

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420486

研究課題名(和文) 顕著な不整形地盤上に立地する都市における南海地震の地震動予測 - 高知市に着目して -

研究課題名(英文) Simplified Ground Modeling of Central Kochi City for Nankai Megathrust Earthquakes

研究代表者

三神 厚 (MIKAMI, ATSUSHI)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：10262122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：簡易な地盤調査との精度のバランスを考えた地盤モデル化手法を、高知市に適用した。高知市中心部の約70地点で常時微動観測を行い、地盤の卓越振動数を推定した。それをもとに簡易な地盤モデルを構築し、擬似3次元的に固有値解析を行った結果、軟弱地盤が厚く堆積する場所で顕著な地盤振動が生じることが確認された。南海トラフを震源とする昭和東南海地震、昭和南海地震について、各地から揺れに関する体験談をそれぞれ約310、350収集し、既存の震源モデルを検証した。その結果、既存の震源モデルは概ね、体験談を説明するものであったが、三重県沖の短周期発生域の位置やサイズなど、やや体験談との整合がとれない部分もあった。

研究成果の概要(英文)：The author proposes a method that combines microtremor measurement and a best-simplified ground model. This study applies the method to Kochi City. The author conducted microtremor measurements at approximately 70 stations in central Kochi and evaluated predominant frequencies. Referring base rock depths from boring, the central area of Kochi plain is modeled by a simplified approach. Eigenvalue analysis shows that 1st mode vibration predominates where deep soft soil sedimentation forms.

To improve the seismic source model, the authors collected about 310 actual accounts of ground shaking for the Showa-Tonankai Earthquake and about 350 accounts for the Showa-Nankai Earthquake to examine proposed fault models.

It was found that testimonies are closely consistent with the models for the Showa-Nankai Earthquake and Showa-Tonankai Earthquake. However, they are also partly inconsistent with the latter model regarding short-period seismic-wave source off-Mie prefecture.

研究分野：地震工学

キーワード：南海地震 高知 不整形地盤 微動 H/Vスペクトル比

## 1. 研究開始当初の背景

2012年8月29日に内閣府より公表された「南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等(第二次報告)及び被害想定(第一次報告)について」によれば、死者は最大で32万人と予測され、そのうち、高知県の死者数は49,000人、全壊・焼失棟数は239,000棟と予測されている。高知県の人口の約4割が集中する高知市は、南海地震の際、最も危険な都市の1つで、迅速で、効率的な地震対策は喫緊の課題である。南海地震は100~150年周期で再来すると言われているが、地震の規模は大きく変動する。規模が大きく、巨大津波となる場合には避難が中心となるが、地震規模が比較的小さく、津波の高さもさほど大きくない場合には、堤防などのインフラで津波を防御することが重要である。昭和南海地震の規模は $M=8.0$ と一連の南海地震の中では比較的小さかった。そのため、入口が狭く奥行きが広い浦戸湾の独特の形状から、高知市における津波高は60cm程度であった(水路局, 1948)。しかしながら、堤防の決壊によって0m地帯が広がる高知市は地震で沈降し、長期にわたり大規模浸水被害に見舞われた。

高知市は鏡川が形成した沖積平野に立地するが、南は鏡川とその支流、北は江ノ口川に囲まれた低湿地で、その基盤構造は顕著な不整形性を示す。昭和南海地震による高知市の震度は概ね5だが、下知など、ある特定の地域では震度6となり、揺れの被害が集中したが、地盤の不整形構造が起因した可能性がある。インフラ整備には、地盤の不整形性を考慮した応答解析により地震動を精度よく予測しておくことが必要である。

広域地盤を取り扱うには、広域の地盤情報が入力として必要である。国土交通省のKuniJibanや各地方整備局単位で統合された地盤情報データベースがあるが、ほとんどの場合はN値であるため、基盤の深さHの推定には使えるが、N値から $V_s$ への変換精度の問題が残る、精度のよい入力データとはならない。申請者が提案する方法は、その実施が容易な地表単点における常時微動観測に基づき、簡易で等価な地盤モデルを構築し(多層地盤のサイト増幅特性を近似できるという意味で等価)、さらに合理的な簡便化により、ウインクラー地盤上の2次元平面として最終的に帰着するモデル化で、3次元動的な波動効果を2次元解析によって擬似的に反映させるものである。簡易な地盤調査のみにより、顕著な地盤の不整形構造を有する高知市の地盤応答解析を所要の精度で実施することができるものとして、本手法を適用するという着想に至った。

## 2. 研究の目的

地表面レベルの地震動を予測するには、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性が必要である。高知市のサイト増幅特性を評価するとともに、南海地震の震源特性も検証し、

基盤入力地震動を評価する。両方の知見を合わせ、高知市全域の揺れの分布を評価することが目標である。

地盤の不整形性を考慮したサイト増幅特性の評価として、三神・小長井(2010)の方法を適用し、不整形地盤のサイト増幅特性を高知市全域で評価する。また、過去の南海地震の証言や被害を利用した震源特性の把握と基盤地震動の評価を行う。

宇佐美による震度推定結果に基づいて震度インバージョンを行い、震源モデルを求める武村・神田の方法は、震度という地震動の強度情報のみを用いているので、最適解として複数の震源モデルが現れる。本研究では、約70年前に南海トラフで発生した巨大地震について、これまでに高知、和歌山、徳島の各地から約300の揺れに関する証言を収集し、蓄積してきた。このような揺れの証言を用いることで、震源モデルの検証が可能である。決定した震源モデルから、基盤レベルの地震動を求め、サイト増幅特性を加味し、揺れの激しくなるエリアを推定する。

本研究は、簡易な地盤調査と3次元効果を考慮できる地震応答解析手法を組み合わせた独創的な手法を不整形構造の発達した高知市の地盤に適用するものである。地震の揺れの分布を把握し、効率的なインフラ整備に結び付けられるものと期待される。

## 3. 研究の方法

まず不整形地盤のサイト増幅特性を把握するための地盤モデルの構築を行う。四国地盤情報データベース等を用いて高知市の基盤構造を把握する。その際、高知地盤図(1992)、甲藤他(1971)などの文献も参考にする。

基盤までの深さHを高知市全域で把握したのち、地表面単点の常時微動観測を実施する。常時微動観測は、概ね、高知市を約500mメッシュでカバーできる程度に実施することを目標とするが、基盤構造が急変する場所(浦戸湾に近づくにつれ基盤は深くなる)ではより密な常時微動観測を実施する。微動調査にあたっては、研究室の学生(谷口純一氏)の協力を得た。K-NET高知、気象台(高知市比島)等、で観測された強震記録のH/Vスペクトル比も併せて利用する。

常時微動のH/Vスペクトル比から地盤の卓越周期Tを得るとともに、地盤情報データベースから基盤までの深さHを得て、 $1/4$ 波長則 $T=4H/V_s$ から、平均的な $V_s$ が求められる。三神ら(2010)は、この簡易な地盤モデルで多層地盤のサイト特性を、最も重要な1次モードまで表現できることを見出した。そこで地盤の深さ方向の振動モードを1次モードに固定すると、3次元地盤モデルはウインクラー地盤上の2次元平面としてモデル化され、2次元解析ながら3次元動的な波動効果を反映できるモデルが構築される。地盤調査として必要な地表面単点での常時微動観測は容易で、広域で実施可能である。数値解析も2次元解

析なので、計算負荷が少なく、高知市全域を一体として取り扱うことができる。

南海トラフで発生した地震の揺れに関する証言や震度分布に基づく震源特性の把握と基盤入力地震動の算出を行い、高知市の地震動評価に活かす。基盤入力地震動を評価するためには震源モデルが不可欠である。しかしながら、昭和南海地震当時、強震観測網は整備されておらず、有益な記録はほとんどが得られていない。それ以降も同震源域ではほとんど地震が発生しておらず、波形インバージョンによる震源特性の把握ができていないことが南海地震の最大の問題点である。本研究では、武村・神田らの震度インバージョンに「揺れに関する証言」を制約条件として加味し、震源モデルの検証、見直しを行う。震度インバージョンは、各地の震度を再現するような震源モデルを決定するものであるが、震度という強度特性のみに着目し、最適値問題を解いているため、複数の解が現れるという問題がある。そこで本研究では、これまで本研究室で蓄積してきた約 300 の「揺れに関する証言」をもとに高知、和歌山、徳島の各地の揺れの時間的推移を把握し、それを制約条件に用いることで、震源モデルの検証や見直しを行う。確定された震源モデルを用い、基盤面での地震動を評価するにあたっては、統計的グリーン関数法や経験的グリーン関数法に基づく方法によって、基盤レベルの地震動を評価する。統計的グリーン関数法の解析プログラムについては、すでに開発済みである。ただし、伝播経路特性は従来のもを用い、位相特性はランダムとしている。経験的な位相特性を用いる野津・菅野のプログラム(2008)を用いた地震動の評価についても併せて行うが、これについては連携研究者の齊藤剛彦氏の協力を得る。

#### 4. 研究成果

本研究の成果は、表層地盤のモデル構築と応答解析(モード解析)、それとそのモデルへの地震動入力を考えるための震源モデル構築のための南海トラフを震源とする地震の震源特性の検証からなる。

##### (1) 高知市の地形的な特徴

図 1 に示すように、鏡川、国分川など、多くの河川が高知市を貫流した後、浦戸湾に注いでいる。高知市はこれらの河川の河口部の沖積低地に位置している。また、地震性の沈降平野であり、地震の度に沈降を繰り返してきた。そのため、現在ではゼロメートル地帯が広域にわたり広がっている。

##### (2) 高知市の基盤図

図 2 は、高知地盤図に示される沖積層基底面深度図を、平成 20 年国土地理院発行の 1/25,000 地形図に書き入れたものである。この沖積層基底面深度図は、高知平野における 1000 本以上のボーリングデータをもとに作成されたものである。これとは別に、基盤岩上面深度図がある。これは、未固結の第 4 紀

地層をはぎ取ったその下位に埋没分布している基盤岩の深さである。

##### (3) 高知市での常時微動観測

報告者は、土地の管理者の許可を得ながら高知平野での微動観測を継続的に行っている。70 点観測時の微動観測位置を図 2 に示している。なお、2016 年 3 月末までに、さらに 2 箇所での観測許可を得、高知平野の 72 点において常時微動観測を実施するに至った。以下、観測方法の詳細を述べる。

サーボ型速度計(東京測振、SPC-35)を用い、地表面において、約 10 分間の観測を行う。風が少ない日や時間帯に、公園や学校のグラウンドなどで実施した。ただし、長周期成分を検出可能なセンサーを用い、深い基盤情報を得ようとする場合には、45 分間の観測を実施した。約 10 分の記録のうち、交通振動など、周囲の影響の少ない約 20 秒区間(2048 データ)を 5 区間を取り出し、それぞれ平滑化したのち、東西、南北でさらに平均化する。平滑化の方法としては Parzen Window、バンド幅 0.4Hz を用いた。水平と鉛直のスペクトル比をとり、H/V スペクトル比を求める。

図 3 に微動観測結果の一例を示す。このような図から、ピークを与える振動数を求め、それを当該地点における卓越振動数の推定値とする。候補となるピークが複数あることも考えられるが、著者らによる高知市での観測では、この例のように、H/V スペクトル比の明瞭なピークが 1 つ現れる場合が多い。

図 2 には常時微動観測を実施した地点の位置を併せて示しているが、各地点の微動記録から得られた地盤の卓越振動数について、観測結果を図 4 に示す。浦戸湾に近づくにつれ、地盤の卓越振動数の値が小さくなる傾向が読み取れる。

##### (4) 高知平野のせん断波速度の推定結果

常時微動を測定した各地点について、基盤深度やボーリングデータを参考に、基盤までの深さを決定する。その上で、1/4 波長則により、表層地盤の平均的なせん断波速度を決定する。高知地盤図から読み取った沖積層基底面深度と基盤岩上面深度と地盤の卓越振動数から、地盤の平均的なせん断波速度を求めた。基盤岩上面深度を基盤までの深さとした場合の平均的なせん断波速度の方が妥当な値を示していると思われ、実際、高知市中心部での微動記録から求められる H/V スペクトル比のピークは、PS 検層データを入力した数地点での検討結果では、基盤岩を反映しているものと考えられた。

##### (5) 簡易な地盤モデルを用いたモード解析

ここでは、構築したモデルをもとに、図 5 のように領域をメッシュ分割して、固有値解析を行う。領域内での微動観測点での平均的なせん断波速度と基盤までの深さでメッシュの特性を代表させており、もし 1 メッシュに複数の微動観測点がある場合には、それらを平均化している。

領域については、外周部のすべてを自由境



図1 高知市域の概要 (点線は0m地帯)

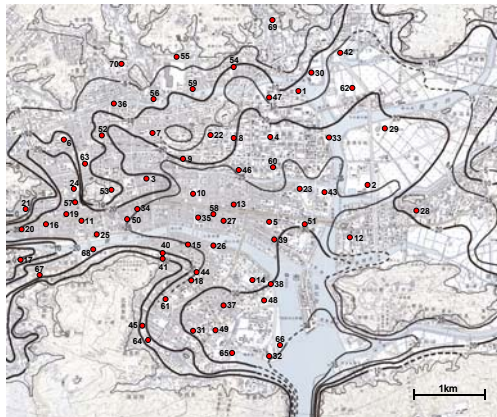


図2 高知市の沖積層基底面深度と微動観測点 (70点観測時, 国土地理院発行の1/25,000地図に, 高知地盤図の沖積層基底面深度のコンターを加筆したものを使用)

界とした場合と, 山際の幾つかの節点を固定点とした場合を考える (固定点とする点は赤丸で表示). 地盤密度は  $1,800(\text{kg}/\text{m}^3)$  で, ポアソン比は  $0.4$  とした. 前述の平面応力の仮定を採用している. 図6にすべての境界を自由端とした場合の1次モードを示す. 青線がメッシュのもとの位置で, 赤い点線が1次モードの変形を示している. 沖積地盤が厚く堆積する浦戸湾周辺において振幅が大きくなっている. 1次の固有振動数は  $1.23(\text{Hz})$  となった. 一方, 一部の境界 (図5で赤○で示す境界) を固定条件とした場合の1次モードを図7に示す. この場合も同様に, 河口部や浦戸湾付近で大きく振動することが読み取れる. 固有振動数については, 約  $6.8(\text{Hz})$  と大きい値となった. これは, 現時点ではメッシュ分割が粗く, 固定境界の顕著な影響を受けるためであると考えている.

#### (6) 南海トラフ地震の震源特性の検証

兵庫県南部地震以降, K-NETやKiK-netに代表されるような高精度強震計による観測網が日本全国に急速に広がった. しかし,

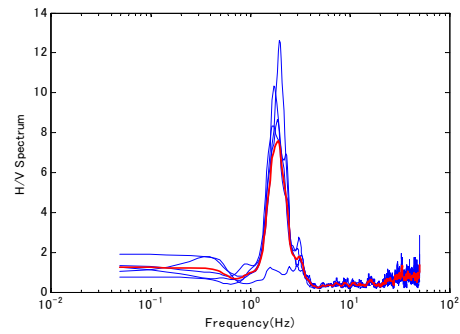


図3 微動観測結果の一例 (観測点22)

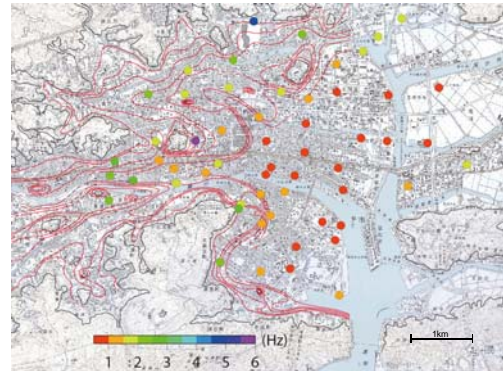


図4 高知市の卓越振動数分布 (国土地理院発行の地形図に高知地盤図(1992)の基盤岩上面深度図を加筆したものを使用)

1944年昭和東南海地震や1946年昭和南海地震当時, 強震観測体制は十分に整備されておらず, 観測に成功したのは限られた地方気象台であった. 終戦前後の混乱期であったため, 観測施設が用意されていても, 稼働していなかった場合もあり, 観測波形が得られたのは限定的で, 振りきれてしまった例もあった. 観測できた場合でも, 紙の上に変位を直接描く方式で, 精度が高いとは言えない. その後, 南海トラフを震源とする巨大地震はおきおらず, 南海トラフの震源の様子がよくわかっていない.

昭和東南海地震や昭和南海地震の揺れは, 当時の人々によって体感され, 証言として残されており, これを利用しない手はない. つまり, 体感をセンサーとみなして, どのような揺れだったかのヒントを得, 不足していた情報を補おうとするものである. このような研究には, 武村ら(1998)の研究がある. 武村ら(1998)は, 関東大地震について548の証言を収集し, 地震動の特性を分析した. 齊藤・三神(2011)はこれまで1946年昭和南海地震による揺れの体験談を中心に収集, 分析を進めており, 現在も継続的に体験談を収集している. その結果, 震源特性の影響を受けて, 地域ごとに揺れ方が大きく異なることがわかってきた.

体験談は体感なので, 曖昧であり, 必ずしも科学的であるとは言えない. また, 体感には個人差があり, その人がいた場所の条件 (地盤条件や屋内外のどちらにいたかなど) による影響も含まれる. しかし, ある程度の

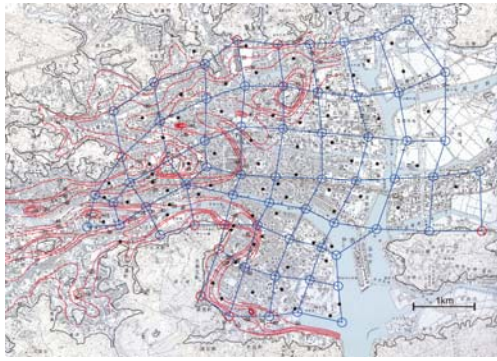


図5 解析に用いたメッシュ（国土地理院発行の地形図に高知地盤図(1992)の沖積層基底面深度のコンターを加筆したものを使用）

数を集めれば、その場所での平均像は掴めるものと考えられる。強度特性のみならず、経時特性をも含むものであるから、その利用法としては、例えば、神田ら(2004)の一連の震度インバージョンの研究で示されている短周期領域を検証するなど有効活用できるものと思われる。

以上の観点から、南海トラフを震源とする地震について揺れに関する体験談を継続的に収集してきたが高知県東部など、揺れに関する証言が不十分な場所もある。また、2011年東北地方太平洋沖地震以降、南海トラフを震源とする地震が三連動、四連動のように広大な断層面が連動して地震を発生させることを考慮することの社会的要請が強まってきた。そのため、昭和南海地震の震源域に加え、昭和東南海地震の震源域も考慮し、揺れに関する体験談を収集する。昭和東南海地震については地域ごとの揺れの違いに着目しながら、既存の震源モデルの妥当性を検証した。以上の検討にあたっては、評価者の感覚によるばらつきがあるので、3名（教員1名、学生2名）による分類を行い、重みづけせずにそれらの平均を取ることで評価した。

結果の一例として、三重県での体験談の整理結果を図8に示す。北中部では、分類2の「突然の強い揺れ」を感じている人が40%を近くおり高い。よって、前触れなく強い揺れがきたようである。しかしながら、家から飛び出るなどして逃げている人は多い。危険を感じる程度の揺れを最初から感じている。だからといって、動けないほどではなかったようである。一方、三重県南部では、突然の激しい揺れを感じる割合（分類2）は少なくなり、轟音や地鳴り（分類4）を聞く割合が多くなっている。以上から、三重県北中部の近くに震源があったものと思われる。揺れが大きいものの、多くの人が「建物から飛び出した」と証言するなど、逃げることであったようであるので、最も近くの短周期発生域とはやや距離があるか、あるいは、比較的規模が小さかったのではないかと思われる。加えて、三重県全体として、ものすごい揺れを感じて

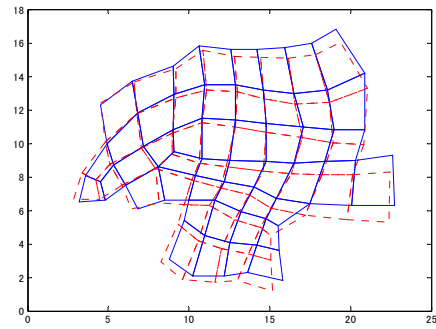


図6 1次モード（外周のすべて自由境界）

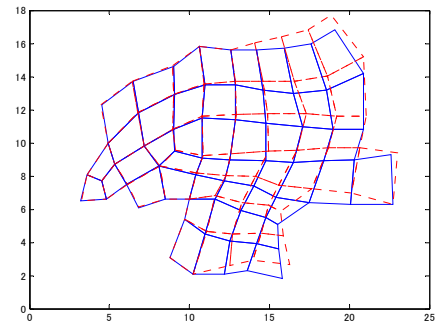


図7 1次モード（外周の一部、固定境界）

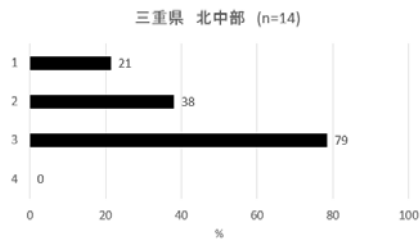
おり、短周期発生域が近くにあったことが推察される。

愛知県は西部と東部の2分類、静岡県は西部のみに分類し、同様な方法で考察した。その結果、愛知県については、三重県近くにある震源付近の短周期発生域の影響が比較的小さく、その影響が愛知県までさほど及んでいない可能性があり、また、相当に大きな揺れで、立っていられないくらい大きい揺れであったと証言しているケースが多いことから、断層の破壊が南から北へ進み、愛知県に近い短周期発生域の断層破壊が発生し、それによって突然の大きな揺れを感じたのではないかと思われる。三重県近くにある震源付近の短周期発生域の影響が比較的小さく、その影響が愛知県までさほど及んでいない可能性がある。また静岡県（西部）では、三重県沖か愛知県沖のアスペリティの破壊による地鳴りや轟音を聞いた後、やや離れた愛知県沖の短周期発生域による地震動を受け、最後に、すぐ近くの短周期発生域による強烈な地震動を受けたものと解釈される。

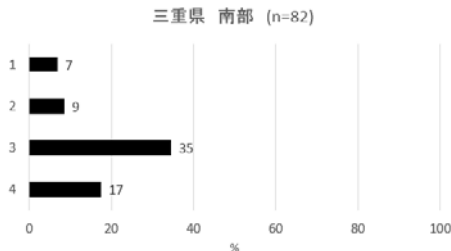
以上より、愛知県では突然の揺れを感じていることから、震源付近の短周期発生域のサイズは比較的小さいものと推察される。一方で、愛知県や静岡県ではとても大きな揺れを感じ、地割れが出来たりしているので、短周期発生域は大きいのか、すぐ近くにあるものと思われる。この点において、神田らの短周期発生域が都市の直下まで潜り込んでいるというモデルとは整合する。

#### (7) まとめ

広域、多点で実施可能な簡易な地盤調査との精度のバランスを考えた地盤モデル化手



(a) 北中部の体験談



(b) 南部の体験談

図8 三重県の体験談

法を、南海地震の再来が危惧されている高知市に適用した。高知市の中心部の約70地点について、3成分常時微動観測を地表面レベルで行い、H/Vスペクトル比を求め、地盤の卓越振動数を推定した。その結果、沖積層厚が厚くなる浦戸湾に近づくにつれ、地盤の卓越振動数は小さくなった。

常時微動観測によって求められた卓越振動数と、当該地点における基盤深度の推定値から、平均的なS波速度を算出し、簡易な地盤モデルを構築した。固有値解析を行ったところ、軟弱地盤が厚く堆積する領域において顕著な地盤振動が生じることが確認された。

南海トラフを震源とする昭和南海地震、昭和東南海地震について、各地から揺れに関する体験談をそれぞれ約310、350収集し、神田らの震源モデルを検証した。その結果、昭和東南海地震については、概ね、体験談を説明するものであったが、三重県沖の短周期発生域の位置やサイズなど、やや体験談との整合がとれない部分もあった。昭和南海地震については、体験談と良く整合するものであったが、水平動から上下動に変化したという証言の要因については説明できなかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 三神 厚、井口 妙子、齊藤 剛彦、河野 生磨、弘中 拓斗：南海トラフを震源とする地震による各地の揺れの体験談、歴史地震、査読有、Vol.30、2015.7、81-92。  
[http://sakuya.ed.shizuoka.ac.jp/rzisin/kaishi\\_30/index.pdf](http://sakuya.ed.shizuoka.ac.jp/rzisin/kaishi_30/index.pdf) (出版後半年でアクセス可)
- ② 三神 厚、谷口純一：Simplified Ground Modeling of Central Kochi City Using Microtremor Measurement、土木学会第34回地震工学研究発表会講演論文集、査読無、2014. Paper ID=722(10頁、頁番号無)。

- ③ Atsushi Mikami: A Ground Model for Earthquake Response Analysis Derived as Best-Simplified with Using Microtremor Measurements, 10th US National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, 査読有(簡易な査読)、2014, Paper ID=133 (11 pages).  
DOI: 10.4231/D3KD1QK9K.

- ④ 三神 厚、谷口純一：地表単点での常時微動観測に基づく高知市の簡易な地盤モデルの構築、土木学会第33回地震工学研究発表会講演論文集、査読無、2013, Paper ID=496 (6頁、頁番号無)。

〔学会発表〕(計5件)

- ① 三神 厚、谷口純一：Simplified Ground Modeling of Central Kochi City Using Microtremor Measurement、2014年10月9-10日、土木学会第34回地震工学研究発表会、まちなかキャンパス長岡(新潟県長岡市)。
- ② 三神 厚、弘中 拓斗、齊藤 剛彦：南海トラフを震源とする地震による各地の揺れの体験談、第31回歴史地震研究会、歴史地震研究会、2014年9月20-22日、名古屋大学(愛知県名古屋市)。
- ③ Atsushi Mikami: A Ground Model for Earthquake Response Analysis Derived as Best-Simplified with Using Microtremor Measurements, 10th US National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, 2014.7.21-25, Anchorage, U.S.
- ④ Atsushi Mikami, Xiangrui R. Chen and Jun'ichi Taniguchi: Simplified Modeling of Alluvial Soil Deposit Based on H/V Spectral Ratio of Microtremor, 土木学会第17回応用力学シンポジウム、2014年5月11日、琉球大学(沖縄県中頭郡西原町)。
- ⑤ 三神 厚、谷口 純一：地表単点での常時微動観測に基づく高知市の簡易な地盤モデルの構築、土木学会第33回地震工学研究発表会、2013年10月24-25日、東京大学生産技術研究所(東京都目黒区)。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三神 厚 (MIKAMI Atsushi)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：10262122

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

齊藤 剛彦 (SAITO Takehiko)

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号：70646984