

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02074

研究課題名(和文) 海岸地形発達史に基づく巨大地震イベントの解読

研究課題名(英文) Reconstruction of paleoseismological events based on the seismic driving model

研究代表者

菅原 大助 (Sugawara, Daisuke)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：50436078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：駿河 南海トラフ地域を対象に、海岸地形の形成・発達と古地震・古津波との関係を検討した。静岡市清水区の調査では、西暦400年頃に大規模な隆起イベントがあったことが判明した。牧之原市の調査では、4世紀前半～5世紀前半に津波と推定されるイベント砂層を確認し、その約150年後から海岸への土砂供給が増大したことを示唆する結果を得た。これは静岡市清水区で確認された隆起イベントの年代に対応している。焼津市では先史および歴史時代の津波堆積物を確認し、1096年の東海地震による海底地すべりとその後の地形発達を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来とは異なる観点から、より多くの地域・時代について古地震・古津波履歴を復元しリスク評価を行うための手法として、巨大地震後の海岸地形の形成・発達の調査研究が有効であることを示した。ひとつの地震がどのように海岸地形に反映されるのかは、地域によって異なるであろう。今後、同様の調査研究を進めていくことで、国内各地における地震・津波の履歴とリスクに対する理解を深め、適切な対応の検討に資する知見を提示できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, relationship between formation and development of coastal topography and paleo-earthquake and tsunami were examined. In the Shimizu Plain, Shizuoka City, a large-scale coseismic uplift that took place around ca. 400 AD was identified based on the analysis of data from ground-penetrating radar (GPR) and sedimentary deposits. In Makinohara City, a possible tsunami deposit dated at early 4th to 5th century was detected. This coincides with the ca. 400 AD uplift in the Shimizu Plain. An increase in sediment supply to the coast 150 years after the tsunami was inferred from the GPR and sediment data. In Yaidzu City, a prehistoric and three historic tsunami deposits were found from the GPR and sediment data. A large-scale landslide due to 1096 Tokai earthquake and resulting development of coastal topography was inferred based on the analysis of the data.

研究分野：地質学

キーワード：古地震 古津波 海岸地形 堆積物 地下レーダー

1. 研究開始当初の背景

津波堆積物は、歴史記録よりも古い時代に遡って過去の地震・津波のデータを得られるという利点があり、低頻度巨大地震・津波の中長期的リスクを検討する際の資料として調査研究が進められてきた。しかし、津波堆積物の形成と保存は地形や堆積環境に左右され、また分布の確定や年代測定における誤差の問題もある。津波堆積物に基づく地震・津波規模の評価手法も確立されていない。より多くの地域・時代について地震リスク評価を行うために、従来とは異なる観点から地形・地質記録を解読する研究の必要性がある。

2. 研究の目的

歴史記録や津波堆積物等と並ぶ地震リスク評価の新たな指標として、海岸地形の形成・発達史（集水域—海岸の土砂動態の時間的変化）から巨大地震の履歴を解読する手法の構築を行う。巨大地震に伴い後背地から海岸域への土砂供給量が増大すると考えられる駿河—南海トラフ地域を対象に、①地下レーダー（GPR）を用いた海岸地形の構造調査、②ボーリング試料の分析と年代測定、③古地形復元を含む数値的検討を組み合わせることで海岸地形の形成・発達史と古地震との関係を明らかにし、その地震像を復元する。

3. 研究の方法

以下の①～③について調査研究を実施した。①地中レーダー調査：駿河—南海トラフ地域（図1）において、海岸平野の浜堤列、扇状性三角州、砂嘴等を対象にGPRによる地形構造の広域的な調査を行った。②試料採取・分析：巴川右岸（静岡市清水区）、坂口谷川右岸（牧之原市）、瀬戸川左岸（焼津市）を選んで詳細なGPR調査を行い、その結果に基づいて試料採取や粒度・年代等の分析を行った。③地形形成イベント解析：地中レーダーおよび地層データを基に、海岸地形発達と古地震の関係について検討を行った。

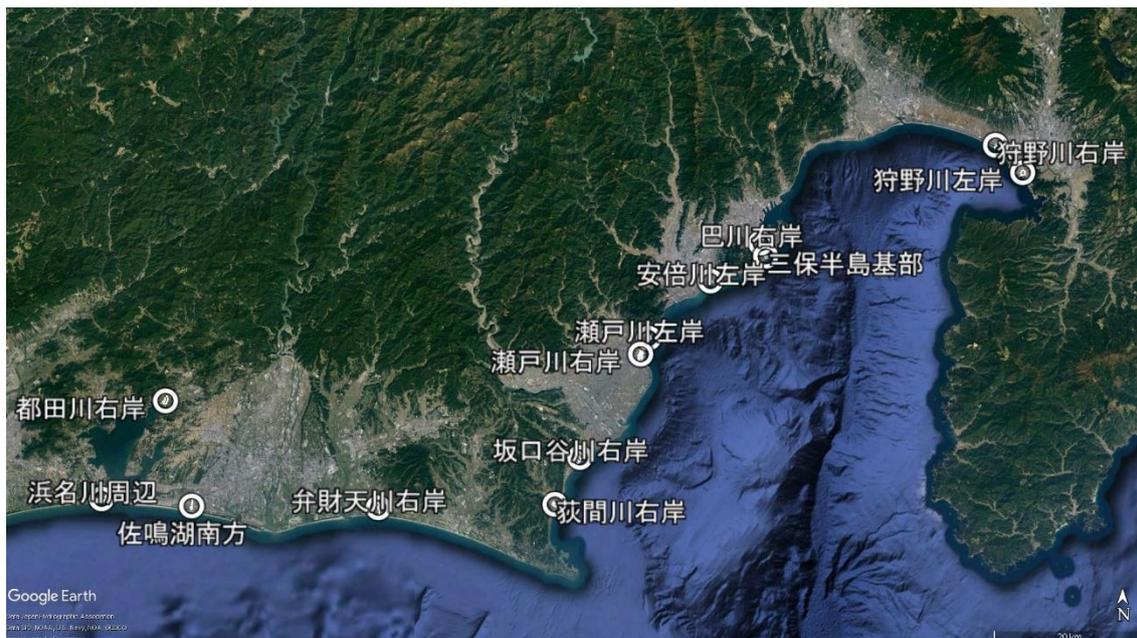


図1 本研究でGPR調査を実施した地域。

4. 研究成果

(1) 巴川右岸（静岡市清水区村松周辺）

海岸線と直交する測線 AB で GPR 調査を行ったところ、深度 1～2m の間で海側に傾斜する明瞭な反射面が確認された（図 2）。その堆積環境は浜堤の海側斜面に対応すると考えられる。海側に傾斜する反射面は測線 AB のほぼ全体にわたって確認でき、海岸線が北東方向に連続的に前進してきたことを示していると考えられる。深度 2m よりも下は地下水面で海水の影響を受けていると考えられ、データは得られなかった。測線 CD と EF では、深度 1m 付近の反射面は水平またはほぼ水平であった（図 2）。この付近の堆積環境は測線 AB と異なることを示している。なお、深度 1m よりも浅い位置の反射面は乱雑であり、盛り土などの人工改変の影響を示していると考えられる。

測線 CD 付近で採取した堆積物試料は、下位は礫や貝殻を含む細粒～中粒砂、上位は泥の偽礫

や植物片を含む粗粒砂で構成されていた (図3)。このことは、調査地点の堆積環境が、潮間帯 (Facies A, 標高-0.8~+0.8m) から潮下帯 (Facies B, -0.8mより下)、海浜 (Facies C, +0.8mより上) へと変化したことを示していると考えられる。堆積物試料の放射性炭素同位体 (^{14}C) 年代測定を行ったところ、Facies AからBへの変化 (海水面の上昇) は紀元前1257年から西暦400年の間に起こったことが判明した (図3)。この海面上昇は全球的な海水準変動に対応したものではなく、調査地点周辺で生じているプレートの沈み込みに伴う沈降によるものと考えられる。Facies BはFacies Cへ急変している。この変化が示す隆起量は1.6mで、Facies B,Cから得られた年代値から、隆起は西暦398~428年に起こったことが明らかになった。これは、プレート境界型地震による地殻変動であると考えられる。歴史上の駿河湾内のプレート境界地震は1361年正平東海地震が最古であり、その1つ前の先史地震は西暦400年頃に起こったと考えられる (図3)。

これらの結果は、駿河トラフにおける隆起を伴う地震の発生間隔を明らかにする上で重要な知見である。なお、この成果は静岡大学を通じてプレスリリースを行い、新聞等により報道された。

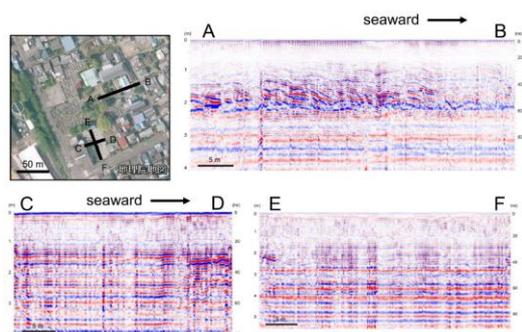


図2 巴川右岸 (静岡市清水区村松周辺) の調査測線 AB, CD, EF と地下レーダー断面 (Kitamura et al., 2019)。

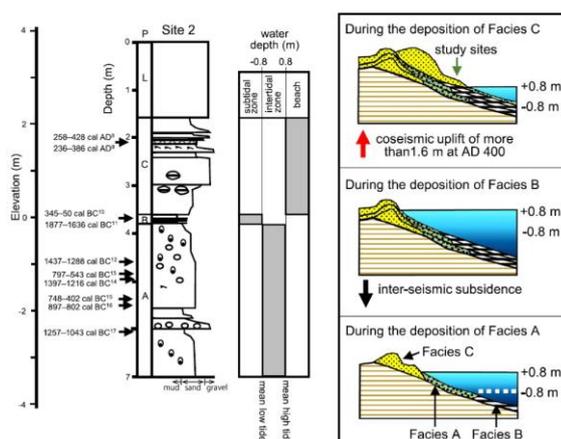


図3 巴川右岸の地層の年代と想定される地形発達過程 (Kitamura et al., 2019)。

(2) 坂口谷川右岸 (牧之原市細江および静岡)

図4に、航空レーザー測量による調査地域の地形段彩図 (基盤地図情報) と、海岸線と直交する方向に設定した地下レーダー調査測線1・2とサンプリング位置を示した。また、図5に測線1の区間ABのレーダー断面、図6に測線2の区間CDのレーダー断面を示した。測線1, 2ともに地形段彩図にみられる浜堤の高まりに対応する位置で、海側に傾斜する明瞭な反射面を確認できる。地形段彩図上で浜堤と浜堤の間は、反射が明瞭でないか、不規則である。また、区間ABとCDが横切る幅400mほどの浜堤は、背後の湿地に向かって標高が低下する位置でも海側に傾斜する反射面を示している。このことは、この浜堤が2つの幅の狭い浜堤が複合したものであることを示している。内陸に向かって標高が低下していく区間に浜堤頂部が埋没していると考えられるが、地形データからこのことを把握することは困難である。浜堤と浜堤の間にはやや凹凸を示すものの水平な反射面を確認でき、堤間湿地的な堆積環境であると推定される。測線1では、現在の海岸線から地点Aまでの範囲は海側に緩く傾斜する反射面が連続していた。これは、汀線が漸進的に海側へ移動してきたことを示すと考えられる。

図4に示す7箇所機械ボーリングによる試料採取を行った。T1-1とT1-4では、ボーリングコアの下部は主に細粒砂からなり、上位に向かって粗粒化する傾向を示している。粗粒砂~礫層が多数挟まれており、下位層準との境界は極めて明瞭で、高波などのイベントにより堆積した可能性を示している。T2-3bでは、細粒砂層中に薄い粗粒砂層が断続的に挟まれている。その他の地点においても、堆積物のほとんどは砂礫層によって構成されていた。砂礫層の粒子は、当地域の背後地に典型的に分布する、砂・泥等の堆積岩および火成岩の岩片が主体であった。砂礫層に、貝殻片や木炭といった年代測定に供することのできる試料は含まれていなかった。

地点T1-1は、地形段彩図上では浜堤上に位置するが、レーダー断面では、幅の狭い浜堤と浜堤にあり、異なる堆積環境が示唆される。ここでは、コアの深度2.8~3.4mに厚さ約0.6mの分解の良い有機質泥層が認められた (図7)。有機質泥層中には、層厚約5cmのイベント性の砂層が認められた。この砂層を構成する粒子の鉱物組成は砂礫層と同様であり、粒径は0.25~0.5φ (中~粗粒砂) にピークを示した。この砂層と上下の有機質泥層との境界は明瞭であった。TNS分析を行ったところ、砂層およびその直下の有機質泥層ではTOC (全有機炭素) とTS (全硫黄)

が高い傾向を示した (図7). C/S比は砂層とその直上の有機質泥層で高い傾向を示した.

有機質泥層とイベント砂層の堆積年代を明らかにするため 14C 年代測定を行った. その結果, 有機質泥層の最下部からは 539-388 cal BC (95.4%), 最上部からは 416-556 cal AD (95.4%) の年代値が得られた. また, イベント砂層直下からは 321-428 cal AD (89.1%) /258-284 cal AD (5.9%) /290-295 cal AD (0.4%), 直上からは 336-436 cal AD (75.6%) /486-534 cal AD (16%) /446-472 cal AD (3.8%) の年代値が得られた (図7). この地点では, およそ紀元前5世紀前後から紀元後6世紀頃にかけての800~1000年の間, 湿地環境が成立していたと推定される. イベント砂層の堆積年代は4世紀前半~5世紀前半と推定され, 低頻度の事象によるものと考えられる. イベント砂層とその上下でのTSの値を考慮すると, 海洋起源のイベントである可能性がある. このイベントの年代は巴川右岸で明らかになった隆起を伴う地震の年代と整合している. 遅くとも6世紀半ばには湿地環境から海浜環境への遷移が起こっていることから, 地震から約150年後, 当地域への海浜への土砂供給量が大きく増大し, 地点T1-1の湿地が砂に覆われる環境に変化したことが示唆される. 現在の地点T1-1は海岸から700mほど離れており, 粗粒な砂が到達する環境ではない. このことを考慮すると, 遅くとも6世紀半ば以降, 当地域の海岸線は大きく海側に前進したと考えられる.

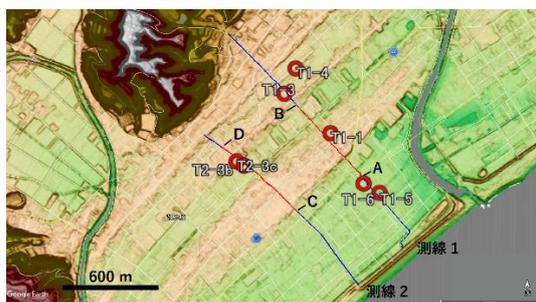


図4 坂口谷川右岸の地下レーダー調査測線とサンプリング位置.

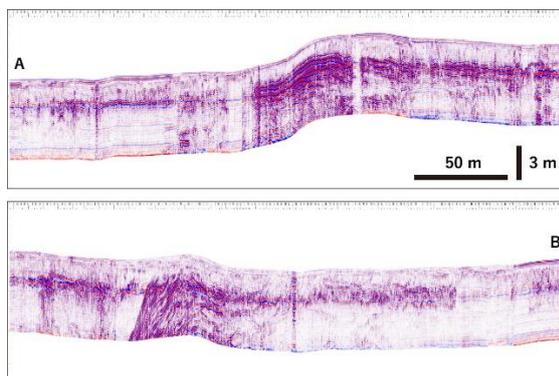


図5 測線1の区間ABの地下レーダー断面.

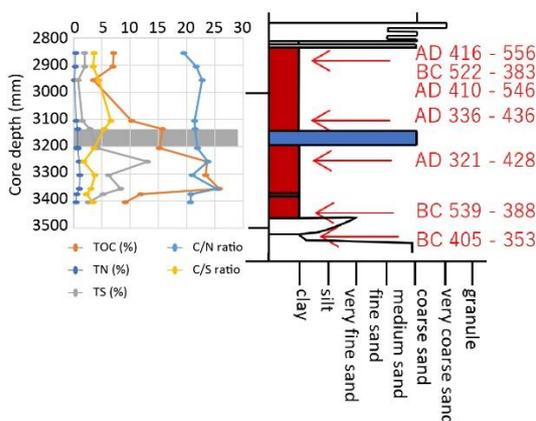


図7 地点T1-1で確認されたイベント砂層の14C年代およびCNS分析結果.

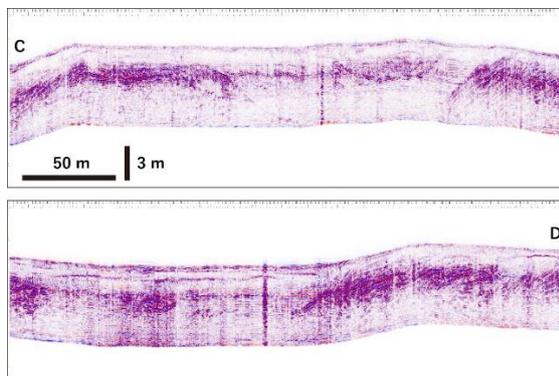


図6 測線2の区間CDの地下レーダー断面.

(3) 瀬戸川左岸 (焼津市浜当目)

測線 AB および CD に沿って, 地下レーダーを用いて地層構造の調査を行った (図8). 海岸線と直交する測線 AB では, 汀線に近い位置 (40-60m) で海側に傾斜する反射面が確認された (図9). これは, 浜堤の海側斜面に相当する堆積環境を示していると解釈できる. 汀線から 100-150m では, 反射面は陸側に緩く傾斜している. 汀線から 160-380m では, いくつかの緩く傾斜した反射面がみられるが, 全体的には水平であり, 浜堤背後の湿地やラグーン環境を示していると考えられる. この区間では, 埋没した浜堤や汀線を示す明瞭な反射面は確認されなかった. 海岸線と平行な測線 CD では, 汀線から 320-360m と 430-450m を除き, 反射面に目立った特徴は見られなかった (図9). この測線の範囲内では, 堆積物はほぼ水平に成層していると考えられる.

この地域で採取された堆積物試料のうち, 海側に近い地点1と2では, ラグーン環境から前浜・後浜への環境変化を示す岩相変化が確認されている. また, 過去5000年間で合計4層のイベント性砂層が含まれており, 最も古い Sand1 の堆積年代は紀元前805-405年, 上位3層 (Sand 2, 3, 4) はそれぞれ1096年 (永長東海地震), 1361年 (正平・弘安東海地震), 1498年 (明応東海地震) 頃の年代値が得られている.

汀線付近の地点で採取された堆積物試料では、コアの上部が前浜および後浜堆積物からなっていた。測線 AB の地下レーダーの反射面は海側または陸側に傾斜しており（図 9）、試料観察結果と整合的である。また、測線 CD の地下レーダー画像で断続的にみられる水平な反射面（図 9）は、内陸部で採取された柱状試料に確認された岩相区分に対応している可能性がある。地下レーダーの反射面は、粒子形状・粒径、空隙率と間隙水の性状といった物性の変化によって現れる。浜当目地区では、ラグーン環境の泥と前浜・後浜の砂の境界で、堆積物の物性の変化が最も大きいと考えられ、測線 CD に沿った連続的な反射面はこれに対応するものと考えられる。調査に用いた地下レーダーの鉛直方向の解像度は 15 cm 程度であるため、イベント砂層 2～4 を画像上で分離できるかどうかは、層と層の間隔や層厚に依存する。測線 CD の 260–380m に現れた不連続な水平反射面は、柱状試料で確認されたイベント砂層の重なりに対応する可能性がある。測線 AB の 280–360m でも不連続な水平反射面を確認できることから、イベント砂層は浜当目地区の広範囲に分布していると考えられる。

年代値と地下レーダーおよび採取試料で確認された分布から、イベント砂層 1～4 は津波堆積物であると考えられる。また、汀線付近の地点で確認された岩相の変化から、1096 年頃に浜当目地区の海岸付近の環境が後背湿地から浜堤へと遷移したことが推定された。この環境変化は 1096 年永長東海地震によって大規模な海底地すべりがおこり、海岸線が陸側に前進したことによるものと考えられる（図 10）。

これらの結果は、駿河トラフにおける地震に伴う海底地すべりの発生可能性とその規模を明らかにする上で重要な知見である。なお、この成果は静岡大学を通じてプレスリリースを行い、新聞等により報道された。



図 8 地下レーダー調査測線 (Kitamura et al., 2020).

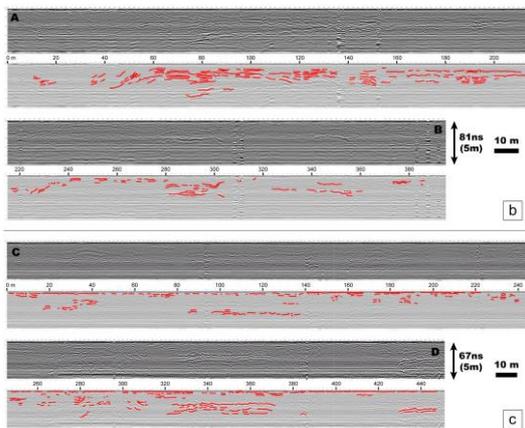


図 9 測線 AB と CD に沿った地下レーダー断面 (Kitamura et al., 2020).

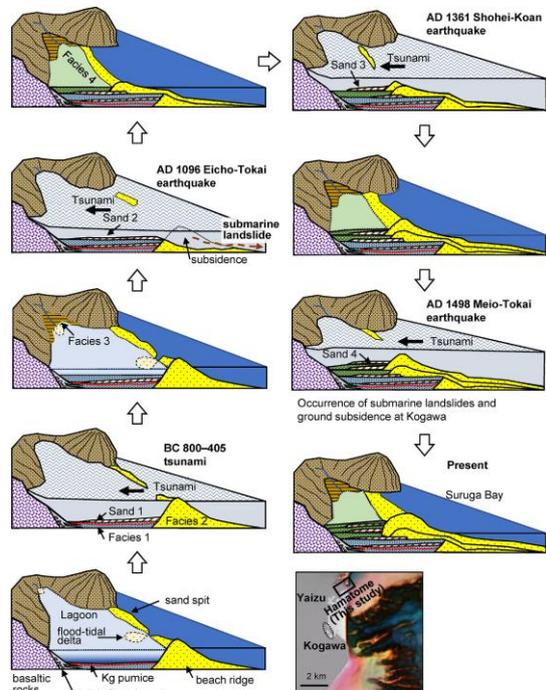


図 10 瀬戸川左岸（焼津市浜当目）における地震・津波と想定される地形発達過程 (Kitamura et al., 2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sugawara Daisuke	4. 巻 214
2. 論文標題 Numerical modeling of tsunami: advances and future challenges after the 2011 Tohoku earthquake and tsunami	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth-Science Reviews	6. 最初と最後の頁 103498
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.earscirev.2020.103498	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 Kitamura Akihisa, Yamada Kazuyoshi, Sugawara Daisuke, Yokoyama Yusuke, Miyairi Yosuke, Hirakawa Miki, Iwatsuki Daichi, Katagiri Satoru, Maeda Masaya, Mori Hideki, Nakai Yuki, Okazaki Sota, Sakamoto Yui, Sasada Masaki, Seki Yusuke, Takikawa Youki, Yamamoto Yuka, Yoda Yuki	4. 巻 245
2. 論文標題 Tsunamis and submarine landslides in Suruga Bay, central Japan, caused by Nankai-Suruga Trough megathrust earthquakes during the last 5000 years	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 106527
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.quascirev.2020.106527	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 Kitamura, A., Ina, T., Suzuki, D., Tsutahara, K., Sugawara, D., Yamada, K., Aoshima, A.	4. 巻 6
2. 論文標題 Geologic evidence for coseismic uplift at AD 400 in coastal lowland deposits on the Shimizu Plain, central Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-019-0305-y	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 菅原 大助	4. 巻 58
2. 論文標題 津波土砂移動数値解析の不確実性と地形復元について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第四紀研究	6. 最初と最後の頁 187-194
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 -

1. 著者名 山下 啓, 菅原 大助, 有川 太郎, 嶋原 良典, 高橋 智幸, 今村 文彦	4. 巻 74
2. 論文標題 強い非定常流れにおける飽和浮遊砂濃度を考慮した津波土砂移動モデルの改善	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_325-I_330
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 -

1. 著者名 Hiraku Takeda, Kazuhisa Goto, James Goff, Hideaki Matsumoto, Daisuke Sugawara	4. 巻 43
2. 論文標題 Could tsunami risk be under-estimated using core-based reconstructions? Lessons from Ground Penetrating Radar: GPR - a key first step for palaeotsunami research	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth Surface Processes and Landforms	6. 最初と最後の頁 808-816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/esp.4282	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 Catherine Chague;, Daisuke Sugawara, Kazuhisa Goto, James Goff, Walter Dudley, Patricia Gadd	4. 巻 364
2. 論文標題 Geological evidence and sediment transport modelling for the 1946 and 1960 tsunamis in Shinmachi, Hilo, Hawaii	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Sedimentary Geology	6. 最初と最後の頁 319-333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sedgeo.2017.09.010	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 菅原 大助	4. 巻 123
2. 論文標題 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の堆積作用と堆積物	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 781-804
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 菅原 大助・西村 裕一・高清水 康博・圓谷 昂史・千葉 崇
2. 発表標題 千島海溝沿いの津波と国後島太平洋沿岸のイベント砂層に関する検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原 大助
2. 発表標題 伊豆半島南部入間の地形と津波の関係についての考察
3. 学会等名 国際火山噴火史情報研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sugawara, D., Yamada, K.
2. 発表標題 Changing landscape of Miho-no-Matsubara: geological and environmental viewpoints
3. 学会等名 Cultivating the Fujinology: Mt. Fuji and Nature/Culture in Anthropocene (国際学会)
4. 発表年 2018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	北村 晃寿 (Kitamura Akihisa) (20260581)	静岡大学・理学部・教授 (13801)	

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			
メキシコ	Universidad Nacional Autonoma de Mexico			
オーストラリア	University of New South Wales			