

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22310108

研究課題名（和文） 地震波干渉法による堆積平野の3次元S波速度構造モデルのバリデーション

研究課題名（英文） Validation of 3D basin model for earthquake ground motion simulation using seismic interferometry

研究代表者

山中 浩明（YAMANAKA HIROAKI）

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：00212291

研究成果の概要（和文）：

長周期地震動評価のための深部地盤構造モデルの検証のための地震波干渉法の適用性を検討した。首都圏および駿河湾周辺地域において連続微動観測記録を取得し、各2地点の間の相互相関関数を求めた。相互相関関数から2点間のグリーン関数の表面波成分の群速度を抽出し、表面波トモグラフィ解析から3次元S波速度構造モデルを修正した。さらに、長周期地震動のシミュレーションを行い、モデル修正により地震動説明能力が向上することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Applicability of seismic interferometry in validating 3D S-wave velocity model of a large basin for estimation of long-period ground motion was investigated in this study. We conducted long-term microtremor observation in Tokyo Metropolitan area and Suruga bay area for estimation of cross correlations. Surface waves of Green's function were extracted from the correlations. The 3D model was modified from group velocity tomographic analysis of the surface waves. We simulated earthquake ground motions observed during a moderate event and found that the observed ground motion features were reconstructed better with the revised model than the previous model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			0
年度			0
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：地震動

1. 研究開始当初の背景

大規模な堆積平野での長周期地震動の特徴は、震源での地震波の励起と地下構造による増長によると考えられている。とくに、平野部分の厚い堆積層による影響が大きいこ

とが明らかにされている。わが国の主要な地域では、地下構造探査や地盤と地震動特性の関係に関する研究が進められ、各種の調査研究から深部地盤の3次元構造モデルも構築されている。強震動評価に用いる平野部の地下

構造モデルの妥当性は、中小地震のシミュレーションによって検証されているが、震源特性や平野外部の地下構造の影響があり、対象とする平野部の地下構造の影響のみを抽出することは容易ではない。

2000年代後半から地震波干渉法による微動データの処理方法が注目されている。これは、長期間の2地点での微動データの相互相関関数が観測点間のグリーン関数に対応すると考えるものである(例えば、Snieder、2004)。微小地震観測や広帯域地震観測データを用いて、地殻構造の推定などに用いられている。地震波干渉法によって2地点間の影響のみを十分な精度で評価できれば、平野部の3次元S波速度モデルの検証および修正には、有効なデータを提供できると考えられる。しかし、わが国での微小地震観測や広帯域地震観測は、主に岩盤地域に限られているために、平野部における地震波干渉法の適用性に関しては、十分に検討されていない。

2. 研究の目的

本研究では、大規模な堆積平野での長期連続微動観測データへ地震波干渉法に基づく処理を適用し、2つの観測点間の地下構造による影響を抽出し、それに基づいて強震動評価に用いる地下構造モデルをバリデーションするための方法を提案することを目的としている。このため最適な観測およびデータ処理の方法も検討する。さらに、研究対象地域のひとつである首都圏での既往の深部地盤構造モデルをより信頼性高いものにするにも考えている。相模湾などを挟んだ2地点間での微動データに地震波干渉法を適用することによって、今まで難しかった海域のS波速度構造モデルに対する適用性も検討する。これも研究目的のひとつである。

3. 研究の方法

- (1) 地震波干渉法適用のための微動の連続観測システムを作成し、関東平野などの堆積平野で微動の長期間連続観測を実施する。
- (2) 微動データの地震波干渉法に基づく処理方法を検討し、表面波成分の抽出を行う。
- (3) 群速度の観測値と既往のS波速度構造モデルの基づく理論値との比較により、モデルの妥当性の検証を行うとともに、本手法の問題点を明らかにする。
- (4) 既往の3次元モデルでの波動場の計算を行い、地震干渉法で得られるグリーン関数との比較から、S波速度構造モデルのより高度な検証および修正方法を提案する。
- (5) 以上の結果に基づく深部地盤モデルを用いて、首都圏での地震動のシミュレーションを行い、観測された地震記録と比較し、地盤モデルの地震動説明能力を評価する。

4. 研究成果

(1) 微動の長期連続観測の実施

関東平野、伊豆半島および駿河湾を中心とした地域において微動長期連続観測を実施し、微動データを取得した。観測では、メモリ容量の小さい既存のデータ記録器に小型のノートPCを接続し、長期間の連続観測データを取得できるようにした。

(2) 地震波干渉法ためのデータ処理の検討

2地点間の微動データを図1のようにして相互相関関数を求めた。ここでは、2値化などの正規化を行わずに、コヒーレンシーを求め、それをすべてのデータに対して平均することにした。

得られる相互相関関数の信号とノイズ成分が用いるデータ長さに対して異なる変動を示すことを見出した。ノイズの振幅は、データ長さの増加に伴い徐々に小さくなるが、信号成分の振幅は、あるデータ長さ以上ではほぼ一定値となっている。これらの特徴を用いて、相互相関関数の算出に用いるデータ長さが十分であるかを判断することができた。さらに、これらの処理を周期毎に行うことによって、図2右側のように信号成分が抽出できている周期範囲を客観的に示すことが可能となった(図2の例の場合には、周期0.8~8秒)。以上の結果をまとめて、地震波干渉法のデータ処理における新しい方法を提案した。



図1：微動データの処理方法

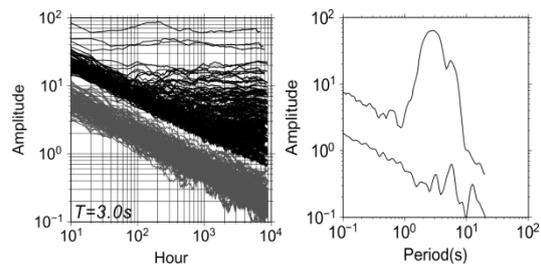


図2：周期3秒の相互相関関数の信号とノイズのデータ長に対する変動特性(左)と周期毎の信号とノイズの関係(右)

(3) 地震波干渉法による表面波の抽出

上記の方法のように、地震波干渉法に基づく処理によって、すべての2観測点間の相互相関関数を算出した(図3)。相互相関関数のマルチプルフィルタリング解析によって、分散性を有したレイリー波およびラブ成分

の抽出し、周期2～6秒の周期帯域の群速度を推定した。さらに、既往のS波速度構造モデルから推定される理論値と比較した。その結果、関東平野中央部では観測値が理論値で説明できるが、平野端部や相模湾域では既往のモデルによって説明できない部分もあり、モデル修正の必要性を指摘した。

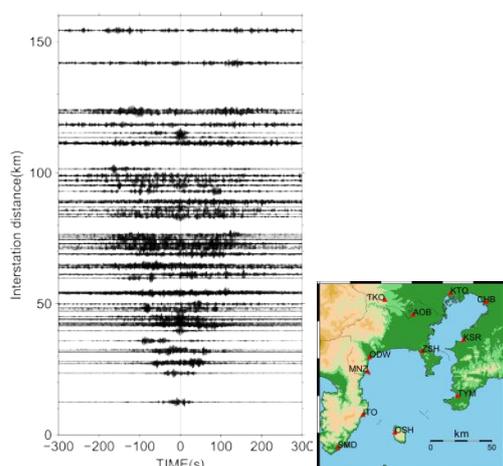


図3：観測点位置と相互相関関数（上下）

(4) 群速度トモグラフィ解析

上記のように得られた表面波の群速度を用いて、群速度のトモグラフィ解析を行った。まず、南関東地域を10km四方のセルに分割し、ラブ波とレイリー波の走時のトモグラフィ解析を実施し、南関東地域の群速度のマッピングを行った。さらに各セルで得られた群速度の逆解析を行い、地震基盤までの深部地盤の1次元S波速度構造を推定した。逆解析の際には、層厚のみを変数として、既存のモデルとの接続が容易になるような拘束を与えた。各セルで得られた1次元モデルを用いて、既存のモデルの一部を図4のように修正した。平野の端部では、既往のモデルとの差異が大きくなっている。これはセルの大きさが大きすぎ、1次元構造の仮定の不適切さの可能性もあり、今後検討が必要である。

(5) グリーン関数のシミュレーション

関東平野での既存の3次元地下構造モデル(山中・山田, 2006)を用いて2地点間のグリーン関数のシミュレーションを行い、相互相関関数との比較を行った。シミュレーションでは、ひとつの観測点の地表に上下加振の点震源を置き、各観測点での波形を3次元差分法により計算した。震源時間関数として周期4秒のリック-波を用い、差分格子は0.4kmとした。周期4秒以上の成分で計算精度が確保されている。計算結果の例は、図5に示すごとくである。多くの観測点ペアで、表面波の顕著な振幅の位相の到着時間などを再現

できた。しかし、一部の観測点ペアではシミュレーションで説明できない部分もあり、既存のモデルが適切ではないことを指摘できた。

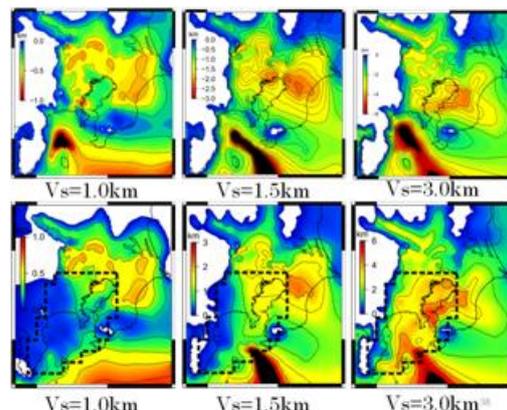


図4：表面波トモグラフィ解析による深部地盤の修正モデル（下）と既存のモデル（上）の比較

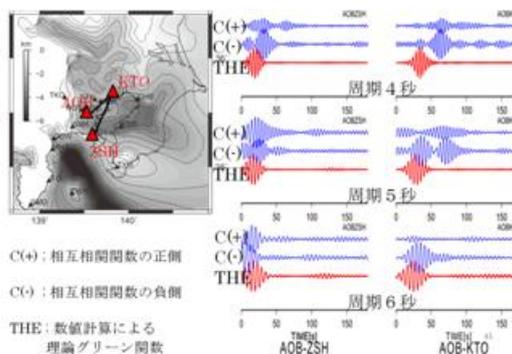


図5：既存の3次元モデルでのグリーン関数のシミュレーションと観測結果の比較

(6) 地震動シミュレーション

修正された深部地盤のモデルを用いて、中小地震による地震動のシミュレーションを行った。本研究では、山田・山中(2003)で検討されている1990年伊豆大島近海の地震を対象とした。計算には、山田・山中(2003)による3次元差分法を用い、震源パラメータや計算条件なども山田・山中(2003)と同様である。また、確認のために、既存のモデル(山中・山田, 2006)を用いた計算も行った。計算結果の一部が図6に示されている。平野中央部の観測点(CHB, KTO)では、修正モデルのほうが観測記録をよく説明している。一方、平野端部(ASK, ENS)の観測点については、修正モデルでは地震動の特徴の再現性が低くなっている。これは、平野端部においてモデル修正に用いたトモグラフィ解析のセルの大きさが大きすぎたことが原因であると考えられる。

関東平野での地震動シミュレーションに関する基本的な検討も行った。関東平野での既存の3次元地下構造モデルでの表層部分の

S波速度の不均質性を考慮した地震動シミュレーションを行い、観測された長周期地震動の特徴をより説明できるものであり、深部地盤の表層部分（深さ 400m 以浅）のモデル化も長周期地震動の評価には重要であることがわかった。今後、こうした点も踏まえて深部地盤のモデル化をする必要がある。

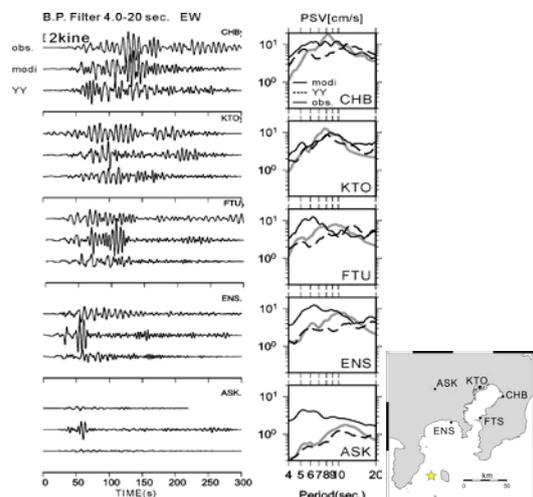


図 6 : 1990 年伊豆大島近海地震による地震動のシミュレーション結果。左は各地点の東西方向の速度であり、上から観測、修正モデル、既往のモデルによる結果を示し、右は観測地点の位置を示す。

(7) 地下構造推定への活用例

関東平野北東部および西部において 1~2 日間程度の臨時的微動観測を行い、本研究で検討した地震波干渉法に基づく方法を適用し、S波速度構造を推定した。一つ目の例は、茨城県の東茨城台地の東西 30km 南北 20km 程度の範囲の 12 地点で実施した微動観測である。2 日間の微動データから各 2 地点間の相互相関関数を求め、その表面波成分について群速度を抽出した。この結果と微動の H/V スペクトルの観測結果も考慮して、深さ 1km 程度の地震基盤に至るまでの 2 次元 S 波速度構造を推定することができた。

もう一つの例は、関東平野西端部の東京都八王子市での 20km の線上の 7 地点での微動観測である。すべての点での同時観測の期間は 1 日である。各 2 地点間では、最大で周期 0.1~7 秒の帯域での相互相関関数から表面波の群速度を算出し、2 次元 S 波速度構造モデルを推定することができた。

以上の観測例は、1 日程度の短い期間での微動データを用いた堆積層のモデル化における地震波干渉法の高い適用性を示すものであり、本研究でのモデル検証および修正の考え方は今後の深部地盤のモデル化に有効であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 地元孝輔、山中浩明、短周期帯域における地震波干渉法によるレイリー波群速度推定の適用性、物理探査、査読有、印刷中、2013
- ② 山中浩明、マルコフ連鎖モンテカルロ法による表面波の位相速度の逆解析、物理探査、査読有、66、97-109、2013
- ③ Yadab P. Dhakal, and Hiroaki Yamanaka, An evaluation of 3-D velocity models of the Kanto basin for long-period ground motion simulations, Journal of Seismology, 10.1007/s10950-013-9373-4, May 2013
- ④ 地元孝輔、山中浩明、相互相関関数の振幅に着目した地震波干渉法のデータ処理に関する考察、物理探査、査読有、65、237-250、2012
- ⑤ 津野靖士、山中浩明、翠川三郎、山本俊六、三浦弘之、酒井慎一、平田直、笠原敬司、木村尚、明田川保、2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の本震記録と余震記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける長周期地震動の特性、日本地震工学会論文集、査読有、12、102-116、2012
- ⑥ 山田伸之、山中浩明、表層部分に注目した地震動シミュレーションのための関東平野の 3 次元 S 波速度深部地盤モデル、物理探査、査読有、65、139-150、2012
- ⑦ 津野靖士、地元孝輔、山中浩明、東北地方太平洋沖地震の余震観測記録と微動観測記録の解析から推定された茨城県中部に於ける S 波速度構造 - 東茨城台地に注目して -、物理探査、査読有、64、401-412、2011
- ⑧ 地元孝輔、山中浩明、南関東地域における地震波干渉法に基づく表面波のスローネストモグラフィ解析、物理探査、査読有、64、331-343、2011
- ⑨ 山中浩明、地元孝輔、諸井孝文、池浦友則、額綱一、坂上 実、中井正一、関口 徹、小田義也、南関東地域における微動の長期連続観測記録の地震波干渉法処理による表面波の群速度の推定、物理探査、査読有、63、409-425、2010
- ⑩ 鈴木晴彦、山中浩明、深部地盤の S 波速度構造推定のための地震記録と微動探査データの同時逆解析、物理探査、査読有、63、215-227、2010

[学会発表] (計 33 件)

- ① 山中浩明、加藤 圭、地元孝輔、津野靖士、参照点付きアレイを用いた微動探査

- の可能性、物理探査学会第 128 回(平成 25 年度春季) 学術講演会、2013 年 6 月 3 日～5 日、早稲田大学国際会議場(東京都)
- ② 佐口浩一郎、山中浩明、レイリー波位相速度とレシーバー関数の同時逆解析による立川断層近傍の深部地盤構造の推定、SSS25-07、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 19 日～24 日、千葉幕張メッセ国際会議場(千葉県)
- ③ 地元孝輔、山中浩明、地震波干渉法によるグリーン関数に基づく南関東地域の S 波速度構造モデルの検証、SSS24-P12、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 19 日～24 日、千葉幕張メッセ国際会議場(千葉県)
- ④ 地元 孝輔・山中 浩明、短時間微動観測による地震波干渉法の適用性に関する考察、物理探査学会第 127 回(平成 24 年度秋季)学術講演会、2012 年 11 月 29 日～12 月 1 日、とりぎん文化会館(鳥取県)
- ⑤ 津野靖士、山中 浩明、関東平野で観測された長周期地震動の Rayleigh 波理論に基づいた検討、物理探査学会第 127 回(平成 24 年度秋季)学術講演会、2012 年 11 月 29 日～12 月 1 日、とりぎん文化会館(鳥取県)
- ⑥ 佐口浩一郎、山中 浩明、レシーバー関数法による立川断層周辺地域の深部下構造の推定、物理探査学会第 127 回(平成 24 年度秋季)学術講演会、2012 年 11 月 29 日～12 月 1 日、とりぎん文化会館(鳥取県)
- ⑦ 加藤 圭、地元孝輔、山中浩明、地震波干渉法に基づく相互相関関数のセンブリクス解析による表面波位相速度の推定、日本地震学会 2012 年度秋季大会、2012 年 10 月 16 日～19 日、函館市民会館(北海道)
- ⑧ 堤若菜、山中浩明、地元孝輔、地表震源の波動場に対する地震波干渉法の適用性に関する検討 その 2、日本地震学会 2012 年度秋季大会、2012 年 10 月 16 日～19 日、函館市民会館(北海道)
- ⑨ Yadab Prasad Dhakal、山中浩明、A comparison of the three deep velocity models of the Kanto basin for long-period ground motion simulation、2012 年度日本建築学会大会(東海)、2012 年 9 月 12 日～14 日、名古屋大学(愛知県)
- ⑩ 山中浩明、津野靖士、翠川三郎、三浦弘之、三宅弘恵、瀬瀬一起、酒井慎一、平田直、関東平野で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の地震動特性 その 2 品川～川崎周辺の東京湾沿岸部と足柄平野で観測された強震動、2012 年度日本建築学会大会(東海)、2012 年 9 月 12 日～14 日、名古屋大学(愛知県)
- ⑪ 津野靖士、翠川三郎、山中浩明、三浦弘之、酒井慎一、平田直、関東平野で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の地震動特性 その 1 関東平野で観測された強震動の概要、2012 年度日本建築学会大会(東海)、2012 年 9 月 12 日～14 日、名古屋大学(愛知県)
- ⑫ Yadab P. Dhakal、Yamanaka Hiroaki、Delineation of S-wave time windows in a deep sedimentary basin、2012 年物理探査学会春季大会、2012 年 5 月 29 日～31 日、早稲田大学(東京都)
- ⑬ 地元 孝輔、山中 浩明、地震波干渉法理論に基づく相互相関の振幅に関する考察、2012 年物理探査学会春季大会、2012 年 5 月 29 日～31 日、早稲田大学(東京都)
- ⑭ 津野靖士、山中浩明、三宅弘恵、坂上実、瀬瀬一起、足柄平野で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の強震動、2012 年物理探査学会春季大会、2012 年 5 月 29 日～31 日、早稲田大学(東京都)
- ⑮ 地元孝輔、山中浩明、地震波干渉法によって推定された関東平野のグリーン関数のシミュレーション、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 20 日～25 日、千葉幕張メッセ国際会議場(千葉県)
- ⑯ Yadab, P. Dhakal、Hiroaki Yamanaka、An evaluation of 3-D velocity models of the Kanto basin for long-period ground motion simulations、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 20 日～25 日、千葉幕張メッセ国際会議場(千葉県)
- ⑰ 地元孝輔、山中浩明、地震波干渉法による表面波の抽出に及ぼす地震計の計器特性の影響、日本地震工学会 2011 年度大会、2011 年 11 月 10-12 日、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都)
- ⑱ 津野靖士、地元孝輔、山中浩明、東北太平洋沖地震(Mw 9.0)の余震観測記録と連続微動観測記録による茨城県中部に於ける地下速度構造の不均質性評価、日本地震工学会 2011 年度大会、2011 年 11 月 10-12 日、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都)
- ⑲ 津野靖士、地元孝輔、山中浩明、茨城県中部に於ける東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の余震観測と連続微動観測、物理探査学会第 125 回学術講演会、2011 年物理探査学会秋季大会、2011 年 9 月 13 日～15 日、秋田カレッジプラザ(秋田県)
- ⑳ Chimoto Kosuke and Yamanaka Hiroaki、Tomographic estimation of surface-wave group velocity using seismic interferometry in southern Kanto, Japan、4th International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion、2011 年 8 月

- 23-26 日、UCサンタバーバラ (米国)
- ⑳ Seiji Tsuno, Hiroaki Yamanaka, Shin'ichi Sakai, Naoshi Hirata, Keiji Kasahara, Hisanori Kimura and Tamotsu Aketagawa, Deep S-Wave Velocity Structures in the Tokyo Metropolitan Area Estimated by the H/V Spectral Ratio Using Coda Waves, 4th International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, 2011 年 8 月 23-26 日、UCサンタバーバラ (米国)
- ㉑ Hiroaki Yamanaka, Application of Markov chain Monte Carlo method in inversion of surface wave phase velocity, 4th International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, 2011 年 8 月 23-26 日、UCサンタバーバラ (米国)
- ㉒ 地元孝輔、山中浩明、諸井孝文、池浦友則、瀨瀬一起、坂上 実、中井正一、関口 徹、小田義也、地震波干渉法による南関東における表面波群速度の抽出その 2 地下構造モデルの検証、物理探査学会第 122 回学術講演会、2010 年 5 月 31 日～6 月 2 日、早稲田大学国際会議場 (東京都)
- ㉓ 地元孝輔、山中浩明、諸井孝文、池浦友則、瀨瀬一起、坂上実、中井正一、関口徹、小田義也、地震波干渉法によるグリーン関数抽出のための連続微動記録の処理方法の考察、物理学会第 124 回学術講演会、2011 年物理探査学会春季大会、2011 年 5 月 10 日～12 日、早稲田大学 (東京都)
- ㉔ 地元孝輔、山中浩明、諸井孝文、池浦友則、瀨瀬一起、坂上実、中井正一、関口徹、小田義也、地震波干渉法による表面波の群速度トモグラフィによる関東平野の地下構造モデルのバリデーション、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 20 日～25 日、千葉幕張メッセ国際会議場 (千葉県)
- ㉕ 津野靖士、山中浩明、酒井慎一、平田直、笠原敬司、木村尚紀、明田川保、H/Vスペクトル比の逆解析による首都圏深部地下構造の初期推定、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 20 日～25 日、千葉幕張メッセ国際会議場 (千葉県)
- ㉖ 地元孝輔、山中浩明、諸井孝文、池浦友則、瀨瀬一起、坂上 実、中井正一、関口 徹、小田義也、地震波干渉法による関東平野の深部地盤の S 波速度構造探査の試み その 2、日本建築学会 2010 年大会、2010 年 9 月 9-11 日、富山大学 (富山県)

- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山中 浩明 (YAMANAKA HIROAKI)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：00212291