) 河川沿いや埋立地盤では  $P_E$  は大きく、AVS30 が大きな丘陵地などでは  $P_E$  は小さくなる傾向を示し全体の特徴がよく一致した。

第 6 章では、地震被害を用いた適用性の確認として、過去の被害地震 (1923 年関東地震と 1974 年伊豆半島沖地震)、近年の被害地震として 2016 年熊本地震を対象とした検討を行った。

過去の被害地震では、建物被害のデータ精度などがやや不明確であるものの、1923 年関東地震や 1974 年伊豆半島沖地震の建物被害と地盤ハザード値は良い整合性が確認できた。また、両地震の結果も整合的であった。

2016 年熊本地震での検討では、建物被害データや地震動強さの違いを考慮した検討も試みた。その結果、旧耐震 (1978 年以前) の木造建物に対しては、地盤ハザード値と建

物被害の関係は、地震動強さによらず概ね整合的な結果であることが確認できた。一方で、新耐震（1979 年以降）の木造建物は、地震動強さが小さいとそもそも建物被害がほとんど発生しないことなどが確認できた。一方で、地震動強さが大きい（計測震度 6.5 以上）地域であれば、旧耐震と同様な傾向が確認できることが分かった。

また、本手法を用いた場合と既往の J-SHIS を用いた地盤増幅率を用いた場合を比較すると、建物被害との関係は前者の相関係数が高く、その適用性を確認できた。

これらの結果から、本論文で提案する単点微動を用いた地盤ハザード値は、広域な地盤評価を行うことの有効性が確認できた。また熊本地震のみの結果からではあるが、比較的古い建物を対象とする場合、あるいは地震動強さが大きな地域を対象とした場合、特に有効性が高いことが確認できた。

## 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：強震動の基礎 ウェブテキスト 2000 版、  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/gk/publication/index.html> (参照 2021.07.28)
- 2) 福島康宏、長尾毅：サイト増幅特性のばらつきを考慮した強震動のばらつき、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.75、No.4 (地震工論文集第 38 巻)、I\_763-I\_769、2019
- 3) 内閣府：我が国で発生する地震、  
<http://www.bousai.go.jp/jishin/pdf/hassei-jishin.pdf> (参照 2021.07.28)
- 4) 物理探査学会・地震防災研究会：微動探査の国際展開のための標準化に関するシンポジウム発表資料集、微動探査の国際展開のための標準化に関するシンポジウム、2021
- 5) Kiyoshi Kanai and Teiji Tanaka: On microtremors VIII., Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol.39, pp.97-114, 1961
- 6) 日本建築学会 構造委員会 振動運営委員会 地盤震動小委員会：第 17 回地盤震動シンポジウム 微動の工学的利用について-その現状と可能性-、1989
- 7) 堀家正則：微動の研究について、地震、第 2 輯、第 46 巻、pp.343-350、1993
- 8) 瀬尾和大：地震時の地盤震動特性評価のための微動の活用に関する研究、平成 5 年度～平成 7 年度科学研究費補助金〔試験研究 (B) (1)〕研究成果報告書、1997
- 9) 日本地震工学会 微動利用技術研究委員会：微動の利用技術、2011
- 10) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地層の地震動特性の推定、鉄道総研報告、pp.18-27、1988
- 11) Yutaka Nakamura: A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, QR of RTRI, Vol.30, No.1, 1989
- 12) 中村豊：H/V スペクトル比の基本構造、物理探査学会地震防災シンポジウム、2008
- 13) 時松孝次、宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第 439 号、pp.81-87、1992
- 14) 塩野計司、太田裕、工藤一嘉：やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (6) -微動に含まれる Rayleigh 波成分-、地震、第 2 輯、第 32 巻、pp.115-124、1979
- 15) 堀家正則：微動の位相速度及び伝達関数の推定、地震第 2 輯、第 33 巻、pp.425-442、1980
- 16) 落合努、荏本孝久、先名重樹：2019 年 6 月山形県沖の地震の被害と地盤振動特性の検討、第 45 回地盤震動シンポジウム 地盤震動研究の現状を聞く-現在進行中の地盤震動研究-、pp.49-52、2020
- 17) Sánchez-Sesma, F.J., M. Rodríguez, U. Iturrarán-Viveros, F. Luzón, M. Campillo, L. Margerin, A. García-Jerez, M. Suarez, M.A. Santoyo and A. Rodríguez-Castellanos: A theory for microtremor H/V spectral ratio: Application for a layered medium,

- 
- Geophysical Journal International Express Letters, Vol. 186, Issue 1, pp. 221-225, 2011.
- 18) Kawase, H., F.J. Sánchez-Sesma and S. Matsushima: The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Structure Inversions Based on Diffuse Field Theory for Plane Waves, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 5 pp. 2001-2014, 2011.
- 19) 森勇太・川瀬博・松島信一・長嶋史明：微動と地震動の観測水平上下スペクトル比の相違とそれに着目した地盤構造同定手法の提案，日本地震工学会論文集，第16巻，第9号，pp.13-32，2016.
- 20) Kawase, H., F. Nagashima, K. Nakano, Y. Mori: Direct Evaluation of S-wave amplification factors from microtremor H/V ratios: Double empirical corrections to “Nakamura” method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 26, 2019.
- 21) 大町達夫、紺野克昭、遠藤達哉、年縄巧：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、No.489/I-27、pp.251-260、1994
- 22) 前田俊之、楠木紀男：常時微動より推定した福井平野の表層地盤振動特性-1948年福井地震の被害との対応-、地域安全学会論文集、No.3、pp.147-156、2001
- 23) 年縄巧、高浜勉、中山将史：常時微動測定による横浜市都筑区池辺町地域の軟弱地盤構造の推定、日本地震工学会論文集、Vol. 20、No. 1(特集号)、pp. 26-36、2020.
- 24) 元木健太郎、渡辺哲史、加藤研一、武居幸次郎、山中浩明、飯場正紀、小山信：微動の水平上下スペクトル比のピーク周期に見られる時間および空間変動 -工学的基盤が辺単なサイトにおける観測事例とその解釈-、日本建築学会構造系論文集、第81巻、第721号、pp.437-445、2016
- 25) 落合努：高密度微動観測を用いた相模平野の3次元地盤構造の推定と地盤震動伝播特性に関する研究、神奈川大学大学院工学研究科建築学専攻 修士論文、2001
- 26) 落合努、山本俊雄、服部秀人、荏本孝久：高密度微動観測を用いた相模平野の表層地盤振動特性のゾーニングに関する研究、地域安全学会論文集、No.5、pp.21-26、2003
- 27) Ochiai, T., Enomoto, T.: Development of Detailed Micro-Land Form Database and Amplification Characteristics in Kanagawa Prefecture, Japan, Journal of Geographic Information System, pp.61-81, 2019
- 28) 落合努、栗山利男、橋本光史、荏本孝久、露木延夫、山本俊雄：デジタル詳細地域危険度マップ作成と防災活動支援に関する研究：第13回日本地震工学シンポジウム、pp.2035-2038、2010
- 29) 長橋純男：建築構造物を対象とした設計用入力地震動の強さ、地震、第2輯、第46巻、pp.513-532、1994.
- 30) 加藤勉、秋山宏：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷、日本建築学会論文報告集、第235号、pp.9-18、1975

- 
- 31) 秋山宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1980
- 32) Housner, G. W.: Behavior of structures during earthquake, ASCE, EM4, Oct. Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.85, Issue4, pp.109-130, 1959.
- 33) 落合努、犬伏徹志、荻本孝久：常時微動による地域特性を考慮したハザードマップの作成、日本地震工学会論文集、第19巻、第5号(特集号)、pp.136-145、2019
- 34) 星幸江、丸山喜久、山崎文雄：数値解析に基づく地震動SI値と木造建物被害の関係分析、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.65、No.1(地震工学論文集第30巻)、pp.606-613、2009
- 35) 神奈川県立 生命の星・地球博物館：神奈川県地質図、閲覧日 2021/09/13  
[https://nh.kanagawa-museum.jp/kenkyu/kanagawa\\_chishitsu/chisou/list/chishitsu\\_b.html](https://nh.kanagawa-museum.jp/kenkyu/kanagawa_chishitsu/chisou/list/chishitsu_b.html)
- 36) 防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードステーション、閲覧日 2021/09/13  
<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 37) 荻本孝久、堀川康司、小林大吾、釘宮康郎、沈堅貞、山本俊雄：神奈川県を対象としたデジタル地盤区分図作成に関する研究 その1～4、日本建築学会学術講演梗概集、pp.271-278、2007
- 38) Ochiai, T., Enomoto, T., Yamamoto, T. and Abeki, N.: Study on the Seismic Microzonation in Sagami Plain Using Spatially Dense Microtremor Measurement, 7th International Joint WorkShop on Seismic Microzonation and Risk Reduction, pp.213-224, 2009.
- 39) 中島康雅、精木紀男、渡邊大輔、柳川克也：短周期微動の時間変動性と空間変動性に関する検討、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.841-844、1994
- 40) 山本俊雄、荻本孝久、服部秀人、岩楯徹広：短周期微動を用いたH/Vスペクトルの長期時間変動と安定性、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.385-391、2002
- 41) 地盤工学会関東支部神奈川県グループ：大いなる神奈川の地盤 その生い立ちと街づくり、技報堂出版株式会社、2010
- 42) 新保寛、翠川三郎：1923年関東地震における神奈川県での木造家屋の被害分布と表層地質の関係、地域安全学会論文集、No.3、pp.109-116、2001
- 43) Ochiai, T. and Enomoto, T.: Analysis on Predominant Periods Distribution by Microtremor Observations for Seismic Disaster Prevention in Yokohama, Japan Using GIS, Journal of Geographic Information System, Vol. 11, No.5, pp. 579-594, 2019
- 44) 上野直洋、荻本孝久、山本俊雄：GISによる横浜市高密度微動観測結果の卓越周期分布の整理・検討、第13回日本地震工学シンポジウム、pp.2011-2018、2010
- 45) 海津正倫：日本における沖積低地の発達過程、地理学評論、Vol. 54, No. 3, pp. 142-160, 1981
- 46) 国土調査：20万分の1土地情報分類基本調査GISデータ、表層地質図(神奈川県)、閲覧日 2021/09/13、<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html>



- 
- 47) 松田磐余：対話で学ぶ江戸東京・横浜の地形、之潮、2013
- 48) 横浜市：横浜市行政地図情報提供システム、地盤 View、2021、閲覧日 2021/09/13  
<https://www.city.yokohama.lg.jp/yokohama/Portal?mid=3>
- 49) 川崎市：ガイドマップかわさき、地質図集、2021、閲覧日 2021/09/13  
<http://kawasaki.geocloud.jp/webgis/?p=1>
- 50) 横浜市環境科学研究所：横浜市地盤環境調査報告書、2003
- 51) 年縄巧、高浜勉、中山将史：常時微動測定による横浜市都筑区池辺町地域の軟弱地盤構造の推定、日本地震工学会論文集、Vol.20、No.1(特集号)、pp.26-36、2020
- 52) 小嶋啓介、山中浩明：常時微動観測に基づく福井平野の第四紀層構造の推定、土木学会論文集、No.752/I-66、pp.217-225、2004
- 53) 横浜市総務局：強震計ネットワーク、2021、閲覧日 2021/09/13  
<https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/bousai-kyukyu-bohan/bousai-saigai/bosai/jishinjoho/eq.html>
- 54) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET、KiK-net)、2021、閲覧日 2021/09/13、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin>
- 55) 地震調査研究推進本部：関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル(2017年版)、2017、閲覧日 2021/09/13  
[https://www.jishin.go.jp/evaluation/strong\\_motion/underground\\_model/integration\\_model\\_kanto](https://www.jishin.go.jp/evaluation/strong_motion/underground_model/integration_model_kanto)
- 56) 荏本孝久、石井匠、山本俊雄、杉本実：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、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.87-88、2006
- 57) 東京都都市整備局：あなたのまちの地域危険度、2018
- 58) Ochiai, T. and Enomoto, T.: Multi-Hazard Evaluation Using Cluster Analysis -for Designated Evacuation Centers of Yokohama, Journal of Geographic Information System, Vol. 13, No.2, pp. 243-259, 2021
- 59) 防災科学技術研究所：自然災害情報室、関東大震災の概要、閲覧日 2021/09/13  
<https://dil.bosai.go.jp/disaster/1923kantoeq/kaisetsu.html>
- 60) 武村雅之：関東大震災 大東京圏の揺れを知る、鹿島出版会、2005
- 61) 高浜勉、翠川三郎：1923年関東地震による横浜市での木造家屋の被害分布 その2 横浜市南西部での調査結果と地盤条件との関係、土木学会地震工学論文集、第27巻、pp.0021(1-8)、2003
- 62) 気象庁 震度データベース検索、1974年5月9日 8:33:27.7、閲覧日 2021/09/13  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>
- 63) 望月利男、国井隆弘、松田磐余、田村俊和：1974年伊豆半島沖地震調査報告(主として地震断層、加速度分布および地盤と家屋被害の関係)、土の基礎、pp.53-61、1974
- 64) 気象庁：気象庁技術報告 第135号 平成28年(2016年)熊本地震調査報告、2018

- 
- 65) 日本建築学会：2016年熊本地震災害調査報告書、2018
- 66) 土木学会：2016年熊本地震被害調査報告書、2017
- 67) 国土技術政策総合研究所、建築研究所：平成28年(2016年)熊本地震建物被害調査報告(速報)、2016
- 68) 内藤昌平、門馬直一、中村洋光、藤原広行、下村博之、山田哲也：航空写真目視判読にもとづく2016年熊本地震による建物被害調査、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.74、No.4(地震工学論文集第37巻)、pp. I\_464-1\_480、2018
- 69) 清水智、小丸安史、若浦雅嗣、藤原広行、中村洋光、森川信之、早川譲：1890年~2040年の地震の揺れによる住宅全壊リスクの変遷、日本地震工学会論文集 第16巻、第1号(特集号)、pp.258-273、2016

## 本論文に関連した査読付き論文リスト

### 【第2章】

- 落合努、犬伏徹志、荻本孝久：常時微動による地域特性を考慮したハザードマップの作成、日本地震工学会論文集、Vol.19、No.5、pp.5\_136-5\_145、2019.
- Ochiai, T. and Enomoto, T.: Development of Detailed Micro-Land Form Database and Its Application to Site Amplification Characteristics in Kanagawa Prefecture, Japan., Journal of Geographic Information System, Vol. 11, No.1, pp. 66-81, 2019.

### 【第3章】

- 落合努、山本俊雄、服部秀人、荻本孝久：高密度微動観測を用いた相模平野の表層地盤振動特性のゾーニングに関する研究、地域安全学会論文集、No.5、pp.21-26、2003.
- Ochiai, T. and Enomoto, T.: Analysis on Predominant Periods Distribution by Microtremor Observations for Seismic Disaster Prevention in Yokohama, Japan Using GIS, Journal of Geographic Information System, Vol. 11, No.5, pp. 579-594, 2019.
- 落合努、荻本孝久、松田磐余：地形発達史が異なる地形区の常時微動 H/V スペクトル比と堆積層厚の関係 ハザードマップに常時微動を適用するための一考察、日本地震工学会論文集、Vol.21、No.5、pp.1-12、2021.

### 【第4章】

- Ochiai, T. and Enomoto, T.: Study on hazard evaluation method for surface ground using response spectrum, 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, C000582, 2021.
- 落合努、張海仲、荻本孝久：表層地盤増幅率のハザード評価手法の提案 -SH 波伝達関数と応答スペクトル増幅率の関係-、土木学会論文集、2021（投稿中）

### 【第5章】

- Ochiai, T. Inubushi, T. and Enomoto, T.: Creation of Hazard Maps by Considering Regional Characteristics by Microtremors, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.20, No.8, pp.19-31, 2020.
- Ochiai, T. and Enomoto, T.: Multi-Hazard Evaluation Using Cluster Analysis -for Designated Evacuation Centers of Yokohama, Journal of Geographic Information System, Vol. 13, No.2, pp. 243-259, 2021.

### 【第6章】

- Ochiai, T., Enomoto, T., Oda, Y., Miyano, M., Ikuta, E. and Manuel N.: Comparison of house damage and microtremor results in past earthquakes, 14th the Society of Exploration Geophysicists of Japan International Symposium, DM-P-03, 2021.

## 本論文に関連した口頭発表論文リスト

### シンポジウム

- 1) Ochiai, T., Enomoto, T., Abeki, N. and Maeda, T.: Seismic Micro-zonation of Predominant Period of Ground in Sagami Plain Using H/V Spectral Ratio, 6th International Conference on Seismic Zonation, II-22B, 2000.
- 2) Ochiai, T., Enomoto, T., Yamamoto, T. and Abeki, N.: Study on the Seismic Microzonation in Sagami Plain Using Spatially Dense Microtremor Measurement, 7th International Joint WorkShop on Seismic Microzonation and Risk Reduction, pp.213-224, 2009.
- 3) 落合努、栗山利男、橋本光史、荏本孝久、露木延夫、山本俊雄：デジタル詳細地域危険度マップ作成と防災活動支援に関する研究：第13回日本地震工学シンポジウム、pp.2035-2038、2010.
- 4) 落合努、先名重樹、馬赫、犬伏徹志、荏本孝久：常時微動を用いた浅部地下構造探査による地盤構造の推定 -秦野盆地を対象として-、第14回日本地震工学シンポジウム、pp.3017-3024、2014.
- 5) 落合努、犬伏徹志、荏本孝久：常時微動観測による地域特性を考慮したハザードマップの作成、第15回日本地震工学シンポジウム、pp.2150-2157、2018.
- 6) 落合努、荏本孝久、先名重樹：2019年6月山形県沖の被害と地盤震動特性の検討、第48回地盤震動シンポジウム 地盤震動研究の現状を聞く、pp.49-52、2020.

その他学会発表

- 1)落合努、荏本孝久、精木紀夫：長岡平野における微動観測と地盤震動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.269-270、1999.
- 2)前田俊之、前田直樹、精紀男、正木和明、荏本孝久、落合努、村山秀幸、中島康雅：屈折法探査による座間－平塚測線の地下構造調査、地球惑星科学関連学会合同大会予稿集、Sg-P006、2000.
- 3)荏本孝久、落合努、笠谷学、柳川克弥、精木紀男：ベネズエラ・カラカス市における地震災害危険度評価に関する研究 -微動観測に基づく地盤の周期特性と建物被害に関する基礎的検討-、日本建築学会学術講演梗概集、pp.262-270、2000.
- 4)落合努、荏本孝久、精木紀男、前田俊之：相模平野における高密度微動観測 -その1 平塚市を対象とした結果-、日本建築学会学術講演梗概集、pp.259-260、2000.
- 5)前田俊之、精木紀男、荏本孝久、落合努：相模平野における高密度微動観測 -その2 茅ヶ崎市・寒川町を対象とした結果-、日本建築学会学術講演梗概集、pp.261-262、2000.
- 6)落合努、荏本孝久：常時微動観測とボーリングデータの比較 -東京都内3地点について-、全地連技術 e-フォーラム 2004、39、2004
- 7)落合努、杉本実、露木延夫、山本俊雄、荏本孝久：表層の地盤情報抽出を目的とした高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.93-94、2006.
- 8)落合努、山本俊雄、露木延夫、荏本孝久：横浜市青葉区における高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.253-254、2007.
- 9)落合努、山本俊雄、露木延夫、荏本孝久：横浜市神奈川区・西区の高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.929-930、2008.
- 10)山本俊雄、落合努、荏本隆久、ラヒミアンマホモッド：横浜市中区・南区・磯子区・港南区の高密度微動観測による地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.49-50、2009.
- 11)落合努、栗山利男、橋本光史、荏本隆久、山本俊雄：地域の地形に対応した地震防災マップの作成(その4) 地域危険度マップの作成、日本建築学会学術講演梗概集、pp.213-214、2009.
- 12)橋本光史、栗山利男、落合努、荏本隆久、山本俊雄：地域の地形に対応した地震防災マップの作成(その5) AVS30に基づく固有周期と常時微動測定に基づく卓越周期の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.215-216、2009.
- 13)落合努、栗山利男、荏本孝久、山本俊雄：地盤情報データと常時微動観測結果を活用した地盤構造の推定に関する研究 -地盤構造が複雑な地点での常時微動観測の適用-、日本建築学会学術講演梗概集、pp.159-160、2011.

- 14) 荏本孝久、栗山利男、落合努、上野直洋、山本俊雄：微動 H/V スペクトル比による表層地盤震動特性の評価に関する研究 ―卓越周期の推定による地盤増幅率の検討―、地域安全学会梗概集、No.30、2012
- 15) 湯浅暁、荏本孝久、犬伏徹志、落合努：地盤のサイト特性の評価に関する基礎的検討 SH 波の伝達関数とレーリー波 H/V 比による地盤震動特性の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.397-398、2014.
- 16) 木村克己、大井昌弘、花島祐樹、落合努：千葉県沿岸平野域のボーリングデータに基づく高精度浅部地盤モデル、第 50 回地盤工学研究発表会、pp.271-272、2015
- 17) 落合努、井上駿、犬伏徹志、荏本孝久：地域の地盤特性を反映した新しいハザードマップの作成、地域安全学会梗概集、No.40、2017
- 18) 栗山利男、井上駿、荏本孝久、犬伏徹志、落合努、馬赫：単点微動観測に基づく神奈川県域の地盤震動特性評価 その 1 H/V スペクトル比を用いた地盤震動特性情報データベース、日本建築学会学術講演梗概集、pp.325-326、2017.
- 19) 井上駿、荏本孝久、犬伏徹志、落合努、栗山利男、馬赫：単点微動観測に基づく神奈川県域の地盤震動特性評価 その 2 卓越周期・増幅率分布とハザード評価、日本建築学会学術講演梗概集、pp.327-328、2017.
- 20) 落合努、犬伏徹志、荏本孝久：卓越周期と増幅率を用いたハザード評価法の適用性に関する基礎的検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.595-596、2018.
- 21) 落合努、荏本孝久、犬伏徹志：横浜市強震計ネットワークの強震記録と常時微動観測結果の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.513-514、2019.
- 22) 荏本孝久、落合努、犬伏徹志：応答スペクトルによる表層地盤のハザード評価法に関する基礎的研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.617-618、2019.
- 23) 落合努、荏本孝久：2019 年 6 月山形県沖の地震の被災地域における地盤振動特性の検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.107-108、2020.
- 24) 荏本孝久、落合努、栗山利男：応答スペクトルによる表層地盤のハザード評価法に関する基礎的研究 ―その 2. 規則的な多層地盤および不規則な実地盤モデルによる検討―、日本建築学会学術講演梗概集、pp.109-110、2020.
- 25) 落合努、荏本孝久、宮野道雄、生田英輔：過去の地震による家屋被害と常時微動観測結果の比較 その 1 1974 年伊豆半島沖地震を対象として、日本建築学会学術講演梗概集、pp.329-330、2021.
- 26) 荏本孝久、落合努、宮野道雄、生田英輔：過去の地震による家屋被害と常時微動観測結果の比較 その 2 1995 年兵庫県南部地震を対象として、日本建築学会学術講演梗概集、pp.331-332、2021.

## 謝 辞

本論文は、私が大学院で 2001 年に取りまとめた修士論文から今年度の 2021 年まで、20 年間と長期間にわたって継続した研究成果をまとめたものであります。

本論文をまとめるにあたって、神奈川大学工学部建築学科・荏本孝久教授には、研究当初から現在に至るまで研究環境を整えていただくとともに、主査としてご助言をいただきました。また、数多くの現場での観測作業にもご同行いただきました。長期間にわたって継続して研究活動が続けられたのは、荏本先生の元であったからと感じております。ここに、謹んで御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、関東学院大学・松田磐余名誉教授、元神奈川大学・山本俊雄氏、東京都立大学・小田義也教授、近畿大学・犬伏徹志講師には、それぞれの専門分野から貴重なご意見を頂きました。

神奈川大学工学部建築学科・島崎和司教授、趙衍剛教授、藤田正則教授には、論文全般にわたり貴重なご意見を頂きました。同学科の白井佑樹助教、張海仲助教、中村慎助手、佐藤宏貴氏には、近い世代や立場の研究者として良い刺激を与えていただきました。特に張海仲助教は、専門分野が近いものの全く異なるアプローチで研究を行っている研究者として、鋭い質問やご助言を頂きました。

また、大学院を修了したのちの最初の職場である株式会社東建ジオテックの方々、その後転職した職場の株式会社構造計画研究所の方々には、仕事をする傍ら研究活動の継続を温かく認めていただきました。特に、構造計画研究所の栗山利男氏には、幅広い視点でのさまざまなご助言をいただきました。

そして、神奈川大学荏本研究室の卒業生、在校生の皆様には、多くの地点での微動観測やそのデータ整理など、多大なるご協力をいただきました。特に、馬赫博士（工学）、井上駿修士（工学）が整理した微動観測のデータを使用させていただきました。

その他、お世話になった全員の名前を挙げることはできませんが、多くの方々の協力により本論文のとりまとめが出来ました。心から御礼申し上げます。

最後に、研究活動で外出する機会が多い中、温かく協力してくれた妻と 2 人の愛娘に深く感謝します。ありがとうございました。

2021 年 1 月 落合 努

