

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H00765

研究課題名(和文) 完新世の地形発達から明らかにする南海トラフ地震の多様性

研究課題名(英文) Diversity of Nankai Trough earthquakes revealed by Holocene geomorphic development

研究代表者

松多 信尚 (MATTA, NOBUHISA)

岡山大学・教育学域・教授

研究者番号：40578697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、堆積地形に着目することで、南海トラフ地震の多様性を明らかにし、数千年に一度程度の頻度で発生する低頻度超巨大地震を検討することが目的であった。そのために、菊川低地の発達史を再検討し、隆起速度を算出し、浜堤列の形成史を明らかにすることを試みた。その手法として、稠密重力探査、浅層反射法地震探査、GPR探査などの物理探査を駆使して地下を推定することを試みた。その結果、菊川低地の地下は浅部に埋没段丘面と思われる地形とそれを開析する氷期の谷が埋積されて形成されたことが明らかとなり、その古地形をもとに縄文海進以降の地形が形成されたこと、隆起速度は1-1.6mm/yr程度であることなどが推定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフ地震はフィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界で100-150年の間隔で発生しているとされるが、その多様性については十分に分かっていなかった。本研究は最新の地下構造を調査する手法などを用いることで、菊川低地の隆起速度が見積もられ、過去3回の南海トラフ地震より大きな規模の南海トラフ地震が存在する可能性があることが示された。これは、東日本大震災同様に想定を超える自然現象が発生する可能性を示している。ただし、断定するには追加調査が必要である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to explicitly show the diversity of Nankai Trough earthquakes and the existence of low-frequency super earthquakes by focusing on beach ridges and sand dunes. Specifically, we reexamined the developmental history of the Kikukawa Lowland, estimated uplift rates, and attempted to clarify formation process of the beach ridge sequence. As a method, we attempted to estimate the basement and Holocene marine sediments depth by making full use of geophysical surveys such as tight-lattice gravity survey, shallow reflection seismic survey, microtremor survey, and GPR survey. These surveys revealed that buried terraces and incised-valleys that cut the terraces were found under the Kikugawa Lowland, and the landform evolution since the middle Holocene has been influenced by the paleo-topography. The uplift rate was estimated to be approximately 1-1.6 mm/yr.

研究分野：自然地理学 変動地形学

キーワード：南海トラフ地震 菊川低地 遠州灘沿岸 稠密重力探査 S波浅層反射法地震探査 浜堤 地形発達

## 1 . 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震でプレート境界型地震の多様性について指摘されたことで、近い将来発生が指摘されている南海トラフ地震においても、その多様性が学術的にも社会的要請でも解決すべき課題となっていた。南海トラフで歴史時代に発生した巨大地震は、主に歴史資料や古地震学的データに基づき南海トラフを5つのセグメントに区分し(Ando, 1975)、単独ないしは複数セグメントが連動した結果であると理解されてきた(Ishibashi, 2004)。2011年東北日本太平洋沖地震以降に重視された南海トラフにおけるM9クラスの地震の可能性については、基本的にはこの考え方を踏襲している。また、個々の地点における地震性地殻変動についても、海成段丘等の長期間変形と昭和南海地震前後の地殻変動の比較検討(吉川, 1968)で提示された、いわゆる固有地震モデルが主流であった。

しかし、単独・複数セグメントの破壊によって巨大地震が発生するという古典的な考え方は必ずしも成立しないことが、チリ(Delouis et al., 1997)やネパール(Mencin et al., 2016)など近年発生した世界各地のプレート収束境界における巨大地震の解析から分かってきた。南海トラフで過去に起きた巨大地震についても、より複雑で多様であったことを示唆するデータが近年増えてきた。1944年東南海地震時にはほとんど隆起しなかった掛川市大須賀付近では、1707年宝永地震時に大きく隆起し、さらに過去に同様な隆起があったことが試錐調査からわかった(廣内ほか, 2014)。地震史料の再検討からも、1707年宝永地震の際には南海トラフより南の銭洲海嶺前縁が破壊した可能性が指摘されている(松浦ほか, 2011)。また、静岡県御前崎では1854年安政東南海地震で約1m隆起した(石橋, 1984)が、検潮記録・水準点改測結果によれば地震後の地殻変動は沈降を示し、地震時の隆起は地震間の沈降によってほとんどが解消されたらしい。一方、紀伊半島～遠州灘沿岸では数段の完新世海成段丘や隆起生物遺骸群集などの、長期間の残留隆起が認められる(穴倉ほか, 2008など)。

このように、巨大地震ごとの地殻変動の違いや残留隆起を示す完新世段丘の存在は、南海トラフ東部の過去の巨大地震が昭和・安政東南海地震と同様な地震の単純な繰り返しではなく、地震ごとに異なる破壊領域やすべり量を伴う巨大地震を含むことを示唆する(図1)。南海トラフの巨大地震の多様性はこれまでも指摘されてきたが、具体的な震源断層の特定は行われていない。実際に、東南海～東海では、沈み込み帯のメガスラスト以外に、分岐断層、銭洲海嶺前縁断層帯や前弧海盆を横断する断層帯など、M7～8級の地震を起こしうる震源断層が多数分布する(図1)。南海トラフで発生する巨大地震の切迫性が主張される現在、多様な巨大地震を示唆する地形・地質学的な証拠の全容を明らかにし、これと震源断層データを結びつけることにより、南海トラフ地震のリアリスティックな巨大地震発生像の多様性を解明することが喫緊の課題となっていた。

## 2 . 研究の目的

地震による地殻変動を論じようとする場合、従来は岩石海岸の離水ベンチなどの隆起した完新世海成段丘や隆起生物遺骸群集、生物遺骸による古環境変化が用いられてきた。しかし、岩石海岸は地形変化の速度が遅く100年程度で起きる緩慢な変化を記録することはできない。隆起生物遺骸群集も、急激な隆起で離水したあとの変動は記録していない。生物遺骸による古環境変化はボーリングなどの点データに頼る部分が大きく面的に生じた現象について十分な議論ができていない。そこで本研究では、上記の従来の研究手法も取り入れつつ、地形変化の速度が速い堆積地形とそれに伴う環境変化に着目することで、地震時の地殻変動だけでなく地震間の緩慢な変化についても考え、南海トラフ地震の多様性を論じる。

これらを議論する上で、重要なのは、低地の地形発達と隆起沈降運動の関係である。これを現在のさまざまな技術を用いて明らかにし、その初期値と地質学的事象とで現在の地形が形成されるプロセスを明らかにすることを目指している。

## 3 . 研究の方法

研究方法は三班に分かれて行った(研究当初は4班だった)。第一班は、空中写真・高精度DEMの解析と地形・地質調査を行い、浜堤の形成を明らかにするために直接浜堤を掘削し、得られる地質試料の堆積相・古環境解析およびOSLや炭素同位体比を用いた年代測定を行い、浜堤の形成年代や形成過程を考察する。第二班は、埋没地形を稠密重力探査、S波反射法地震探査、GPR探査、微動探査など様々な物理探査から明らかにし、最終氷期以降の地形発達史を編む。それを踏まえて、隆起速度と地震性地殻変動について考察する。第三班は歴史資料などから南海トラフ地震の多様性について再検討する。

## 4 . 研究成果

地形地質調査：新たな知見は、従来上部鮮新統の小笠山礫岩層の分布域である上土方旦付新田西方の標高約 130m の痩せ尾根を切る連続露頭において、傾斜する礫岩層を不整合に覆う段丘礫層が確認できたほか、小笠山礫岩層を覆うと思われる堆積物を複数の場所で確認し、小笠山礫岩層の中に更新統の段丘礫層が分布することが明らかになった。追加調査で OSL による年代測定を実施する予定である。また、菊川低地の積水ハウス静岡工場付近の沖積平野内の菊川右岸の露頭および河床で河川性と判断できる砂礫層が確認できる。本層は周辺に分布する土方層や佐束層と層相や固結度が異なることから更新統と思われる。その上部は完新世と思われる泥層に覆われており、標高は約 5 m である(図 1)。(担当者：松多・堀)

ボーリング調査(図 1, 2)：菊川低地の内側の浜堤・砂丘上に位置する掛川市千浜で KIC コア(標高 17.62 m, 掘削長 21 m), 同市三股(大浜付近)で KIM コア(標高 7.87 m, 掘削長 23.3 m)を、機械ボーリングによって採取した。これらのコア堆積物について、写真撮影, 軟 X 線写真撮影, 色調, かさ密度, 砂泥比の測定をおこなった。また, DirectAMS および名古屋大学宇宙地球環境研究所において, AMS を用いた放射性炭素年代測定を実施した。なお, KIC コアについては, 産総研で長石の

OSL (IRSL および post-IR IRSL) 年代を測定した KIC コアは最下部約 2 m にみられた泥層を除き, 中粒砂を主体とする砂層で構成されていた。深度 0-8 m 付近の砂層は他の層準に比べて淘汰がよい傾向にあった。また, 深度 15.6-19 m 付近の砂層には礫が含まれており, 深度 16.5 m 付近では礫が 35%程度を占めていた。最下部の泥層は貝殻片を含み, 珪藻について概査をしたところ干潟に特徴的な種が多くみられた。KIM コアは, 深度 0-7 m が砂層で構成され, その下位にある深度 7-16 m は礫を含む砂層を主体と

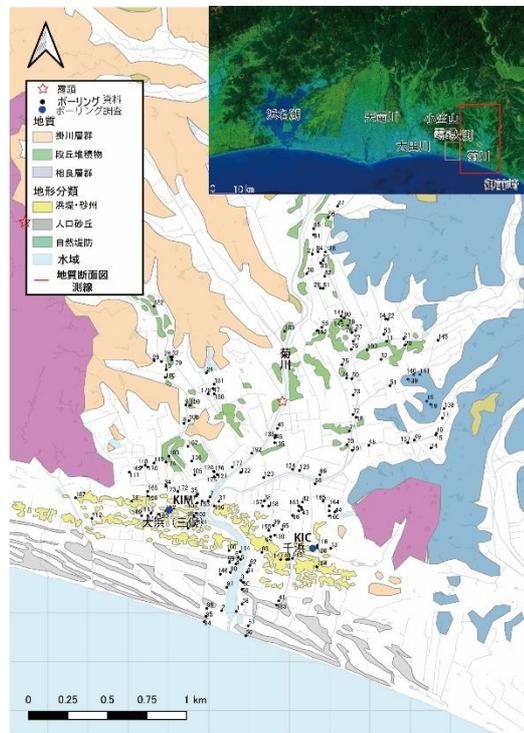


図 1 調査地域, 菊川低地

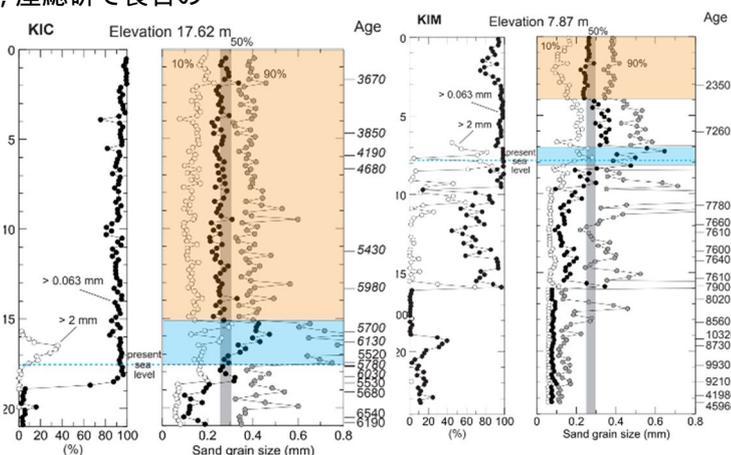


図 2 ボーリング試料の粒度分布

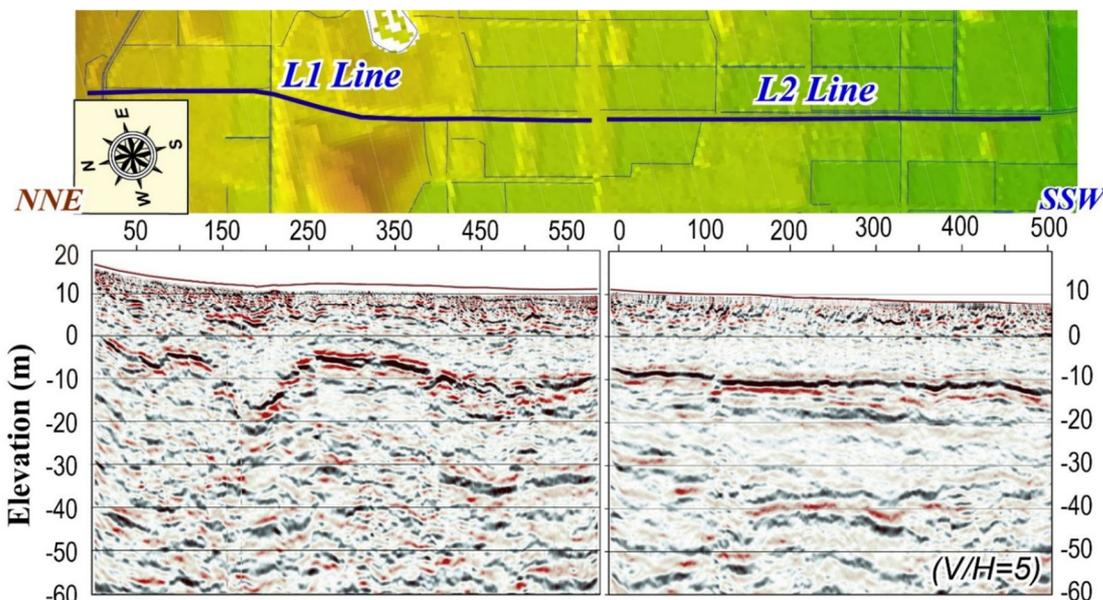


図 3 大淵付近の S 波反射法地震探査測線と深度断面

するが、深度 7-8.4, 9-9.3, 10-10.6, 15.6-16 m はおもに礫からなっていた。深度 16-22 m は貝殻片や有機物を含む泥層からなっており、深度 22 m で更新統と考えられる泥層に達した。年代測定結果から、KIC コアでは約 6 ka 頃に泥層を覆う砂層の堆積が始まったと考えられる。標高 0 m 付近の OSL 年代値は放射性炭素年代値とも整合的であり、6 - 3.7 ka にかけて砂が平均 7 m/kyr で堆積したことを示唆する。(担当者：堀・廣内・松多，協力者：稲崎・中西ほか)

S 波浅層反射法地震探査(図3): 静岡県掛川市遠州灘に面する海岸平野の表層構造を明らかにするために、高分解能 S 波反射法地震探査を実施した。また、深度 30m までの S 波速度構造を明らかにするため、S 波坑道掘削調査を行った。ランドストリーマーを使用し、50cm 間隔で 96 チャンネルの水平ジオフォンアレイを配置した。坑内 S 波測定には、スリムホール型ボアホールプローブを採用した。両調査とも、偏波 SH 波インパルス信号の発生には、木製の板を水平に打撃する方法を採用した。最後に、坑内 S 波測定データから復元された表面近傍の S 波速度構造に基づいて、調査ラインに沿った深度方向の移動断面を作成した。その結果、深度 20m 付近で明確な事象が確認された。この反射面は沿岸部では平坦な構造を示し、丘陵部に向かって徐々に上昇する。また、丘陵の麓に小さな埋没谷を形成していた。埋没谷付近で掘削した 2 本のチェックボーリングの岩相と S 波速度分布は、地震探査の深度区分と一致した。(担当者：松多・中埜・石山，協力者：稲崎・岡田・楳原ほか)

稠密重力探査(図4): 牧野・遠藤(1999)による F-H 相関法を用い、残差重力図を作成し、既存の 6 本のボーリング資料を用い、残差重力値と基盤深度の関係を導出し、古地形を復元した。菊川低地では 250 点を観測した。その結果、2 本の深度 -45 m 程度の埋没谷とその間に広がる深度 -5 m 程度の埋没段丘面が広がっている。埋没谷はその下刻量より、西側の埋没谷は菊川支流によって形成された谷で、東側の埋没谷は菊川によって形成された谷だと考えられる。谷の深度は一般的な沖積平野の基底としては浅いことがわかった。大淵付近では、35 点で観測し、S 波浅層反射地震探査で得られた地下構造の裏付けられ、ボーリング調査地点は埋没谷の南側斜面に位置していると推定した(担当者：松多，協力者：住田ほか)

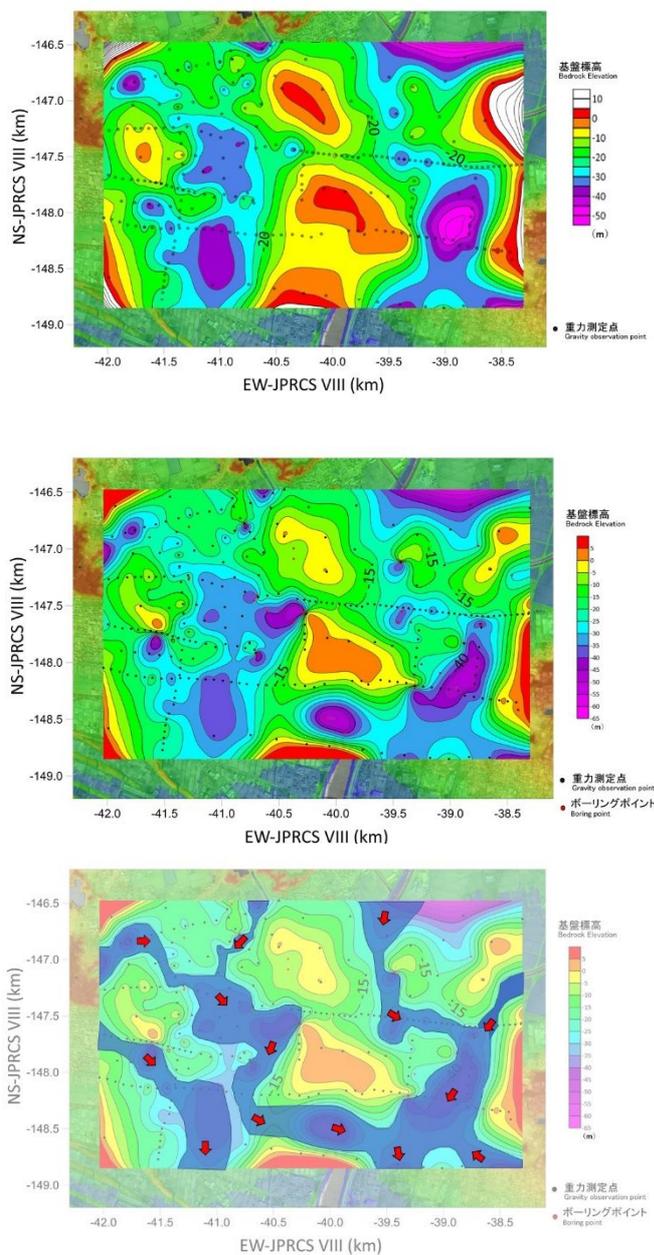


図4 菊川低地の沖積層基底深度推定図(上段：重力探査のみ、中段：重力探査結果および掘削資料、下段：解釈図)

微動アレイ調査(図5): 観測機器には、白山工業製のJU410(加速度計)を使用し、200Hz サンプリングで1地点 30 分程度の観測を行った。微動アレイのサイズは、S アレイを半径 0.6m, M アレイを三角形の1辺の長さを 5m とした。分散曲線の算出方法は CCA 法(Toda et

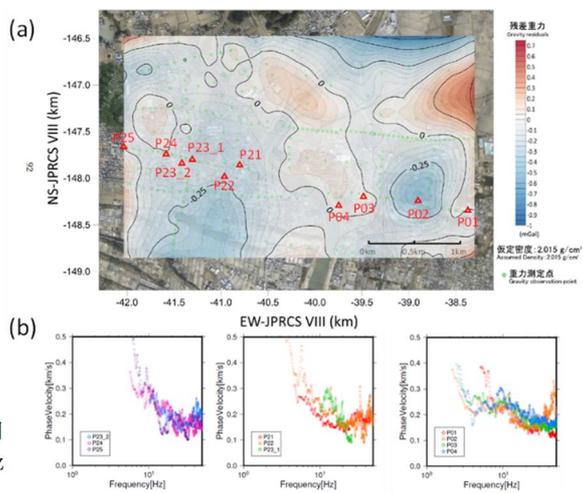


図5 (a)微動アレイ調査地点(b)微動アレイ探査から推定された分散曲線

al., 2010) とし, 分散曲線解析ツール「BIDO」(Web サイト) を使用した。(担当者: 松多, 協力者: 倉橋・住田ほか)

GPR 探査: 太田川低地と菊川低地(大浜地点), およびその間の海岸平野(大洲地点)で浜堤を横切る GPR 探査を実施した。GPR 探査には Sensors & Software 社製 Noggin Plus を用い, アンテナ中心周波数は 250MHz とした。データ解析には同社製 EKKO\_Project5 を用いた。解析では基本的な処理(ノイズ低減処理, 移動平均処理, ゲイン回復処理, マイグレーション処理, 地形補正等)を行った。電磁波の伝搬速度は hyperbola fitting 法により推定し, 往復走時を絶対深

度に変換した。太田川低地で良好な結果が得られなかった。大浜地点では南北に 4 測線, 東西で 1 測線実施し, 地下数メートルの浅部では浜堤頂部および南斜面で水平な反射面が認められ KIC コアと対比することで細砂層に狭在するシルト層と解釈できる。大洲地点では S 波浅層反射法探査と同一な測線と西側の並走した測線で調査し, 反射法探査で認められた谷の延長と思われる浅部の谷が認められた。(担当者: 中埜)

歴史資料調査(図 6): 太田川から菊川にかけてのエリアでは新たな資料は認められなかったが, 過去 3 回の南海トラフ地震での地殻変動に違いがあることが指摘されていた。安政東海地震で駿河湾から富士川河口にかけての区間で地表地震断層が出現したことを, 蒲原地区の用水が地震後に使用できなくなり, 新たに掘削したとする資料から推定し, 過去の絵図や水害などの記録や運河の建設史などを統合的に説明できることを示した。(担当者: 石山・廣内・松多) 考察

菊川低地付近の隆起速度: ボーリング資料から場所によっては沖積層が薄いことが認められるが, 重力探査を実施したことで埋没段丘が比較的浅い場所に分布することが認められた。KIM コアの年代測定結果や最終間氷期以降の海水準変動曲線から, この平坦面は 4-4.5 万年前ごろにやや海水準が安定した時期に形成されたと考えることができる。この時の海水準は現在より 6-70m 低いことから, この地域が 1.2-1.6 m/kyr で隆起したことになる。また小笠山丘陵で見られる段丘礫層の年代は不明であるが, MIS5a, 5c, 5e のいずれかだと考えれば, 高度から隆起速度は 1.0-1.6 m/kyr となり, 両者の値は調和的である。

菊川低地の発達史: 菊川低地は MIS2 時に形成された谷が溺れ谷になりながら沈水し, 特に東側ではエスチュアリーが形成されてた。その後の海水準の上昇に伴い, 海成段丘地域にも海進が進み現在の菊川低地全域が水没した。海水準上昇の鈍化に伴い小笠丘陵の東側に砂州が形成され, 海水準の上昇に伴い, 北側に移行した可能性が高い。このバリアの移動は KIC 付近で固定され, その後, 地殻変動の影響を受けながら南側に浜堤列を形成したと考えた。

南海トラフ地震の多様性: 菊川低地の離水年代は鹿島(1985)と坂本(2016)で大きく異なる。しかし鹿島(1985)は低地縁辺部, 坂本(2016)は低地中心部であることから, 中心部は地震時の隆起し, 離水しても地震間の沈降で再び水没することを繰り返すのに対し, 縁辺部は地震時の隆起で離水し, 地震間に緩慢な沈降をするが, 陸からの堆積物がそれを覆うことで再び水没しなかったと解釈することで, ほぼ同じ標高でありながら離水年代が異なると解釈できる。同様な解釈をすると, この地域の平均隆起速度が 1.6 m/kyr の場合地震時に約 3 m, 1.4 m/kyr の場合地震時に約 1.5 m の隆起があったことが予想され, 歴史的に知られていない規模の隆起を伴う南海トラフ地震の存在が示唆された。

今後段丘の年代, 大洲の物理探査の浅層部分の解析, 微動アレー探査の改善が期待される。

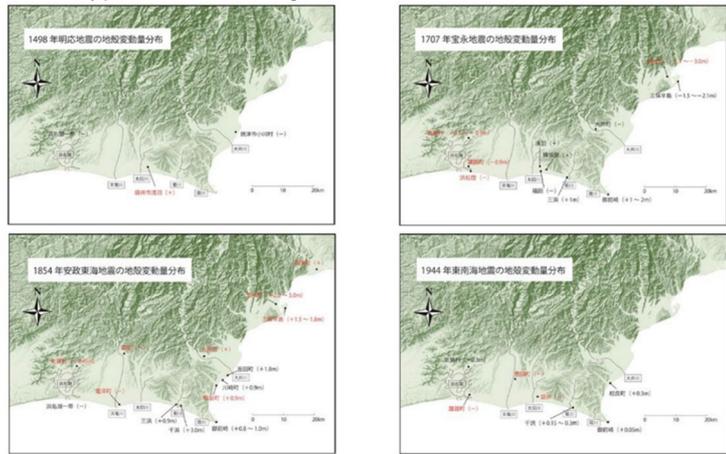


図 6 遠州灘沿岸の過去の地震時地殻変動量

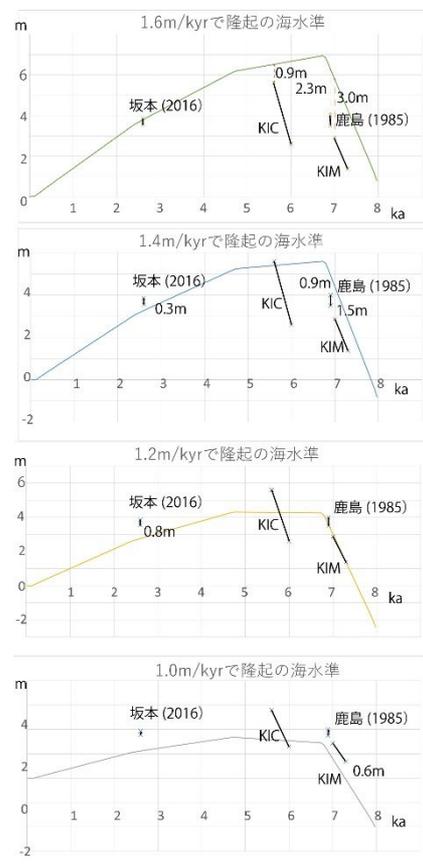


図 7 地震時の地殻変動量の推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hasada, K., Hori, K.	4. 巻 425
2. 論文標題 Quantitative analysis of land transformation in a Holocene delta: An example from the Tama River lowland, central Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Geology	6. 最初と最後の頁 106193
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.margeo.2020.106193	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中埜貴元・松多信尚・西山弘祥
2. 発表標題 GPR探査による遠州灘沿岸低地の極浅部地下構造推定 浜堤地形発達過程の解明に向けて
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀 和明・石井祐次・田村 亨・佐藤善輝・稲崎富士・中西利典・北川浩之・廣内大助・三笥加葉・松多信尚
2. 発表標題 コア堆積物の解析にもとづく菊川低地の形成過程
3. 学会等名 2022年度日本地理学会春季学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲崎 富士, 松多 信尚, 楢原 京子, 岡田 真介, 中西 利典, 堀 和明, 中埜 貴元
2. 発表標題 S波ランドストリーマー反射法探査およびS波速度検層による海岸平野下の浅部地下構造イメージング
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中埜 貴元・松多 信尚・堀 和明・廣内 大助・杉戸 信彦・佐藤 善輝・石山 達也
2. 発表標題 遠州灘沿岸低地に形成された浜堤の内部構造把握に向けたGPR探査
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hori K., Ohata, K., Ishii, Y.
2. 発表標題 Grain size and OSL dating of river bank dune deposits: an example from the Kiso River, central Japan
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早田圭佑・松多信尚・廣内大助
2. 発表標題 静岡県菊川低地にみられる浜堤の形成過程と地殻変動との関連性
3. 学会等名 日本地理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西利典・松多信尚・堀 和明・稲崎富士・北村晃寿・北川浩之
2. 発表標題 菊川周辺における放射性炭素の海洋リザーバー効果の予察結果
3. 学会等名 名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム
4. 発表年 2022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	廣内 大助  (Hirouchi Daisuke)  (50424916)	信州大学・学術研究院教育学系・教授   (13601)	
研究分担者	杉戸 信彦  (Sugito Nobuhiko)  (50437076)	法政大学・人間環境学部・准教授   (32675)	
研究分担者	中埜 貴元  (Nakano Takayuki)  (60511962)	国土地理院(地理地殻活動研究センター)・その他部局等・研究官   (82116)	
研究分担者	堀 和明  (Hori Kazuaki)  (70373074)	東北大学・理学研究科・教授   (11301)	
研究分担者	石山 達也  (Ishiyama Tatsuya)  (90356452)	東京大学・地震研究所・准教授   (12601)	

	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
研究協力者	稲崎 富士  (INAZAKI Tomio)		

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
研究協力者	住田 達哉  (Sumita Tatsuya)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員  (82626)	
研究協力者	佐藤 善輝  (Sato Yoshiki)	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・研究員  (82626)	
連携研究者	岡田 真介  (OKADA Shinsuke)	岩手大学・理工学部・准教授  (11201)	
連携研究者	楮原 京子  (Kagohara Kyoko)	山口大学・教育学部・准教授  (15501)	
連携研究者	中西 利典  (Nakanishi Toshimichi)	ふじのくに地球環境史ミュージアム・学芸課・准教授  (83811)	
連携研究者	倉橋 奨  (Kurahashi Susumu)	愛知工業大学・工学部・准教授  (33903)	

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