

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02287

研究課題名(和文) 強震動予測のための微動を用いた不整形地盤構造推定システムの構築

研究課題名(英文) Construction of the system for estimating irregular subsurface structure using ambient noise for strong ground motion prediction

研究代表者

上林 宏敏 (Uebayashi, Hirotoishi)

京都大学・複合原子力科学研究所・准教授

研究者番号：30300312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：不整形地盤における微動の振る舞いを調べるため、3次元地下構造モデルにおける微動波形を作成し、位相速度を算出した。その際、不整形による影響が小さい領域において、従前のレイリー波理論では説明ができない基盤層のS波を超えるピーク状の位相速度が見られ、実サイトにおいても見られることを微動アレイ観測データ分析によって確認した。この生成要因として、実体波の寄与によることを全波動場モデリングによって評価できた。

一方、盆地構造における微動や地震動のような複雑な波動場を、それらの空間微分量を用いることによって、レイリー波(P波、SV波)とラブ波(SH波)に精度よく分離できることを数値実験によって確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微動の位相速度から地下構造を推定する場合、速度コントラストが大きな基盤層と表層間の深度やそれぞれのS波速度の推定が特に、重要となる。この推定に大きく影響する位相速度を表面波理論のみで評価すると、観測においてピーク状の位相速度が見られるサイトに対して、大きな誤差を生じる可能性があった。本研究で提案した全波動場理論を用いることで、そのような誤差を低減できることが予想される。

微動を用いた地下構造の各種推定手法の有効性を3次元堆積盆地モデルを用いた波動場から評価する際に、全波動場を本研究で提案したレイリー波とラブ波に分離する手法を適用することによって、より厳密に評価することができると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the behavior of microtremors in irregular subsurface structures, microtremor waveforms in a three-dimensional subsurface structure model were generated and phase velocities were calculated. In the region where the effect of irregularity is small, a peak-shaped phase velocity exceeding the S-wave in the half-space medium, which cannot be explained by the Rayleigh wave theory, was observed. It was confirmed by analyzing the microtremor array observation data that this was also observed at the actual site. The contribution of body waves to the generation of this phase velocity was evaluated by full-wavefield modeling.

On the other hand, numerical experiments confirmed that complex wavefields such as microtremors and seismic motions in sedimentary basin structures can be accurately separated into Rayleigh waves (P waves, SV waves) and Love waves (SH waves) by using their spatial derivatives.

研究分野：建築構造学、地震工学

キーワード：微動 不整形地盤 全波動場 実体波 表面波 位相速度 波動種別

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震の際に現れた震災の帯の発生には震源破壊過程だけでなく、神戸市域下の堆積層と基盤岩の地層境界面の不整形によって生じた地震波の干渉増幅が一因となった。最近では、2018年大阪府北部の地震において、震源域上から西へ10km程度離れた箕面市でも同地震による最大震度と同じ震度6弱が観測され、その原因に有馬-高槻断層帯に沿って分布する地溝帯による影響が推察されている。さらに、東北地方太平洋沖地震や2004年紀伊半島南東沖の地震による関東平野や大阪平野での記録の比較から、堆積層内を伝わる波の伝播経路の違いにより、同じ地点であっても地震動の卓越周期が大きく変化することが示された。これらの事例は、来るべき内陸地震や海溝型地震の強震動評価には震源モデルの設定と共に、不整形な地下構造の高精度なモデル設定も重要であることを示している。

地下構造探査手法の一分類として微動探査がある。微動探査は日常存在する微小な振動から地下構造固有の情報を抽出することにより構造を推定することができ、国や自治体などの被害予測事業においても多く適用されている。また、機動性やコストパフォーマンスにおいて極めて優れており、発展途上国など、地震防災対策のための資本が十分でない地域への適用も今後、増えると考えられる。観測点周辺の構造を推定するために、実用化されている微動探査手法としては主に、1) 表面波位相速度の周期依存性、2) 水平動と鉛直動の振幅比の周期依存性(H/Vスペクトル)を用いた二つがあり、これらの評価尺度を用いた不整形性を含む地下構造を推定することが合理的と考えられる。

2. 研究の目的

これまでの微動探査において、位相速度分散曲線およびH/Vスペクトルがよく用いられている。地下構造の推定の際には、この両者を評価尺度として併用することで推定精度の向上が期待できる。これらの評価尺度において、観測によって同定された結果に適合する様々なモデリング手法が用いられている。その殆どにおいて、表面波場が仮定されているが構造の不整形性やあるいは地層構成によっては、1) 実体波を含む全波動場としてモデリングが必要となる場合が考えられる。さらに、2) 微動に占めるSH波(あるいはラブ波)とP-SV波(あるいはレーリー波)の割合についても、上記の評価尺度に影響することが考えられる。従って、本研究ではより高精度な地下構造の評価手法を策定するため、どのような地下構造において全波動場モデリングが必要なのか、またそのようなモデリングによって観測による位相速度やH/Vスペクトルへの適合度が向上するのかについて、実際に地下構造が把握されているサイトを対象に調べる。さらに、微動に占める上記の波動種別の振幅割合を観測や微動場モデリングによって明らかにする。これら課題は、本研究当初の目的であった不整形地下構造の体系的な推定手法の構築に関する研究を行う中で、調査および評価が必要となったため、優先的に取り組むこととなった。

3. 研究の方法

不整形地下構造における微動の振る舞いを調べるため、3次元地下構造モデルを用いて求めた模擬微動波形を作成し、位相速度分散曲線およびH/Vスペクトルの空間分布を求め、地下構造(基盤面深度)との関係を調べた。微動にはレーリー波とラブ波のみならず多少とも実体波が含まれることを前提に、全波動場に基づく位相速度分散曲線及びH/Vスペクトルに対するモデリング手法を策定した。さらに、微動に占める各種波動成分の振幅比を定量的に評価するための手法を策定した。これら手法の妥当性を評価するため、既往の表面波理論との比較やボーリング探査によって地下構造が把握されているサイトを対象に取得した微動データの分析結果を上記モデリングによる再現を行った。

4. 研究成果

(1) 不整形地盤における微動の振る舞いを調べるため、3次元地下構造モデルを用いて求めた模擬微動波形を作成し、位相速度分散曲線を算出した結果、不整形地盤による影響が小さい領域においても、従前の水平成層モデルにおける表面波位相速度分散曲線では説明が困難なピーク状の位相速度(ピーク位相速度)が見られた。このような数値実験の結果のみならず、実サイト(ボーリング調査によるPS検層が実施されている)において得られた微動アレイ記録から同定した位相速度分散曲線においても同様のピーク位相速度が見られた。これらの分散曲線の形状は、従前の表面波理論では再現できないことを確認した(図1左側の図)。

(2) ピーク位相速度を含む比較的広帯域の位相速度の再現には、微動場の全波動場モデリングが大変有用であることがわかった(図1左側の図)。さらに、この全波動場モデリングは位相速度のみならず、H/Vスペクトルの再現にも有用であることも分かった(図1右側の図)。このような実体波の影響が強く現れた位相速度とH/Vスペクトルの再現に共通する全波動場モデリング手法は、これまで発表されておらず、今後の地下構造推定への微動の適用範囲の広がりとして期待できる。一方、この一連の研究を通じて、全波動場を模擬できる表面波場に基づく評価手法

についても検討した。その結果、速度構造モデルの設定において、最下層に極めて高速度な半無限媒質を仮想的に付与することによって、全波動場において見られた位相速度やHVスペクトルのピークが生じる周波数に限れば再現可能であることが新たにわかった(図2)。

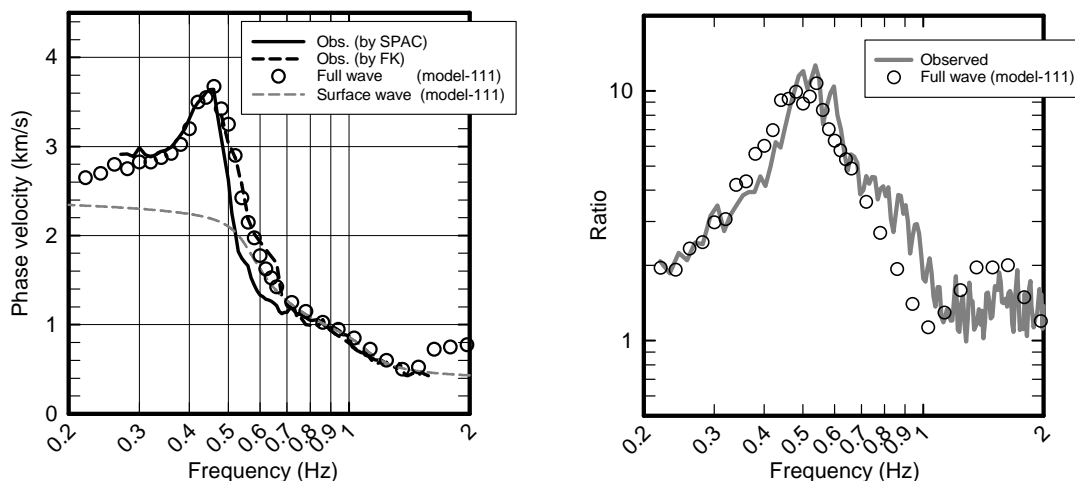


図1 観測と理論による位相速度分散曲線(左側)とH/Vスペクトル(右側)。model-111の基盤(半無限)層のS波速度は2.6 km/sが設定された。

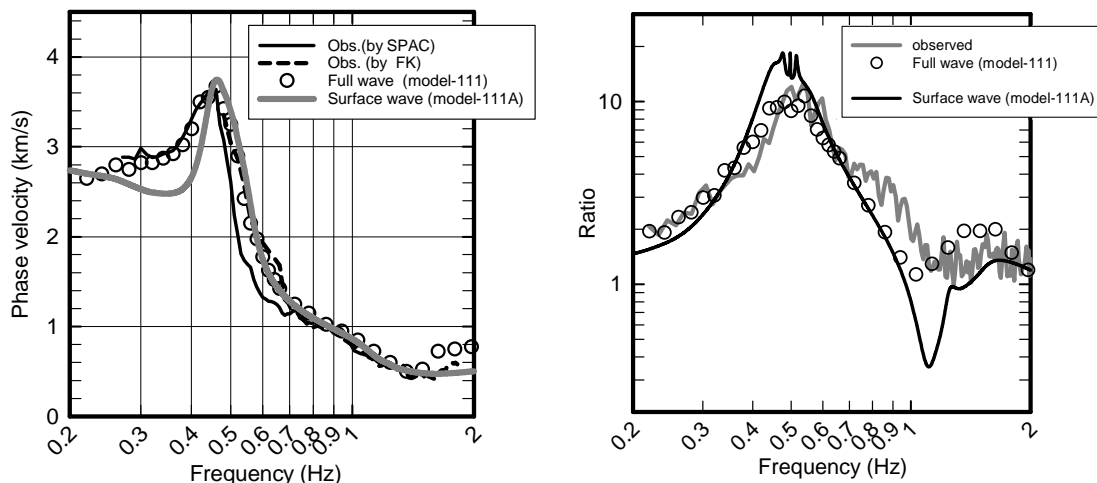


図2 仮想高速度層を付与したモデル(model-111A)による表面波場の位相速度(左側)とH/Vスペクトル(右側)。model-111Aの基盤(半無限)層のS波速度は4.6 km/sが設定された。

(3) 微動の水平成分にはSH波(あるいはラブ波)とP-SV波(あるいはラーリー波)が混在するため、これらの各成分を精度よく分離することが困難であったため、水平動の位相速度を用いた地下構造推定事例は極めて限られていた。そこで、水平動微動波形の空間微分量(回転成分)を用いることによって、微動水平成分に含まれるラブ波による位相速度を波動論的に抽出できることを示した。(図3)。このような新しい知見を微動探査へ利用することによって、地下構造の推定精度の向上が見込めると考えられる。

(4) 微動のやや長周期成分(脈動)は堆積盆地内に様々な方向から入射し、さらに同盆地内で反射を繰り返すことによって、極めて複雑な波動場を形成していると考えられる。その結果、不整形な地下構造のもとで場所によって微動に占める波動種別が変化していると考えられる。少なくとも、波形モデリング上

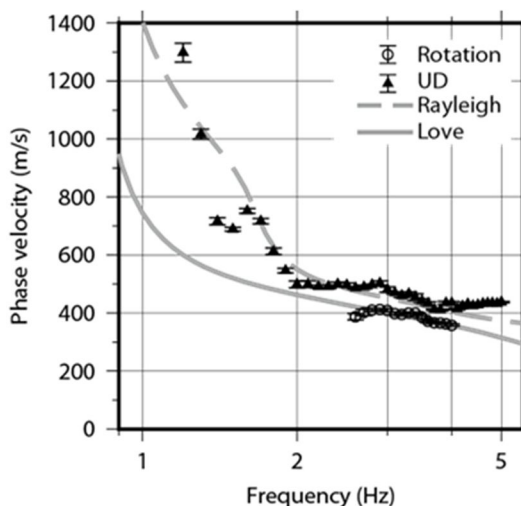


図3 観測による水平面回転成分と上下動の位相速度および表面波理論位相速度

で、この状態を知ることは上記の波動種別毎の位相速度の同定精度や H/V スペクトルへの各波動成分の振幅の割合を知るうえで大変有益である。そこで、このような複雑な波動場において、SH 波（あるいはラブ波）と P-SV 波（あるいはラーリー波）の振幅の割合を精度よく分離する手法を策定した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 M. Ohori, H. Uebayashi, and K. Yoshida	4. 巻 -
2. 論文標題 Phase velocity estimation using horizontal partial differential components of microtremor array measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cho I, Yoshida K, Uebayashi H	4. 巻 228
2. 論文標題 Microtremor surveys based on rotational seismology: theoretical analysis with focus on separation of Rayleigh and Love waves in general wavefield of microtremors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 589-603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggab358	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida K and Uebayashi H	4. 巻 -
2. 論文標題 LOVE WAVE PHASE VELOCITY ESTIMATION FROM MICROTREMOR ARRAY-BASED ROTATIONAL MOTION	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Ohori, H. Uebayashi ほか19名	4. 巻 -
2. 論文標題 A BENCHMARK TEST FOR MICROTREMOR EXPLORATIONS: PHASE VELOCITY FOR IRREGULAR SUBSURFACE STRUCTURES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cho., I. and T. Iwata	4. 巻 126
2. 論文標題 Limits and benefits of the spatial autocorrelation microtremor array method due to the incoherent noise, with special reference to the analysis of long wavelength ranges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB01985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirotoshi Uebayashi, Ikuo Cho, Michihiro Ohori, Kunikazu Yoshida & Hiroshi Arai	4. 巻 www.tandfonline.com/loi/txg20
2. 論文標題 The effect of body waves on phase-velocity determined by the spatial autocorrelation (SPAC) method, evaluated using full-wave modelling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Exploration Geophysics	6. 最初と最後の頁 13 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08123985.2020.1719825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 上林宏敏	4. 巻 84
2. 論文標題 複雑な3次元波動場のP, SV及びSH波への地表面地震動を用いた分離	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 513-521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirotoshi Uebayashi, Hiroshi Arai, Ikuo Cho, Kunikazu Yoshida, Michihiro Ohori, Koji Yamada	4. 巻 Online Early Publication
2. 論文標題 Microtremor Full-Wavefield Modeling of Effective Phase Velocity and Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio at Kyoto Reference Borehole Site: Comparison with Surface-Wavefield Modeling Based on a Velocity Structure with a Cap Layer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 19 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0120230067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉田 邦一 , 上林宏敏 , 大堀道広	4. 巻 75
2. 論文標題 和歌山平野における微動アレイ記録から回転成分を用いて 推定したラブ波位相速度	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 70-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3124/segj.75.70	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kunikazu Yoshida , Hirotooshi Uebayashi	4. 巻 111
2. 論文標題 Love-Wave Phase-Velocity Estimation from Array-Based Rotational Motion Microtremor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 121-128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0120200139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 長 郁夫、吉田 邦一、上林 宏敏
2. 発表標題 微動回転成分を用いて簡単なアレイでラブ波位相速度とR/Lを推定するための公式
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上林宏敏, 長 郁夫, 大堀道広, 吉田邦一, 新井 洋, 山田浩二
2. 発表標題 微動の全波動場モデリングによる位相速度とH/V スペクトル - 京都盆地基準ボーリング地点での検証 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大堀道広, 上林宏敏, 吉田邦一
2. 発表標題 微動の水平方向偏微分を用いた表面波の位相速度の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 邦一、上林 宏敏、大堀 道広
2. 発表標題 微動アレー記録をもとに求めた回転成分から推定した和歌山平野におけるラブ波位相速度
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新井 洋, 上林 宏敏
2. 発表標題 模擬微動場を用いた傾斜基盤を有する地盤のH/Vスペクトルに関する一検討
3. 学会等名 地盤工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大堀道広, 上林宏敏, 吉田邦一
2. 発表標題 微動の水平方向偏微分を用いたアレー解析に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会 第48回地盤震動シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上林宏敏, 関口春子
2. 発表標題 2018 年大阪府北部の地震による強震動分布の疑似trajectory 解析に基づく波動論的解釈
3. 学会等名 日本建築学会 第48回地盤震動シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ohori M., H. Uebayashi, I. Cho, K. Yoshida, H. Arai and et al.
2. 発表標題 A BENCHMARK TEST FOR MICROTREMOR EXPLORATIONS: PHASE VELOCITY FOR IRREGULAR SUBSURFACE STRUCTURES
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長郁夫, 吉田邦一, 上林宏敏
2. 発表標題 レーリー波減衰係数の評価ツールとしての微動アレイの可能性
3. 学会等名 JPGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長郁夫, 岩田貴樹
2. 発表標題 SPAC 法の解析可能最大波長とSN比の関係式
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大堀道広, 上林宏敏, 吉田邦一
2. 発表標題 微動アレイ観測より得られる水平面内の発散成分に着目した基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上林宏敏
2. 発表標題 地盤震動 - 東日本大震災後の主な地震・地震動の調査研究 -
3. 学会等名 日本建築学会 振動運営委員会主催シンポジウム「東日本大震災から10年」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大堀道広, 上林宏敏, 長郁夫, 吉田邦一, 新井洋
2. 発表標題 微動の位相速度に及ぼす実体波の影響
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大堀道広, 上林宏敏, 吉田邦一
2. 発表標題 微動アレイ観測より得られる水平面内の発散成分に着目した基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上林宏敏, 吉田邦一, 長郁夫, 新井洋, 大堀道広, 山田浩二, 小割啓史
2. 発表標題 京都盆地基準ボーリング地点における微動の位相速度と 水平上下スペクトル比の全波動場モデリングによる評価
3. 学会等名 第16回日本地震工学シンポジウム論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田邦一, 上林宏敏
2. 発表標題 レイリー波とラブ波位相速度を併用した地下構造モデルの推定精度
3. 学会等名 第16回日本地震工学シンポジウム論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上林宏敏, 新井 洋, 長 郁夫, 吉田邦, 大堀道広, 山田浩二
2. 発表標題 微動のピーク状位相速度の解釈とH/V スペクトルへのSH 波(ラブ波)パワーの影響 - 京都盆地基準ボーリング地点での検討 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	長 郁夫 (Cho Ikuo) (10328560)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	新井 洋 (Arai Hiroshi) (40302947)	国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・上席研究員 (82113)	
研究分担者	大堀 道広 (Ohori Michihiro) (50419272)	滋賀県立大学・環境科学部・教授 (13401)	
研究分担者	吉田 邦一 (Yoshida Kunikazu) (50425732)	福井大学・附属国際原子力工学研究所・准教授 (84422)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関