

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00807

研究課題名(和文) データ駆動型解析法による次世代全国地下構造モデル

研究課題名(英文) Next-generation Japan Integrated Velocity Structure Model by data-driven analyses

研究代表者

額 綱 一起 (Koketsu, Kazuki)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：90134634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：海域の屈折法探査の結果などを収集して、南海トラフや日本海溝に沿った付加体の構造や、西南日本の基盤構造などを再検討し、地下構造モデルを改訂した。大規模数値シミュレーションと稠密アレイ地震観測データ同化に基づく、次世代の地下構造推定手法を開発した。首都圏での微動データをMCMC法によって再解析して得られた深部地盤の3次元S波速度構造モデルを用いて地震動シミュレーションを行った。以上のような地下構造のモデル化手法を総合的に用いて、次世代の全国2次地下構造モデルを構築した。モデル構築の各段階において地震動シミュレーションを行い、その結果を観測記録と比較することにより、構築されたモデルを逐次、検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構築された全国2次地下構造モデルは、現在、広く使われている全国1次地下構造モデルの精度の高い後継として、学術的・社会的意義が高い。また、太平洋プレートの地殻・マンツルの不均質構造を、地震波速度の異方性を含めて詳細に評価した。特に、本研究で新規に評価する速度異方性については、長周期地震動の波形振幅や継続時間等に与える影響を検討し、今後の地下構造モデル整備の方向性を示した。首都圏の3次元モデルでは、推定誤差が及ぼす地震動評価結果への影響を検討した。さらに、首都圏での検討結果を踏まえて、熊本平野などの他地域でも微動観測データの分析を行い、地下構造のモデル化の推定精度に関する検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We collected the results of refraction surveys in the sea area, reexamined the structure of the accretionary prism along the Nankai Trough and the Japan Trench, and the crustal structure of southwestern Japan, and revised the velocity structure model. We developed a next-generation velocity structure estimation method based on large-scale numerical simulation and assimilation of dense array seismic observation data. A ground motion simulation was performed using a three-dimensional S-wave velocity structure obtained by reanalyzing microtremor data in the Tokyo metropolitan area with the MCMC method. A next-generation Japan Integrated Velocity Structure Model (Japan Integrated Velocity Structure Model Version 2) was constructed by comprehensively using the velocity structure modeling methods described above.

研究分野：応用地震学

キーワード：地下構造モデル 地殻構造モデル 地盤構造モデル 地震動シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

2003年十勝沖地震(マグニチュード(以下、 M と略記)8.0)では、震央から約250km離れた苫小牧周辺の多数の大型石油タンクが、スロッシング等により被害を受けた。その中でも苫小牧港付近の二基の3万kl級タンクでは、浮き屋根が破損したため内容物のナフサ等が空気に暴露し、何らかの原因で引火して全面火災に到って注目を浴びた。中でもスロッシング等の原因がいわゆる長周期地震動であったため、この地震現象が学界だけでなくマスメディアなど社会全般でクローズアップされた。その後、2004年紀伊半島南東沖地震(M 7.4)で被害を伴わない長周期地震動が発生しただけで数年間経過した後、2011年東北地方太平洋沖地震(M 9.0)による長周期地震動(図1)が震央から400km離れた首都圏の高層ビルの内装材・エレベータ・家具などに被害を与え、さらには750km以上離れた大阪臨海部の超高層ビルでも同様の被害があった。

長周期地震動の研究も2003年十勝沖地震の直後に始まり、遠方の堆積平野(大都市は概ね堆積平野に立地している)での長周期地震動はその伝播経路および堆積平野そのものの地下構造が強く影響することが明らかになった。さらには、都市圏の立地する平野ごとに個性があり、たとえば大阪平野や濃尾平野では周期5~6秒の長周期地震動が発達するのに対して、関東平野では7秒から10秒以上の長周期地震動が発達するらしいことがわかってきた。こうした機運の中で、科研費基盤研究(A)(2007~2010年度)などが採択されて、「全国1次地下構造モデル」が構築され、それを用いた長周期地震動のハザードマップ「長周期地震動予測地図」が作られた。これら研究成果は審議を経て地震調査研究推進本部(以下、地震本部と略記)から2009年から2012年にかけて順次、公表され、それらは研究者などに広く利用されている。しかし、広く利用されるにつれ、いろいろな不具合が指摘されるとともに、全国1次地下構造モデルの不完全さが明らかになってきた。

2. 研究の目的

長周期地震動を中心とした研究の流れとは独立に、1970年代からの地下構造モデルに関する研究の流れがある。その初期の頃の大規模な地下構造探査では主力であった屈折法探査が1980年代までにはほぼ終了し、1990年代以降は反射法探査やボーリング検層が中心になった。ポータブルな地下構造探査としては重力探査に長い歴史があるが、1990年代以降は常時微動の位相速度や水平/上下スペクトル比などからS波速度構造を求める微動探査がさかんに行われるようになった。また、こうした能動的(active)にデータを取りに行く手法とは別に、1995年の阪神・淡路大震災以降、各種地震計が高密度に全国展開されるようになったため、それらに記録されている自然地震や常時微動のデータを受動的(passive)に利用する手法もさかんになってきた。

もうひとつ独立した研究の流れとして地震動シミュレーションの分野がある。こちらも長い研究の歴史があるが、現実的な問題に不可欠な3次元シミュレーションの本格的な研究は1990年代に始まった。この時代の地震動シミュレーションは震源インバージョンの結果と3次元地下構造モデルを用い、差分法やボクセル有限要素法といった領域法による数値計算が主流になっている。研究例としては、1995年兵庫県南部地震時の震災の帯の解明や、2000年鳥取県西部地震の広域地震動伝播、2003年十勝沖地震の長周期地震動、2004年紀伊半島南東沖地震や2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震などの強震記録の再現が挙げられる。

これらの研究の進展を踏まえて、全国1次地下構造モデルの不具合が解消された、精度の高い次世代全国地下構造モデルを構築することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

渡辺・他(日本建築学会構造系論文集, 700, 701-710, 2014)は2004年紀伊半島南東沖地震による長周期地震動に対して全国1次地下構造モデルを用いたシミュレーションを行い、観測された地震動記録と比較した。その結果の図面を見ると御前崎より遠方の観測点ではシミュレーション結果が過小評価になっている。この点は予備的研究でも確認され、これを改善するためには付加体およびその周辺の数値構造を併せて改良しなければならないことはわかっているので、その改良を行う。川辺・他(地盤震動シンポジウム, 41, 3-10, 2013)は2011年東北地方太平洋沖地震による長周期地震動に対して、同じく全国1次地下構造モデルを用いたシミュレーションを行った。その結果は観測と比較的良好な一致が見えるが、東北から関東にかけてやや過小評価になっており、中部から近畿では逆にやや過大評価になっているので、それらの改良を行う。

主要な堆積平野では、防災を動機づけとした多種類の構造探査が行われている場合が多いので、データの量的規模だけでなく、データの種類の多様性が重要になる。そうした場合、データの種類ごとにモデルへの影響力を評価した上で行うことが望ましいから、そうした評価が可能なマルコフ連鎖モンテカルロ法などを導入する。

地下構造モデルの有効性確認とチューニングを、データ同化シミュレーションに基づき進める。従来は、仮定した震源モデルを用いた地震動シミュレーションを行い、観測波形との比較からモデルの検証とチューニングが手作業で進められてきた。これに対し、本研究では近年の高性能スーパーコンピュータを用いた高速並列計算とデータサイエンスの視点を積極的に取り入れ、観測波形を地震動シミュレーションに直接入力して計算を進める、計算と観測の同化を図った地震動シミュレーションの実現に向けた新たな手法開発を行う。この観測波形同化シミュレーションでは、気象モデリングで用いられている粒子法（あるいはカルマンフィルタ法）に基づいて、モデルパラメータを調整した数十～数百モデルでの地震動計算を並列して進め、観測データと計算の一致度の尤度評価から、モデルの修正を繰り返し進める。

4. 研究成果

JAMSTEC による海域の屈折法探査の結果や平均的な P 波速度構造などを収集して、付加体の構造を再検討した。南海トラフに沿った付加体だけでなく、東北地方太平洋沖地震のシミュレーションに影響する可能性があるため、日本海溝に沿った付加体の構造も再検討した。それらに加えて、1次モデルにおいて西南日本の基盤構造が複雑過ぎる面があったのでそれも再検討し、以前の 0.5 次地下構造モデルに戻した。以上の再検討結果をまとめたものを全国 2 次地下構造モデルとし、1次モデルとの比較を図 1 に示した。2 次モデルを用いて東北地方太平洋地震の長周期地震動をシミュレーションしてみると、川辺・他（2013）が指摘した問題点は概ね改善しているので、追加の改訂は行わなかった。また、紀伊半島南東沖の地震（2004）の前震に対する長周期地震動シミュレーションを行った。その結果では、渡辺・他（2014）が指摘した東京低地での過小評価は見られなかったため、この件でも追加の改訂を行わなかった。さらに、紀伊半島南東沖の地震（2004）の本震に対する長周期地震動シミュレーションを行ったところ、前震と同じように東京低地での問題点は現れなかったが、房総半島に限った過小評価があり、この点の改善は今後の課題とする。

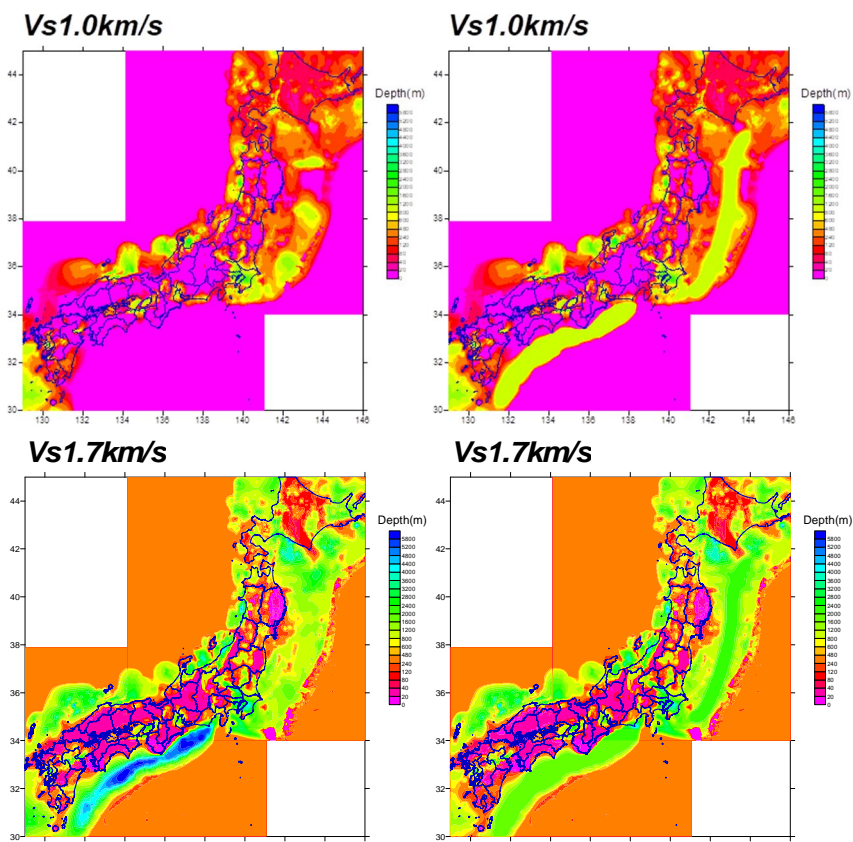


図 1 .S 波速度 1.0 km/s 層上面の深さ分布(上)と S 波速度 1.7 km/s 層上面の深さ分布(下)．左が全国 1 次地下構造モデル、右が全国 2 次地下構造モデルを表す。

大規模数値シミュレーションと稠密アレイ地震観測データ同化に基づく、次世代の地下構造推定手法を開発した。北西太平洋に設置された海底地震計アレイ観測データを用いて、太平洋プレートの地殻・マントルの不均質構造を、地震波速度の異方性を含めて詳細に評価し、海溝

型地震による短周期から長周期地震動の推定に不可欠な海域下の速度構造モデル（非弾性、速度異方性を考慮）を推定した．特に，本研究で新規に評価する速度異方性については，長周期地震動の波形振幅や継続時間等に与える影響を検討し，今後の地下構造モデル整備の方向性を示した．

首都圏での微動データを MCMC 法によって再解析して得られた深部地盤の 3 次元 S 波速度構造モデルを用いて地震動シミュレーションを行った．特に，3 次元モデルの推定誤差が及ぼす地震動評価結果への影響を検討した．また，首都圏での検討結果を踏まえて，熊本平野などの他地域でも微動観測データの分析を行い，深部地盤のモデル化の推定精度に関する検討を行った．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Dhakal, Y. P., T. Kunugi, H. Yamanaka, A. Wakai, S. Aoi, and A. Nishizawa	4. 巻 75
2. 論文標題 Estimation of source, path, and site factors of S waves recorded at the S-net sites in the Japan Trench area using the spectral inversion technique	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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） 10.1186/s40623-022-01756-6	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 Miyazawa, M., R. Kiuchi, and K. Koketsu	4. 巻 93
2. 論文標題 Attenuation Characteristics of High-Frequency Ground Motions from Local Sources Caused by Great Subduction Zone Earthquakes in Northeast Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Seismological Research Letters	6. 最初と最後の頁 2686-2699
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/0220210353	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 Tsuno, S., M. Noyori, and H. Yamanaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Azimuthal dependence on amplifications for long-period ground motions propagating in the Kanto Basin, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Seismology	6. 最初と最後の頁 s373-s385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10950-022-10072-1	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 Furumura, T. and B. L. N. Kennett	4. 巻 233
2. 論文標題 Distinctive seismic reflections from the subducting Pacific slab for earthquakes in the Ryukyu arc	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1213-1228
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggac514	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 該当する

1. 著者名 Furumura, T. and B. L. N. Kennett	4. 巻 126
2. 論文標題 Azimuthal Variation of Lithospheric Heterogeneity in the Northwest Pacific Inferred From Po/So Propagation Characteristics and Anomalous Large Ground Motion of Deep In-Slab Earthquakes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	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) 10.1029/2021JB021717	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 該当する

1. 著者名 Furumura, T. and T. Maeda	4. 巻 225
2. 論文標題 High-resolution source imaging based on time-reversal wave propagation simulations using assimilated dense seismic records	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	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) 10.1093/gji/ggaa586	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 引田智樹・嶺織一起・三宅弘恵	4. 巻 20
2. 論文標題 震源特性の偶然的な不確かさに起因する地震動 シミュレーションのばらつきに関する検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 3_21~3_34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.20.3_21	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 Furumura Takashi, Maeda Takuto	4. 巻 225
2. 論文標題 High-resolution source imaging based on time-reversal wave propagation simulations using assimilated dense seismic records	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 140~157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa586	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 Furumura Takashi, Kennett Brian L N	4. 巻 221
2. 論文標題 Propagation of distinct Love-wave pulses from regional to teleseismic distances in continental and oceanic environments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 665 ~ 682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa028	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 該当する

1. 著者名 Oba Atsuki, Furumura Takashi, Maeda Takuto	4. 巻 125
2. 論文標題 Data Assimilation Based Early Forecasting of Long Period Ground Motions for Large Earthquakes Along the Nankai Trough	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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) 10.1029/2019JB019047	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 Chimoto Kosuke, Yamanaka Hiroaki	4. 巻 110
2. 論文標題 Tuning <i>S</i> -Wave Velocity Structure of Deep Sedimentary Layers in the Shimousa Region of the Kanto Basin, Japan, Using Autocorrelation of Strong-Motion Records	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 2882 ~ 2891
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0120200156	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 Chimoto, K. and H. Yamanaka	4. 巻 50
2. 論文標題 S-wave velocity structure exploration of sedimentary layers using seismic interferometry on strong motion records	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Exploration Geophysics	6. 最初と最後の頁 625-633
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 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 該当する

1. 著者名 Furumura Takashi, Kennett Brian L N	4. 巻 221
2. 論文標題 Propagation of distinct Love-wave pulses from regional to teleseismic distances in continental and oceanic environments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 665 ~ 682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa028	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 該当する

1. 著者名 Kobayashi Hiroaki, Koketsu Kazuki, Miyake Hiroe	4. 巻 71
2. 論文標題 Rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Ibari earthquake derived from strong motion and geodetic data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-019-1041-7	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 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 瀧藤 一起, 三宅 弘恵, 鈴木 晴彦
2. 発表標題 全国2次地下構造モデル
3. 学会等名 Japan Geoscience Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧藤一起
2. 発表標題 点震源地震動の近地項の幾何減衰と放射パターン
3. 学会等名 Japan Geoscience Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津野靖士, 山中浩明, 地元孝輔, 宮腰寛之, 高井伸雄, 神野達夫, 重藤迪子, 是永将宏, 三宅弘恵, 松島信一
2. 発表標題 東京湾西岸部における1次元浅部深部統合地盤モデルの構築
3. 学会等名 日本地震工学会2022年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田伸之・笠松健太郎・山中浩明
2. 発表標題 波形逆解析に関する計算コードの共有化への試み
3. 学会等名 物理探査学会第143回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩井創・纈纈一起・小林広明
2. 発表標題 震源断層近傍の長周期パルスと地殻変動を考慮した2016 年熊本地震の破壊過程
3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮澤理稔・木内亮太・纈纈一起
2. 発表標題 プレート間巨大地震の強震動生成域のための距離減衰式
3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠松健太郎, 山中浩明
2. 発表標題 三次元 S 波速度構造モデル高精度化のための波形インバージョンに基づく二次元構造推定法の有用性の検証
3. 学会等名 物理探査学会第143回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山中浩明, サイフディン, 山田伸之, 地元孝輔
2. 発表標題 MCMC法を用いたレイリー波位相速度の逆解析による関東平野の深部地盤構造の推定
3. 学会等名 物理探査学会第143回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古村孝志・前田拓人
2. 発表標題 地震観測データと逆伝播計算のデータ同化に基づく震源即時推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Furumura & BLN Kennett
2. 発表標題 Azimuthal variation of lithospheric heterogeneity in the northwest Pacific inferred from Po/So propagation characteristics
3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山中浩明・地元孝輔・山田伸之
2. 発表標題 MCMC法による逆解析を用いた関東平野の位相速度データの再解析
3. 学会等名 物理探査学会第141回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古村孝志・B. L. N. Kennett
2. 発表標題 Propagation of distinctive Love-wave pulses in continental and oceanic environment
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Furumura, T. and B. L. N. Kennett
2. 発表標題 Regional to teleseismic distance propagation of distinctive Love-wave pulses in continental and oceanic environments
3. 学会等名 2019 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Kawasaki, Kota Koshika, Om Pradhan, Hideki Kurosawa, Kohei Abe, Masato Yamamoto, Dai Nobuoka, Yoshikazu Matsubara, Monika Jha, Chintan Timsina, Suresh Shrestha, Prakash Pokhrel, Dinesh Nepali, Mukunda Bhattarai, Soma Nath Sapkota, Hisanori Matsuyama, Hiroe Miyake, Kazuki Koketsu
2. 発表標題 Subsurface Structure of the Kathmandu Valley Revealed by Seismic Reflection and Gravity Surveys
3. 学会等名 2019 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Kazuki Koketsu	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 341
3. 書名 Ground Motion Seismology	

1. 著者名 纈織 一起	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 192
3. 書名 地震: どのように起きるのか	

〔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	山中 浩明 (Yamanaka Hiroaki) (00212291)	東京工業大学・環境・社会理工学院・教授 (12608)	
研究分担者	古村 孝志 (Furumura Takashi) (80241404)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	

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
---------	---------