

2.3 3Dモデル・履歴情報を用いた推移予測

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 「3Dモデル・履歴情報を用いた推移予測」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター	センター長 主任研究員 技術スタッフ 事務主事 ポストドクトラル 研究員	堀 高峰 今井 健太郎 大林 涼子 村上 雅亮 楠本 聡
国立大学法人東京大学地震研究所 計算地球科学研究センター	教授 准教授	市村 強 藤田 航平
国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門	主任研究員	齊藤 竜彦
国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震発生帯研究センター	専門部長 主任研究員	金松 敏也 高橋 努
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 連携推進室国内連携グループ	グループ長	宍倉 正展
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 海洋地質研究グループ	招聘研究員 (首席研究員) 上級主任研究員 主任研究員	池原 研 片山 肇 杉崎 彩子
国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ	研究グループ長 主任研究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 研究員 研究部門長	澤井 祐紀 行谷 佑一 松本 弾 谷川 晃一朗 伊尾木 圭衣 嶋田 侑真 藤原 治
法政大学 文学部	教授	前杢 英明
国立大学法人東京大学大学院理学系研究科	准教授	安藤 亮輔

(c) 業務の目的

過去の地震履歴についての知見を拡充するとともに、地殻変動データと整合する3D粘弾性構造モデルを構築し、過去の地震履歴や固着・すべりの現状把握の結果が与えられたもとの、現在の応力蓄積状態を推定するとともに、擾乱（半割れ等）が与えられた際の推移を予測する手法を開発する。そのために、断層すべりによる地殻変動計算と断層面での応力評価を、3D不均質粘弾性構造を考慮して行うための大規模有限要素モデルを、南海トラフを対象として構築するとともに、前回の南海トラフ地震以降の地殻変動データと整合する物性パラメータを推定した上で、グリーン関数を計算する。また、断層構成則と組み合わせることで、与えられた固着・すべりの後の推移の計算を実現する。履歴については、海域及び陸域の地層の中から過去の地震・津波の痕跡を検出する

とともに歴史地震について史料調査を実施する。陸域では掘削調査等から津波浸水や地殻変動の履歴を、海域では海底堆積物調査から地震・津波の発生履歴を解明し、その年代や拡がりから南海トラフ沿いにおける津波の履歴を解明する。また、史料解析に基づいて歴史地震における諸現象をより正確に復元する。

(d) 5か年の年次実施計画

1) 令和2年度：

推移予測では3D不均質粘弾性構造を考慮した地殻変動計算と断層面での応力評価を行うための大規模有限要素モデル構築の基礎検討を行った。陸域では駿河湾奥から九州東部沿岸において掘削調査を行い地震・津波履歴を推定した。海域では御前崎沖海域において調査航海を実施し、地震・津波履歴の調査を実施した。史料調査では明応東海地震から昭和東南海・南海地震において現地調査に基づいた史料収集及びその精査を行った。

2) 令和3年度：

推移予測では、応力蓄積過程の計算に必要となる前回の南海トラフ地震からの地殻変動データの整備を引き続き行うとともに、南海トラフを対象として、3D不均質粘弾性構造の曖昧さを考慮した地殻変動計算と断層面での応力評価を行うための大規模有限要素モデルを構築した。陸域では紀伊～四国沿岸陸域における掘削調査と試料採取及び既存の掘削試料の解析を行った。海域では日向灘～南九州沖の海底堆積物試料の分析から日向灘～南九州における地震・津波履歴を推定した。史料調査ではこれまで得られた史料調査の結果を基に昭和東南海・南海地震の津波波源モデルの再評価を行った。

3) 令和4年度：

推移予測では、令和2・3年度で得られた成果を基に3D不均質粘弾性構造を考慮したグリーン関数を求めた。陸域では紀伊～四国沿岸陸域において掘削調査等から地震・津波の発生履歴を得た。海域では東海～四国沖における海底堆積物試料の分析から地震・津波の発生履歴を得た。史料調査ではこれまで得られた史料調査の結果を基に宝永地震及び安政南海地震の津波波源モデルの再評価を行った。

4) 令和5年度：

推移予測では、南海トラフを対象として、本プロジェクトで構築した3D粘弾性不均質構造の大規模有限要素モデルにおいて粘弾性応答までを含んだ地殻変動のグリーン関数を計算した。履歴については、陸域では東海～九州沿岸での掘削調査等から津波浸水や地殻変動の履歴、海域では東海～九州沖海域の試料の分析等から地震・津波の発生履歴について検討を行った。史料調査では、1498年明応東海地震から1946年昭和東南海地震までの津波痕跡高・地殻変動の史料収集とその精査を引き続き実施するとともに、史料や津波堆積物などに基づいた波源断層モデルの検討、昭和東南海地震および南海地震、1854年安政東海および南海地震の波源モデルの比較から、津波生成域の違いについて検討を行った。さらに、過去の履歴等を考慮した地震シナリオの検討を行った。

5) 令和6年度：

推移予測では、履歴研究と1(b)の成果にもとづいて更新したプレート間の固着及びすべり状態を与えるとともに、半割れ後の推移予測の試行計算結果をまとめる。陸域では東海～九州沿岸陸域ですでに得られた試料の解析と結果の取りまとめを実施し、海域ではこれまで採取した海底堆積物の分析及び評価を実施する。さらに陸域と海域の成果をまとめて地質試料による統合地震履歴情報を得る。史料調査では令和5年度までに得られた史料調査の結果を基に明応東海地震の津波波源モデルの検討を行う。

(e) 令和5年度業務目的

推移予測では、南海トラフを対象として、本プロジェクトで構築した3D粘弾性不均質構造の大規模有限要素モデルにおいて粘弾性応答までを含んだ地殻変動のグリーン関数を計算する。履歴については、陸域では東海～九州沿岸での掘削調査等から津波浸水や地殻変動の履歴、海域では東海～九州沖海域の試料の分析等から地震・津波の発生履歴について検討を行う。史料調査では、1498年明応東海地震から1946年昭和東南海地震までの津波痕跡高・地殻変動の史料収集とその精査を引き続き実施するとともに、史料や津波堆積物などに基づいた波源断層モデルの検討、昭和東南海地震および南海地震、1854年安政東海および南海地震の波源モデルの比較から、津波生成域の違いについて検討を行う。さらに、過去の履歴等を考慮した地震シナリオの検討を行う。

(2) 令和5年度の成果

① 3D不均質粘弾性構造モデルを考慮した推移予測手法の開発

(a) 業務の要約

南海トラフを対象として、前年度までに構築した3D粘弾性不均質構造の大規模有限要素モデルを用いて長期間の粘弾性応答が計算できるように高速化を実施するとともに、粘弾性応答を含んだ地殻変動のグリーン関数を計算した。また、履歴研究にもとづく過去の履歴等を考慮した地震シナリオの検討を行った。

(b) 業務の成果

前年度までに構築した粘弾性モデル¹⁾について、数百年オーダーの長期間にわたる粘弾性応答のグリーン関数を計算するため、有限要素法を用いた粘弾性応答計算の高速化を進め、粘弾性応答に関するグリーン関数を計算した。以下では、高速化と妥当性確認の説明とともに、プレート境界面上での単位すべりに対する350年間のグリーン関数応答計算を行った結果を報告する。

粘弾性応答の計算に用いるモデルの外観や断面図を図2-3-①-1、与えた物性を表2-3-①-1に示す。ここで、図では層を単純化して描いているが、表に示したように各層には複数の異なる物性の層が含まれている場合があり、これらは全国一次地下構造モデルの層に対応している(表2-3-①-1のID)。これは前年度に構築した3次元不均質粘弾性モデルであり、そのうち沈み込むプレートを弾性とした場合を扱う。

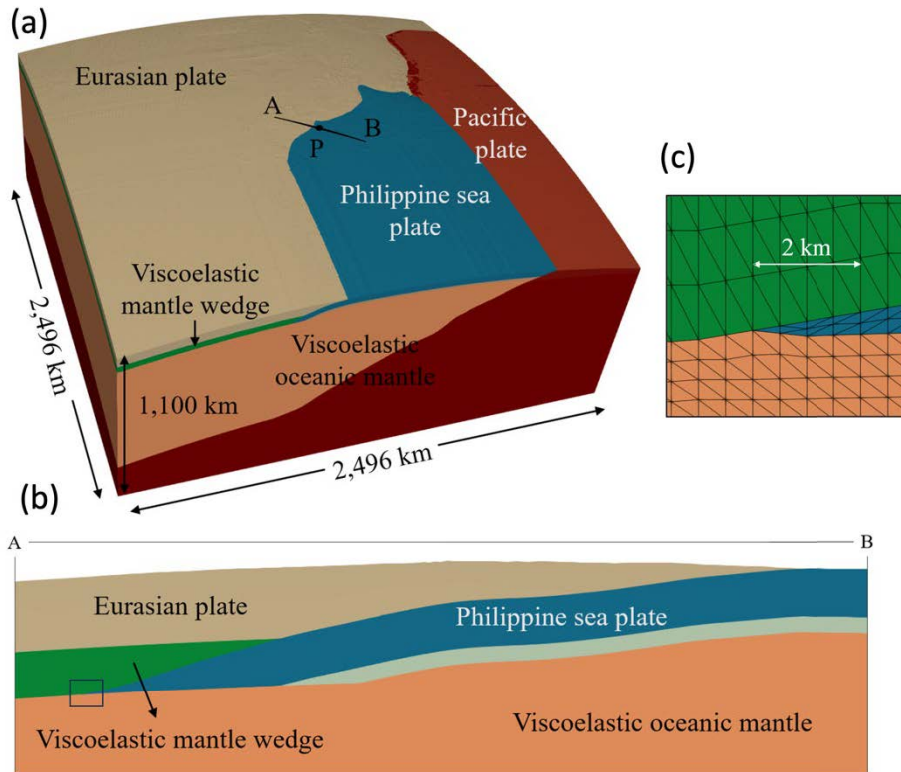


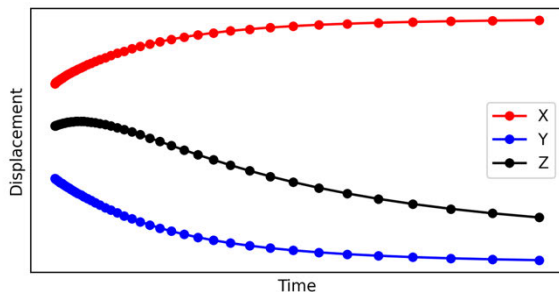
図 2-3-①-1 (a)有限要素モデルの全体図。A-B は (b)の断面図の位置。(b) (a)の A-B の位置の断面図。Eurasian plate と Philippine sea plate は弾性、mantle wedge と oceanic mantle は粘弾性。左の四角は (c)の拡大図の位置。(c) (b)で示した位置での離散化メッシュの拡大図。

表 2-3-①-1 各層での物性値。ID は各層の中に含まれる物性一定の層の番号であり、全国一次地下構造モデルの層番号に相当している。

Layer name	ID	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	η (Pa·s)
Eurasian plate	1-16	2100 – 6400	700 – 3800	2050 – 2800	—
Mantle wedge (elastic)	17	7500	4500	3200	—
Mantle wedge (viscoelastic)	17	7500	4500	3200	2×10^{18}
Philippine sea plate	18-19	5000 – 6800	2900 – 4000	2400 – 2900	—
Oceanic mantle (elastic)	20	8000	4700	3200	—
Oceanic mantle (viscoelastic)	20	8000	4700	3200	10×10^{18}
Pacific plate (PAC)	21-22	5400 – 6500	2800 – 3500	2600 – 2800	—
Oceanic mantle (PAC)	23	8100	4600	3400	—

粘弾性応答の計算には、大規模有限要素法を用いるが、最新の研究^{1、2)}では、データ駆動予測 (DDP) と組み合わせた反復ソルバーが開発され、従来の効率的なソルバーと比較して約3倍のスピードアップがもたらされた。しかし、長期間の応答に関する数値シミュレーションは依然として膨大な計算が必要である。そこで、近年性能改善が進むGPU計算機を活用できるよう手法を開発する³⁾とともに、適応的時間ステップ法(ATS)により、

シミュレーションを効率的に実行することで高速化を実現した。図 2-3-①-2 に、ATS を適用したことによる時間ステップの変化の様子の模式図と時間ステップの変化を与えるための式を示す。



$$dt = dt_0 e^{cxi}, \quad c = \frac{dt_f - dt_0}{t_{total}}$$

図 2-3-①-2 時間ステップ dt の変化の様子の模式図。右の式は dt の変化のさせ方を示す。ここで、 i は i 番目の時間ステップ、 c は初期時間ステップ dt_0 とシミュレーション終了時の最終時間ステップ dt_f 、最終時間 t_{total} で定義される成長率である。

計算性能を測定するために、100 年間の粘弾性応答シミュレーションを行った。従来手法や DDP による高速化をした固定時間ステップを用いたシミュレーションでは 4,800 ステップを要したのに対し、ATS を用いたシミュレーションでは $dt_f=32dt_0$ で、全体として 537 ステップの計算に減らすことができた。これによって従来手法と比較して約 19 倍、最新の研究と比較しても約 6 倍の高速化を達成した (表 2-3-①-2)。

表 2-3-①-2 100 年間の粘弾性応答計算の性能評価。

求解手法	総計算時間[分]	高速化率
従来手法	1140.5	1.000
従来手法+ DDP	371.08	3.07 (1.00)
従来手法+DDP+ATS	61.60	18.51 (6.02)

また、長時間の粘弾性応答計算をした場合の ATS の誤差を評価するため、1 回の大地震による 350 年間の粘弾性応答シミュレーションを、 dt 固定の場合と $dt_f=32dt_0$ での ATS 適用の場合とで比較した。図 2-3-①-3 に示したように、最大変位に対する誤差は 1 mm 未満であり、相対的誤差としても 0.005% 未満である。ここで観測誤差が陸上・海域ともに年間数 mm 程度であることから、誤差の最大値は十分小さいといえる。

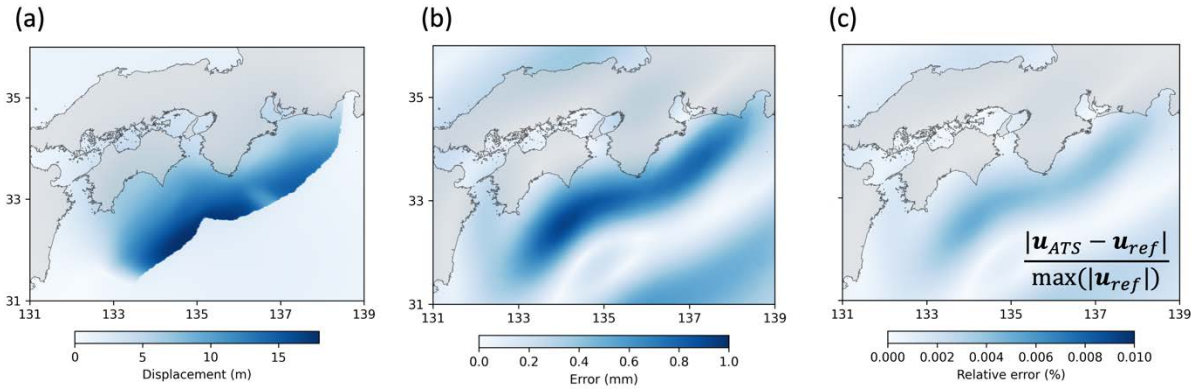


図 2-3-①-3 (a) 350 年間の水平変位の分布。(b) ATS を適用した場合と dt 固定の場合との差。(c) 右下の式で与えられる最大水平変位量に対する相対誤差の分布。 U_{ATS} は ATS を適用した場合、 u_{ref} は dt 固定の場合の水平変位。

高速化した粘弾性応答計算手法を用いて、グリーン関数を計算した。プレート境界面上に図 2-3-①-4 (a) で示したような単位すべりの分布を 80 点で与え、それによる弾性応答ならびに 350 年間の粘弾性応答を、図 2-3-①-4 (b) で示した地表の観測点での変位について計算した。なお、この計算は A100 GPU 56 台のクラスターを用いて 3 日間で実施した。

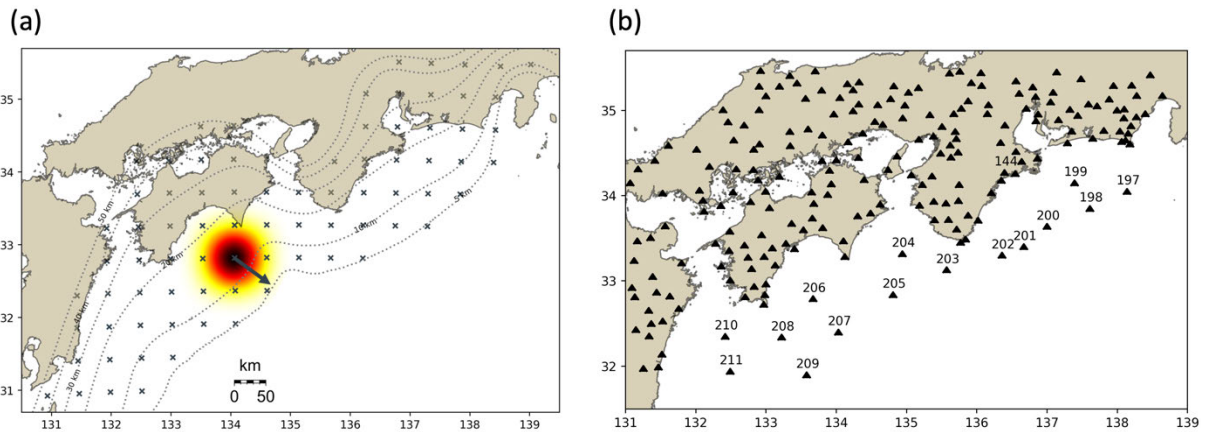


図 2-3-①-4 (a) グリーン関数を計算したプレート境界面上の 80 の単位すべりの中心位置と単位すべり分布の一例。すべりの向き（沈み込み方向の逆）を矢印で示す。(b) 変位の応答を計算した観測点の分布。

得られたグリーン関数に対して、地震時のすべりとその後のすべり遅れを与えた場合の海陸 2 点での鉛直変位の応答の例を図 2-3-①-5 に示した。地震時の変位は海の方が大きいのにに対して、その後の粘弾性応答は陸の観測点での変化の方が大きいことがわかる。

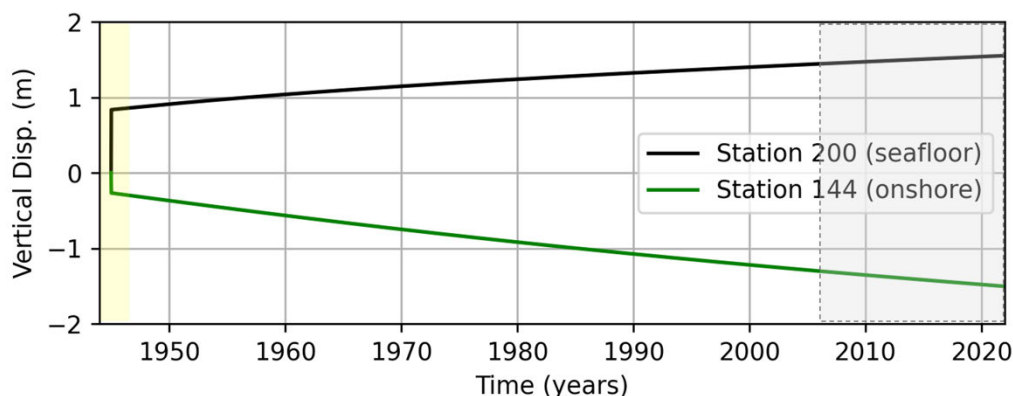


図 2-3-①-5 計算したグリーン関数を用いて地震時・地震後の変位応答（鉛直成分）を計算した例。緑と黒はそれぞれ陸と海の観測点（観測点番号は図 2-3-①-5 (b)を参照）。

履歴情報を活用した地震シナリオの検討としては、Noda et al. (2021)⁴⁾ の手法を用いて、どの領域がどのタイミングでどの程度すべったかを地震履歴の統一モデルの知見に合わせて設定することで、次に起こりうる複数の地震シナリオを検討することとした。ここでのポイントは、地震履歴の知見として、何回かに一度、ある領域が他の時期より大きくすべるといった知見（地質学的な痕跡にもとづく長期的振る舞い）の入れ方によって、次に起こりうるシナリオがどのように変わるかを調べることにある。具体的には、東海沖では、安政・明応・永長・白鳳の際により大きかった可能性があり、紀伊半島付近では、宝永・正平で、足摺付近では宝永でそのような可能性がある。

(c) 結論ならびに今後の課題

以上のことから、数百年にわたる長期間の粘弾性応答を、多数の単位すべりに対して、十分短時間で計算が高精度で計算可能になったことがわかる。今後の課題は、得られた粘弾性応答グリーン関数やその計算手法を活用して、半割れ後の推移予測⁵⁾ に粘弾性を考慮した試行を行うとともに、整理した履歴情報とともに、次に起こりうる地震シナリオの検討を行うことである。

(d) 引用文献

- 1) Ichimura, T., Fujita, K., Koyama, K., Kusakabe, R., Kikuchi, Y., Hori, T., Hori, M., Maddegadara, L., Ohi, N., Nishiki, T., Inoue, H., Minami, K., Nishizawa, S., Tsuji, M., and Ueda, N., 2022. 152K-computer-node parallel scalable implicit solver for dynamic nonlinear earthquake simulation. In International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 18-29. <https://doi.org/10.1145/3492805.3492814>

- 2) Fujita, K., Murakami, S., Ichimura, T., Hori, T., Hori, M., Lalith, M., Ueda, N., 2022. Scalable finite-element viscoelastic crustal deformation analysis accelerated with data-driven method, in: 2022 IEEE/ACM Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Heterogeneous Systems (ScalAH), pp. 18-25. doi:10.1109/ScalAH56622.2022.00008.
- 3) Murakami, S., Fujita, K., Ichimura, T., Hori, T., Hori, M., Lalith, M., Ueda, N. (2023). Development of 3D Viscoelastic Crustal Deformation Analysis Solver with Data-Driven Method on GPU. Computational Science - ICCS 2023, 423-437.
- 4) Noda, A., Saito, T., Fukuyama, E., & Urata, Y. (2021). Energy-based scenarios for great thrust-type earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, using an interseismic slip-deficit model. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2020JB020417. <https://doi.org/10.1029/2020jb020417>.
- 5) Hori, T., Hyodo, M., Miyazaki, S., Kaneda, Y. (2014). Numerical forecasting of the time interval between successive M8 earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, using ocean bottom cable network data. Mar. Geophys. Res., 35, 285-294, DOI 10.1007/s11001-014-9226-8.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
3次元高詳細構造モデルを用いた1944年東南海・1946年南海地震によるプレート内応力変化計算（ポスター）	橋間 昭徳 堀 高峰 飯沼 卓史 村上 颯太 藤田 航平 市村 強	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023.5	国内
GPUにおけるデータ駆動型手法を用いた粘弾性地殻変動解析手法の開発（口頭発表）	村上 颯太 藤田 航平 市村 強 堀 高峰 堀 宗朗 Maddegedara Lalith 上田 修功	第26回応用力学シンポジウム	2023.5	国内
GPU-accelerated viscoelastic crustal deformation analysis with data-driven method（口頭発表）	Sota Murakami Kohei Fujita Tsuyoshi Ichimura Takane Hori Muneo Hori Maddegedara Lalith Naonori Ueda	ICIAM 2023 (10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics)	2023.8	国外

2004年紀伊半島沖地震による余効変動解析：3次元粘弾性構造の影響（ポスター）	橋間 昭徳 堀 高峰 飯沼 卓史 藤田 航平 村上 颯太 市村 強	2023年日本地震学会秋季大会	2023.10	国内
GPUとデータ駆動型手法により高速化した高詳細粘弾性地殻変動解析（口頭発表）	村上 颯太 藤田 航平 市村 強 堀 高峰 堀 宗朗 Maddegedara Lalith 上田 修功	第16回日本地震工学シンポジウム	2023.11	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Development of 3D Viscoelastic Crustal Deformation Analysis Solver with Data-Driven Method on GPU	Sota Murakami Kohei Fujita Tsuyoshi Ichimura Takane Horii Muneo Horii Maddegedara Lalith, Naonori Ueda	Computational Science	2023.06	国外

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

② 海底堆積物を用いた地震・津波履歴情報の整備

(a) 業務の要約

南海トラフ沿いで発生する巨大地震・津波に伴って形成されるイベント堆積物を海底堆積物中から認定し、その堆積間隔から地震発生履歴を推定するために御前崎沖から掘削された海底堆積物コア C9035 Hole B の分析を行った。このコアでは、浮遊性有孔虫の放射性炭素年代測定結果と挟在する3枚の火山灰層の年代から構築した深度-年代モデルに基づいてタービダイトの堆積年代を推定した結果、最終氷期最盛期以降の19000年前まではタービダイトの平均堆積間隔は200年程度であるが、それ以前では平均間隔は300年程度以上と長くなることが分かった。タービダイトのタイプやタービダイトに含まれる底生有孔虫の群集組成も最終退氷期の間で変化することから、タービダイトの給源である斜面

域の氷期－間氷期スケールの環境変化を検討する必要がある可能性が示唆された。古地磁気永年変化曲線を用いた深度－年代モデルの改善のために行った磁性鉱物の安定性の評価では、深度 37.2m 付近で磁性鉱物の変化が認められ、これ以深では古地磁気方位以外に副次的な成分ができていている可能性があることが分かった。

(b) 業務の実施方法

海底堆積物中の地震・津波イベント堆積物の認定とこれに基づく南海トラフ沿いの地震・津波履歴の情報整備のため、令和 5 年度は令和 2 年度・3 年度・4 年度に引き続き、海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」の Expedition 912 により御前崎沖で採取された掘削コアの分析と解析を実施した。「ちきゅう」により採取された掘削コア C9035 Hole A と C9035 Hole B 中に挟在するタービダイトを用いた地震・津波履歴の解明にあたっては、詳細な深度－年代モデルの構築とイベント堆積物の堆積プロセスの推定が重要である。深度－年代モデルについては、C9035 Hole B コアについて、令和 4 年度までに得られた 40 個の浮遊性有孔虫の放射性炭素年代値と 3 枚の火山灰の年代値を用いて構築を行った。さらに、タービダイトの特徴や給源の変化の有無を検討するため、タービダイトのタイプ分けやタービダイト中の底生有孔虫群集の分析を行った。また、古地磁気永年変動曲線を用いた年代モデルの高度化に向けて、磁性鉱物の分析を行った。

(c) 業務の成果

海溝型巨大地震の震源の多くは海底下にある。このため、もっとも大きな地震動とそれに伴う変動は震源近傍の海底で起こると考えられる。海底での大きな地震動は海底堆積物粒子の再配列を引き起こし、粒子間の間隙を埋める水（間隙水）の圧力を上昇させ、粒子を間隙水中に浮かせることで海底堆積物の強度を弱体化させ、海底地すべりを発生しやすくする。また、地震の大きな地震動や浅海に侵入した津波は、未固結の海底表層堆積物を巻き上げ、再移動させる^{1)、2)}。このような地震や津波に伴う海底での土砂の再移動は、堆積物粒子を含んだ周囲の海水よりも密度の大きい水塊として、重力の効果により海底斜面を流れ下る堆積物重力流によると考えられ、斜面やその基部では水中土石流堆積物やタービダイトを堆積させる。これらの地震・津波起源で形成された堆積物（イベント堆積物と呼ばれる）は通常時に海底に堆積する泥とは異なる粒度組成や堆積構造を持つことが知られている^{3)、4)}ので、海底堆積物中からイベント堆積物を認定し、その堆積年代を決めることで過去の地震や津波の発生時期を特定できる可能性がある^{5)、6)、7)}。本課題では、南海トラフ沿いの海域を対象に、海底堆積物中の地震・津波起源のイベント堆積物からこの海域の地震・津波の発生履歴情報を得ることが目的となる。

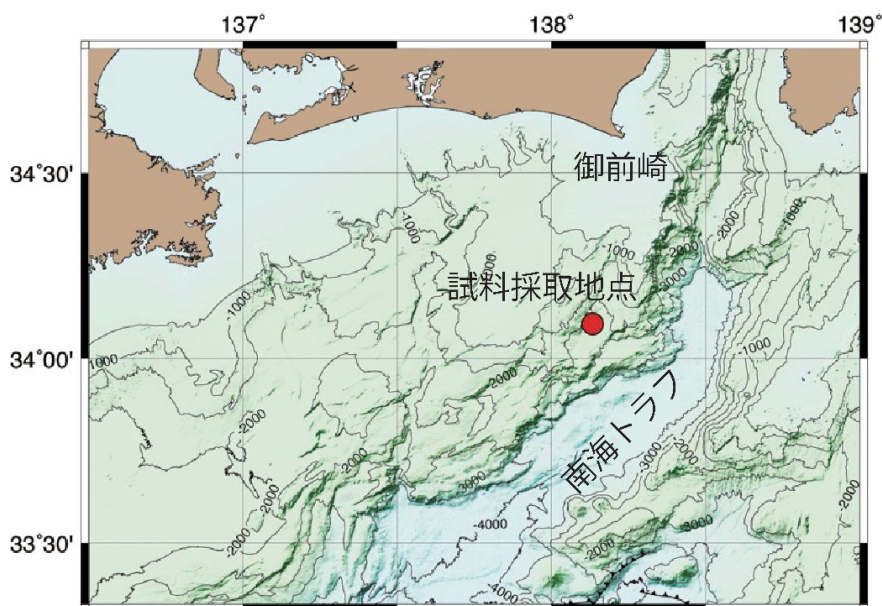


図 2-3-②-1 「ちきゅう」による御前崎沖掘削コア C9035 Hole B 採取地点

掘削コア C9035 Hole B は、静岡県御前崎沖の金洲ノ瀬トラフの水深 2414m から「ちきゅう」により採取された試料である（図 2-3-②-1）。今回は C9035 Hole B コアの上部約 42m を用いた（図 2-3-②-2）。このコアには多数の砂質堆積物の挟在が確認され、下面が明瞭かつ侵食的で、上方へ細粒化する構造などから、堆積物重力流の一つである混濁流から形成されたタービダイトと解釈される。タービダイトの砂質部分の上位にはわずかに上方に細粒化する生物擾乱を持たない泥が存在し、タービダイト泥と判断される。この海盆は陸棚域につながる海底谷を欠き、浅海域での気象学的イベントによるイベント堆積物の供給がないあるいは少ないと考えられる場である上、海盆の陸側斜面には巨大地震の震源断層として動きうる活断層とされる東海スラスト⁸⁾が存在し、巨大地震発生時には地形変化や激しい地震動が期待できる場とされる⁶⁾。令和 4 年度の研究結果では、C9035 Hole B コアと同じ地点で採取された不擾乱表層堆積物コアの堆積構造及び過剰鉛 210 と放射性セシウムのプロファイルの比較から、C9035 Hole B コアでは海底堆積物の最表層が欠如していること、表層堆積物コアには 1944 年昭和東南海地震の記録は明瞭な砂層として残されていないことが明らかにされている。そして、この地点のタービダイトが示す地震は、御前崎沖より東方の東海セグメントまで破壊が及んだ地震により形成されたと考えられた。このような東海セグメントまで破壊が及んだ地震の長期間に渡る発生間隔を明らかにするため、C9035B Hole B コアについて深度-年代モデルの構築を行った。

深度-年代モデルは、令和 4 年度までに C9035B Hole B コアの通常時の堆積物である半遠洋性泥に含まれる浮遊性有孔虫遺骸を用いて 40 層準から得られた放射性炭素年代値とこのコアに挟在する 3 枚の年代既知の火山灰（鬼界-アカホヤ（K-Ah）、鬱陵-隠岐火山灰に対比される琵琶湖高島沖掘削コアの BT4、始良丹沢（AT）火山灰）の年代を用いて行った。3 つの火山灰の年代は、水月湖での年代値⁹⁾を用いた。挟在する三瓶池田軽石（SI）についても水月湖で年代が報告されている¹⁰⁾が、今回のモデル構築には反映できていない。コア深度 37m 付近以深の 5 つの放射性炭素年代値には測定限界（43500 年）

より古い値が含まれており、年代値の信頼度が低いと考えられるので、コア深度 37m 以深については、直上の堆積速度を外挿して堆積年代を求めた。年代モデルの構築ではまず、肉眼記載と X 線 CT 画像に基づくタービダイトと半遠洋性泥の識別を行い、年代値を得た層準のタービダイトを除いた深度を計算し、タービダイトを除いた深度に対する年代モデルを作成した。そして、この年代モデルに基づいて、各タービダイトの堆積年代を求めた（図 2-3-②-3）。この年代モデルに基づく、検討した深度約 42m までの部分の最下部の年代は約 57000 年前となる。また、タービダイトの数が約 200 枚あるのに対して、年代を与えられているのは 38 層準であるので、各タービダイトの堆積年代を精度良く決められているとは言い難いが、ここでは得られた堆積年代を用いて、検討を進める。

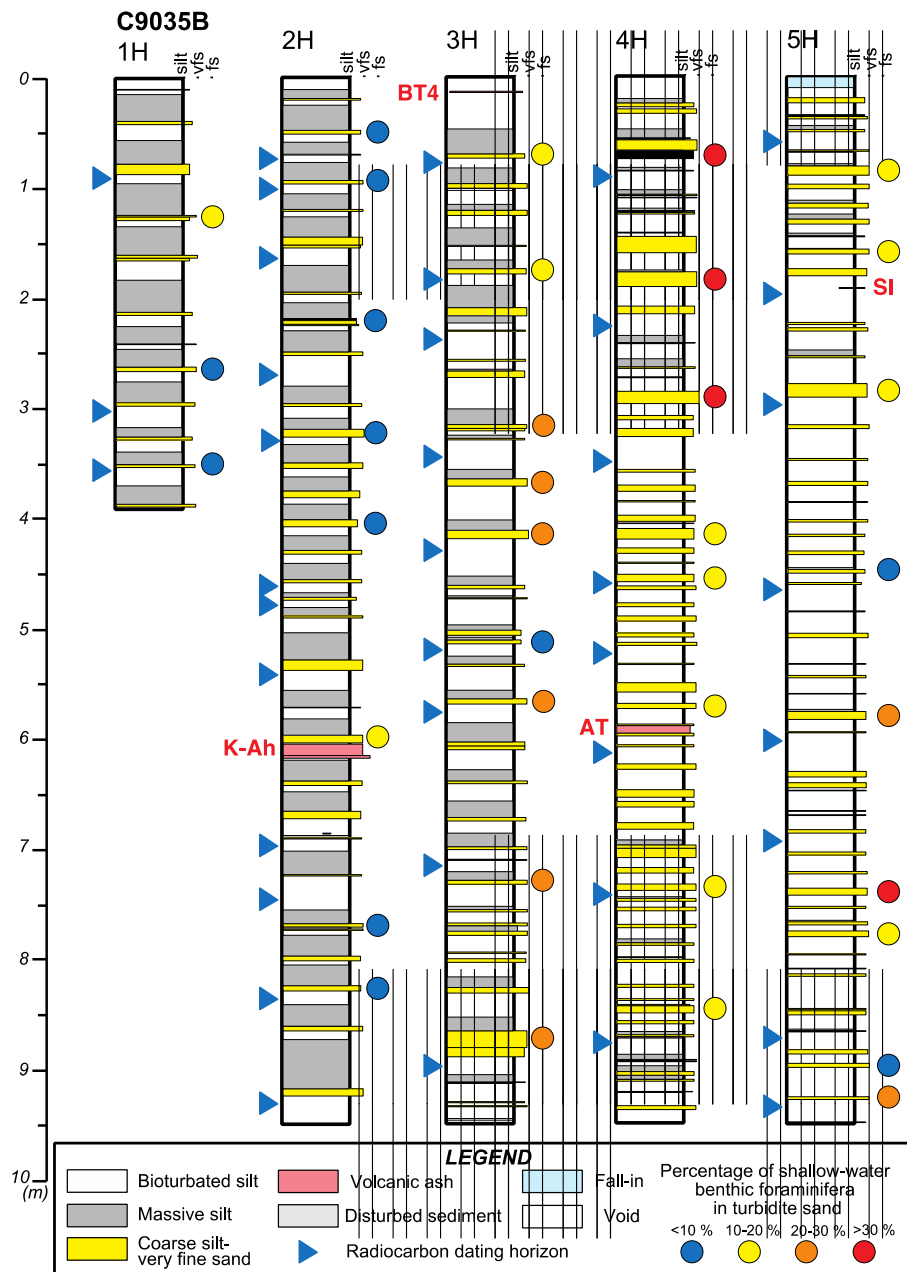


図 2-3-②-2 御前崎沖掘削コア C9035 Hole B の柱状図と浮遊性有孔虫による年代測定層準（柱状図左の青三角）、同定された火山灰の挟在層準と対比結果（柱状図のピンクの層準）とタービダイト中の底生有孔虫群集における浅海棲種の割合（柱状図右の丸）

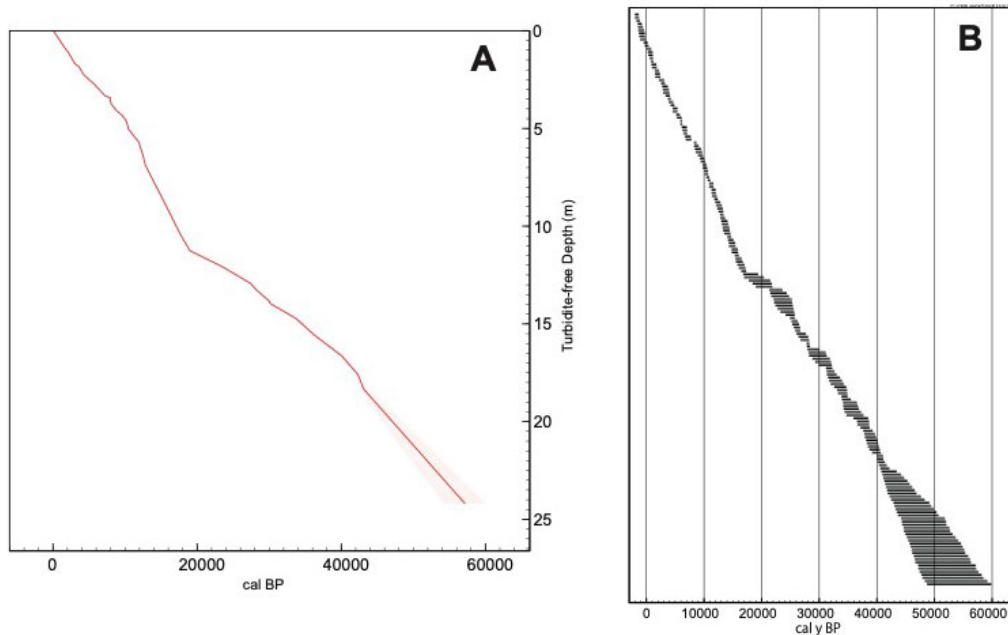


図 2-3-②-3 御前崎沖掘削コア C9035 Hole B の浮遊性有孔虫の放射性炭素年代値と火山灰の年代値から構築されたタービダイトを除いた深度-年代モデル (A) とそれから求められたタービダイトの堆積年代 (B)。タービダイトの堆積年代は、 2σ の範囲で表示。

御前崎沖掘削コア C9035 Hole B について得られたタービダイトの堆積年代の中央値を用いて、タービダイトの堆積間隔を求め、50 年毎の頻度分布を作成した (図 2-3-②-4-A)。全期間に渡る堆積間隔は 50 年以下から 800 年を超えるものまで幅広く分布するが、100~150 年と 250~300 年にピークを持ち、平均間隔は約 300 年を示す。短い間隔の存在は、タービダイト堆積時に下位の半遠洋性泥を侵食することで、計算上の堆積間隔が短くなっている可能性を示唆する。一方でタービダイトの堆積間隔は、後期第四紀の環境変動に応じた変化をしているようにも見える。19000 年前以降の最終退氷期から完新世の高海水準期にかけて (図 2-3-②-4-A の後期寒冷期 (LG) から完新世 (Holocene) の期間) は、タービダイトの堆積間隔は 100~300 年の間にピークと期間毎の平均間隔を持つ。一方、19000 年前以前の最終氷期最盛期より前では、堆積間隔は全体に大きくなり、期間毎の平均間隔は約 350 年以上の値を示す。最終退氷期以降における堆積間隔からは、東海セグメントまで破壊が及んだ地震の平均的な発生間隔が 200 年程度であったことが分かる。

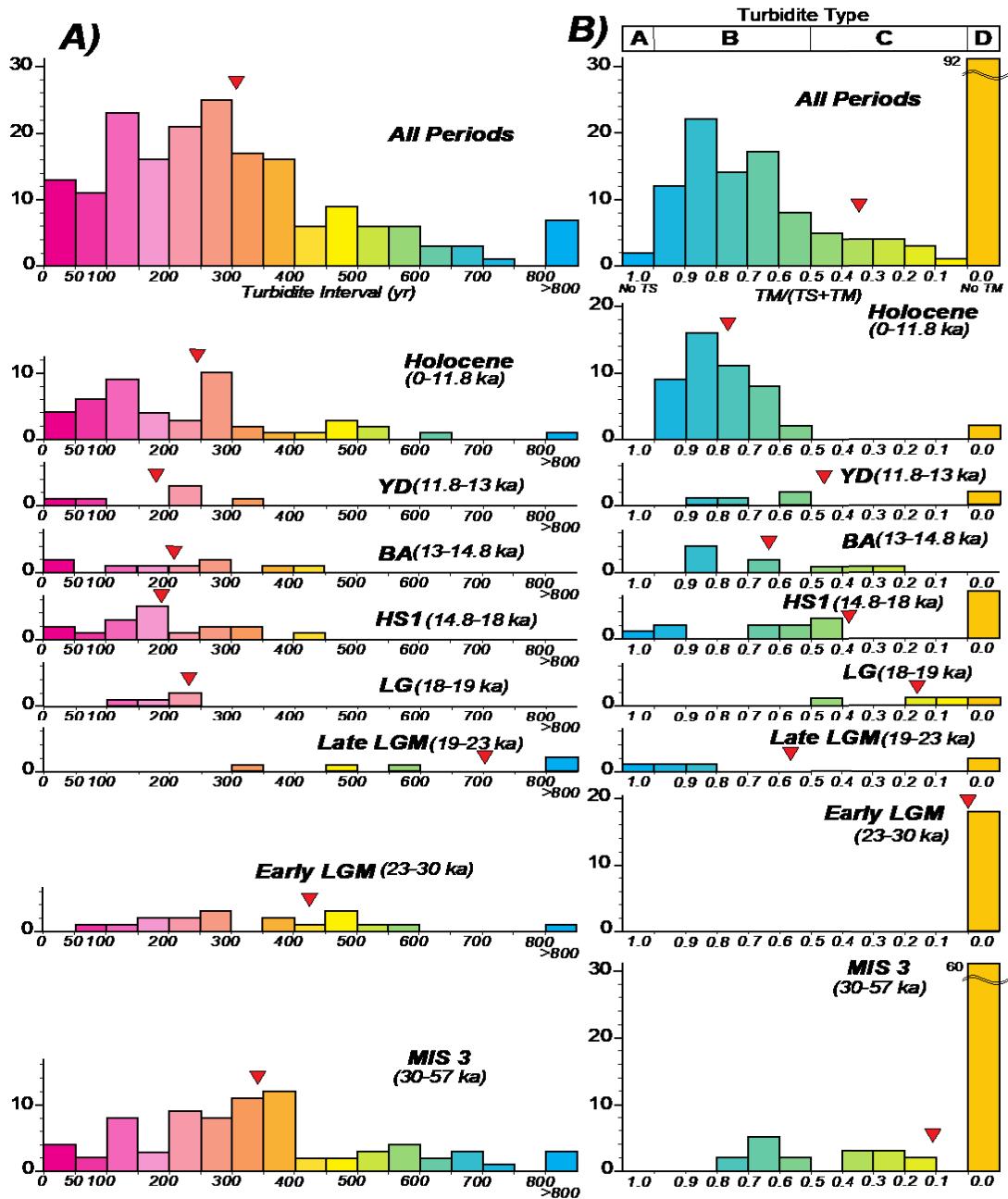


図 2-3-②-4 御前崎沖掘削コア C9035 Hole B に挟在するタービダイトの堆積間隔 (A) とタービダイトのタイプ (B) の層序変化。YD: 新ドレアス期 (Younger Dryas)、BA: ボーリング-アレレード期 (Bolling-Are)、HS1: ハイニンリッヒ寒冷期 1 (Heinrich Stadial 1)、LG: 後期寒冷期 (Late Glacial)、LGM: 最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum)、MIS 3: 酸素同位体ステージ 3 (Marine Isotope Stage 3)

表 2-3-②-1 御前崎沖掘削コア C9035 Hole B のタービダイトの特徴の時間変化のまとめ

	Holocene		Last deglaciation			LGM		MIS 3
	YD	YD	BA	HS1	Late glacial	Late LGM	Early LGM	
Turbidite Thickness	10-30 cm	<20 cm	<20 cm	<10 cm	<20 cm	<10 cm	<10 cm	<10 cm
Turbidite Type	Type B (TM-dominant)	Type B	Type B & C	Type D (Type B & C)	Type C & D	Type D & B	Type D (No TM)	Type D (Type C & B)
Turbidite Interval	100-150 & 250-300	250-350	(250-300)	150-200 & 250-300	200-250	(>300)	(250-300 & 450-500)	300-400 (&100-150)
Benthic Foram in Turbidite sand (% of shallow-water species)	<10	10-20	20-30	>30	>30	>30	10-20	10-20
Benthic Foram Type of Hemipelagic mud	Deep & Intermediate-Deep Water	Intermediate-Deep & Deep Water	Intermediate-Deep & Deep Water	Intermediate-Deep & Shallow-Intermediate Water	Intermediate-Deep & Shallow-Intermediate, Intermediate Water	-	Intermediate-Deep & Shallow-Intermediate, Deep Water	Intermediate-Deep & Shallow-Intermediate Water
¹⁴ Corg Age Offset between Turbidite and Hemipelagic Muds	<500	500-1500	-1100	500-1500	-	-900	-	-1000

御前崎沖掘削コア C9035 Hole B のタービダイトは、堆積間隔のみならず他の特徴も環境変動に応じた変化を示しているように見える。タービダイト全体 (TS+TM) に占めるタービダイト泥 (TM) の割合で区分されるタービダイトのタイプ (図 2-3-②-4-B 及び表 2-3-②-1) は、高海水準期の完新世のタービダイトはほぼすべてがタービダイト砂 (TS) よりもタービダイト泥が卓越するタイプ B からなるが、最終退氷期になるとタービダイト砂が卓越するタイプ C が増え始め、最終退氷期の前期から最終氷期最盛期ではタービダイト泥を伴わないタイプ D が普遍的に認められるようになり、最終氷期最盛期の前期ではすべてのタービダイトがタイプ D となる。それ以前の酸素同位体ステージ 3 では、タービダイト泥を伴うタイプ B や C もあるが、多くはタイプ D である。このようなタービダイト泥の厚さの変化を反映して、タービダイト自体の厚さも完新世から最終退氷期に厚く、最終氷期最盛期以前で薄い傾向にある (表 2-3-②-1)。これらの変化はタービダイトの起源となる混濁流の発生域の底質環境が時間と共に変化した可能性を示唆する。

環境変動に応じた変化はタービダイト砂中の底生有孔虫の群集にも認められる (図 2-3-②-2)。完新世のタービダイト砂中の底生有孔虫群集は、上下の半遠洋性泥中のそれと類似し、主に中～深海棲種から成り、浅海棲種の割合は 10% に満たない (図 2-3-②-2 及び表 2-3-②-1)。浅海棲種の割合は最終退氷期に入ると徐々に増加し、13000～14800 年前では 20～30%、14800 年前以前では 30% を超え、この高い割合は最終氷期最盛期まで維持される。酸素同位体ステージ 3 に入ると浅海棲種の割合は 10～20% に減少するが、まれに 20% 以上の割合を示すものも見られる。これらの変化は混濁流発生域の水深が最終退氷期後半以降は近傍の斜面であったのに対して、それ以前ではより浅い水深であった可能性を示唆する。

タービダイト泥とその直上あるいは直下の半遠洋性泥に含まれるバルク有機物の放射性炭素年代値の差は混濁流の発生プロセスを検討するのに有効であり、年代差が小さい場合には斜面の表層堆積物の再懸濁・再移動が混濁流の発生プロセスとして示唆される^{11)、12)}。令和 2 年度と 3 年度に C9035 Hole B コアについて測定されたタービダイト泥と半遠洋性泥のバルク有機物の放射性炭素年代値の差は、完新世では 500 年以下のものが多いが、最終退氷期に入ると差の大きなものが増え始め、500～1500 年となる (表 2-3-②-1)。最終氷期最盛期前半の差は得られていないものの、最終氷期最盛期後半と酸素同位体ステージ 3 における差は 900～1000 年程度であり、完新世に比べると大きい値を示す。年代差が大きいと言うことは、給源となる斜面の堆積速度が同じ場合、より大き

い深度までの堆積物が再移動したことを示すが、この場合、再移動する堆積物の量が増えるので、タービダイトの厚さは厚くなると考えられる。しかし、最終退氷期以前のタービダイトの厚さは完新世に比べてむしろ薄い（図2-3-②-2及び表2-3-②-1）。給源となる斜面の堆積速度が完新世に比べて最終退氷期以前では遅い場合、再移動する堆積物の厚さが同じでも、より古い年代の堆積物まで再移動することになる。斜面の堆積速度が極端に遅くなれば、再移動する堆積物の厚さが小さくなくても、古い年代の堆積物が再移動できることになる。最終退氷期以前のタービダイトの厚さが完新世のタービダイトよりも薄いこと、最終氷期最盛期に向かってタービダイト泥の割合が減ること、浅海棲の底生有孔虫が増えることも考えると、最終氷期最盛期の低海水準期には、タービダイトの給源はより浅い、砂質な斜面域になり、再移動する堆積物の厚さは減少した可能性が高い。今回の結果は、陸棚域につながる海底谷を持たない水深約2400mの海盆でも、タービダイトの堆積において第四紀の100m規模の氷河性海水準変動の影響を受ける可能性を示唆し、氷期-間氷期スケールの長期間に渡る地震性タービダイトの堆積間隔の検討において斜面域の堆積環境の変化の影響を考慮すべきことを示している。

C9035 Hole B コアのように堆積速度の速い試料では、古地磁気永年変化曲線でコア間対比や堆積年代の推定が期待される¹³⁾が、古地磁気永年変化を記録している磁性鉱物の安定性を評価する必要がある。令和4年度の古地磁気測定結果の解析のうち、相対地球磁場強度記録を使った堆積年代決定のための磁性鉱物の粒径や形状といったパラメータが一定であることの検討では、非履歴性残留磁化（ARM）と等温残留磁化（IRM）の比から深度16m付近と39m付近でARM/IRMの比の振幅に変化が見られた。さらに本年度は、古地磁気永年変化を記録している磁性鉱物の安定性の評価を行った。磁性鉱物の量や種類を反映する帯磁率に急激な変化が37.2mで観察されたため（図2-3-②-5-C）、それより上位の試料5点と、下位の試料2点の低温における磁気特性を測定した。各試料とも3つの方法で温度を変化させながら測定を行ったところ、37.2mより上位の試料では120ケルビンの温度で磁化強度にはっきりした変化が観察された（図2-3-②-5-A）。これはフェルベール相変態と呼ばれる磁鉄鉱に特徴的な現象であり^{14)、15)}、磁鉄鉱が含まれるということは、古地磁気復元に良い試料であると言える。一方、下位の試料にはフェルベール相変態が明瞭でない（図2-3-②-5-B）、磁鉄鉱が一部酸化している事が考えられる。したがって、本来の古地磁気方位以外に副次的な成分ができている可能性があるので注意して主成分解析を進める必要がある事が分かった。一方、37.2mで起こる磁気特性の違いがどのように起こったかは、別途検証する必要がある。このような磁性鉱物の変化は、給源や堆積環境の変化のほか、堆積物の埋没による初期続成過程によっても生ずる^{15)、16)}。本年度、別途検討してきた環境変化に対応したタービダイトの給源や斜面環境の変化との対応も含めて、統合的に検討する必要がある。

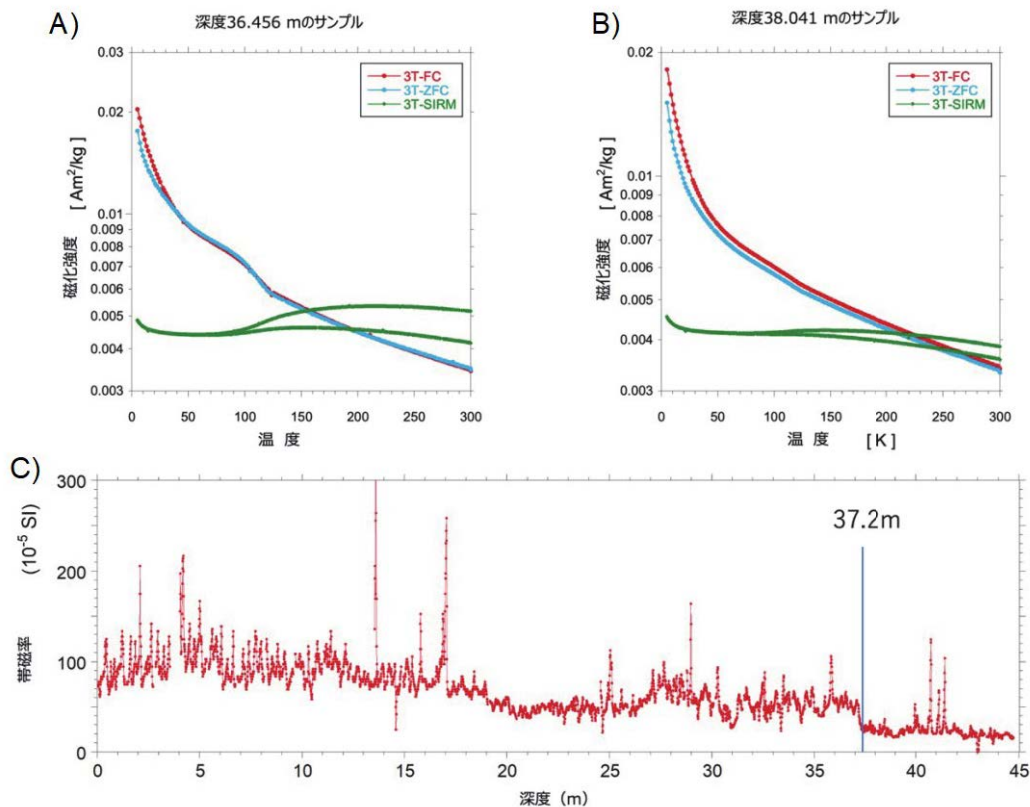


図 2-3-②-5 温度 (K) に対する磁化強度 (Am^2/kg) の変化 (A: 深度 36.456m、120K で変化が見られる例、B: 深度 38.041m、120K で変化が明瞭でない例) と深度 (m) に対する帯磁率の変化 (C)。A、B: 3T-FC: 磁化させた試料を 3T の強磁場中で温度を上げながら測定、3T-ZFC: 磁化させた試料を無磁場中で温度を上げながら測定、3T-SIRM: 室温で SIRM を着磁させた後 10K まで下げながら測定し引き続き室温に上げながら測定、120K 付近の磁化強度の開きが異なる。

(d) 結論ならびに今後の課題

以上のように、令和 5 年度の海底堆積物コアの分析結果から以下のことが分かった。

今年度、御前崎沖の「ちきゅう」による掘削コア C9035 Hole B で構築した深度-年代モデルから、深度約 42m における年代は約 57000 年前であることが分かった。19000 年前以降の最終退氷期から完新世にかけてのタービダイトの堆積間隔は 100~300 年にピークを持ち、おおよそ 200 年の間隔であったと言える。令和 4 年度の研究結果から、この地点のタービダイト記録は東海セグメントまで破壊が及んだ地震の記録と考えられることから、このような地震の平均的発生間隔は約 200 年と推定される。一方で、タービダイトの堆積間隔は最終氷期最盛期や酸素同位体ステージ 3 で約 350 年より長くなる。一枚のタービダイト中のタービダイト泥の割合やタービダイトの厚さ、タービダイト砂に含まれる底生有孔虫群集、タービダイト泥と半遠洋性泥の年代差も最終氷期最盛期に向けて変化することも踏まえると、陸棚域につながる海底谷を持たない水深約 2400m の海盆でも、タービダイトの堆積において第四紀の 100m 規模の氷河性海水準変動の影響を受ける可能性を示唆し、氷期-間氷期スケールの長期間に渡る地震性タービダイトの堆積間隔の検討におい

て斜面域の堆積環境の変化の影響を考慮すべきことを示した。さらに、磁性鉱物の粒径や形状や磁性鉱物の安定性にも変化を示すシグナルが見ついている。これらの統合的な解釈により、給源や斜面域の環境変化とタービダイトの特徴の変化の関係を考察することが今後必要である。また、現在の深度-年代モデルの構築に用いている年代値は 35 個の浮遊性有孔虫の放射性炭素年代と 3つの火山灰の年代であるが、約 200 枚のタービダイトの堆積年代を精度良く拘束するには至っていない。より多数の年代値を用いたより確からしい深度-年代モデルの構築が必要である。

(e) 引用文献

- 1) 池原 研, 宇佐見和子: 海底の地震・津波堆積物－巨大地震・津波による海底の擾乱と擾乱記録を用いた巨大地震・津波履歴の解明－, シンセシオロジー, Vol.11, pp.12-22, 2018.
- 2) 池原 研: 海底地すべりと混濁流の発生, 地盤工学会誌, Vol.68, No.7, pp.52-57, 2020.
- 3) Bouma, A.H.: Sedimentology of some flysch deposits, Elsevier, Amsterdam, 168p, 1962.
- 4) Stow, S.A.V. and Shanmugam, G.: Sequence of structures in fine-grained turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments, Sed. Geol., Vol.25, pp.23-42, 1980.
- 5) Adams, J.: Paleoseismicity of the Cascade subduction zone: evidence from turbidites off the Oregon-Washington margin, Tectonics, Vol.9, pp.569-583, 1990.
- 6) 池原 研: 深海底タービダイトを用いた南海トラフ東部における地震発生間隔の推定, 地学雑, Vol.110, pp.471-478, 2001.
- 7) Goldfinger, C., Nelson, C.H., Johnson, J.E. and the Shipboard Scientific Party: Holocene earthquake records from the Cascadia subduction zone and northern San Andreas Fault based on precise dating of offshore turbidites, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., Vol.46, pp.555-577, 2003.
- 8) 徳山英一・平 朝彦・倉本真一・山本富士夫: 東海沖海底の変動地形, 科学, Vol.68, pp.56-57, 1998.
- 9) Smith, V.C., Staff, R.A., Blockley, S.P.E., Bronk Ramsey, C., Nakagawa, T., Mark, D.F., Takemura, K., Danhara, T. and Suigetsu 2006 Project Members: Identification and correlation of visible tephras in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronizing of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka, Quat. Sci. Rev., Vol.67, pp.121-137, 2013.

- 10) Albert, P.G., Smith, V.C., Suzuki, T., Tomlinson, E.L., Nakagawa, T., McLean, D., Yamada, M., Staff, R.A., Schlolaut, G., Takemura, K., Nagahashi, Y., Kimura, J.-I. and Suigetsu 2006 Project Members: Constraints on the frequency and dispersal of explosive eruptions at Sambe and Daisen volcanoes (South-West Japan Arc) from the distal Lake Suigetsu record (SG06 core), *Earth-Sci. Rev.*, Vol.185, pp.1004-1028, 2018.
- 11) Ikehara, K., Usami, K. and Kanamatsu, T.: Repeated occurrence of surface-sediment remobilization along the landward slope of the Japan Trench by great earthquakes, *Earth Planet Space*, Vol.72, 114, doi:10.1186/s40623-020-01241-y, 2020.
- 12) 池原 研: 地震動による海底表層堆積物の再懸濁・再移動とそれを起源としたイベント堆積物を用いた地震履歴研究, *第四紀研究*, Vol.62, pp.73-87, 2023.
- 13) Kanamatsu, T., Ikehara, K. and Hsiung, K.-H.: Stratigraphy of deep-sea marine sediment using paleomagnetic secular variation: Refined dating of turbidite relating to giant earthquake in Japan Trench, *Mar. Geol.*, Vol.443, 106669, doi:10.1016/j.margeo.2021.106669, 2021.
- 14) Verwey, E.J.W.: Electronic conduction of magnetite (Fe₃O₄) and its transition point at low temperature. *Nature*, Vol.144, pp.327-328, 1939.
- 15) Yamazaki, T., Abdeldayem, A.L. and Ikehara, K.: Rock-magnetic changes with reduction diagenesis in Japan Sea sediments and preservation of geomagnetic secular variation in inclination during the last 30,000 years. *Earth Planets Space*, Vol.55, pp.327-340, 2003.
- 16) Kalin, R.: Magnetite diagenesis in marine sediments from the Oregon continental margin. *J. Geophys. Res.*, Vol.95, pp.4405-4419, 1990.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Multiproxy-derived temperature evolution offshore southern Japan over the past 30 kys: Implications for Kuroshio Current variability, poster	Ang, Z.Y. Sagawa, T. Ikehara, K. Ikehara, M. Hefter, J. Ho, S.L.	2023 Ocean Sciences Conference, Taiwan	2023.5	国外
Regional sediment transport of southwestern Ryukyu Trench: Morphological and lithological characteristics, oral	Hsiung, K.-H. Kanamatsu, T. Ikehara, K. Murayama, M. Yamamoto, Y.	2023 JpGU meeting	2023.5	国内

Middle - late Holocene turbidite record on earthquake-induced surface sediment remobilization along the upper slope of Hyuga-nada, westernmost Nankai Trough, Japan, oral	Ikehara, K. Kanamatsu, T.	XXI INQUA Congress	2023.7	国外
A ~50 ky continuous turbidite paleoearthquake record in a slope basin off Omaezaki, eastern Nankai Trough, poster	Ikehara, K. Ishizawa, T. Satoguchi, Y. Nagahashi, Y. Hsiung, K.-H. Kanamatsu, T.	2023 American Geophysical Union Fall Meeting	2023.12	国外

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
地震動による海底表層堆積物の再懸濁・再移動とそれを起源としたイベント堆積物を用いた地震履歴研究（査読あり）	池原 研	第四紀研究	2023.8	国内
Active sediment transport along trench axis: Insights from X-ray fluorescence core scanning and magnetic analysis of marine sediments in the southern Ryukyu Trench（査読あり）	Hsiung, K.-H., Kanamatsu, T., Ikehara, K., Murayama, M. Yamamoto, Y.	Geoscience Letters	2023.10	国外

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

③ 陸域における地震・津波履歴調査

(a) 業務の要約

陸域における地震・津波の履歴調査は、紀伊半島から四国にかけての沿岸の3地域において、掘削調査及び既存の堆積物コア試料の分析を実施した。

三重県南伊勢町では、過去の巨大津波による浸水履歴の復元を行った。調査地である「こがれ池」(図2-3-③-1)の湖底堆積物の採取、年代測定、珪藻分析を実施し、国際誌 *Progress in Earth and Planetary Science* (PEPS) に論文を投稿していた。今年度は、査読の対応として、追加の年代測定と火山灰分析を実施した。こがれ池には、過去約3000年間に形成された19枚のイベント堆積物が保存されており、各種分析の結果、19枚のうち13枚が津波または低頻度の非常に大きなストームによって堆積したと考えられた。今年度行った Age-Depth モデルの構築に基づき、13枚のうち5枚または6枚が南海トラフで発生した歴史地震による津波堆積物の可能性があるかと結論付けられた。上述の PEPS に投稿した論文は、2023年8月に出版された¹⁾。

和歌山県東牟婁郡那智勝浦町の太田川低地では、下里地区において令和4年度に6地点で採取したジオスライサー試料(6地点13孔、最大掘削深度1.9m)について、詳細な層相観察を行うとともに、1地点で得られた試料について粒度分析の前処理を、2地点で得られた試料について9件の放射性炭素年代測定の依頼分析を実施した。その結果、全ての地点において3つの堆積相が累重していることを確認した。このうち少なくとも1つの堆積相は津波などのイベントにより形成された可能性が考えられる。また八尺鏡野(やたがの)地区において、既存の4地点のオールコア試料(YT-01, 01-2, 02, 03)に加えて、ハンドコアラによる掘削を3地点(YT-02-1, 02-2, 04)で実施し、詳細な層相観察を行うとともに、放射性炭素年代測定の依頼分析を実施した。その結果、10層のイベント砂層が確認され、年代測定結果は5400~2300 cal BPを示した。

高知県東洋町の海岸低地では、ハンドコアラを用いて掘削調査を行い津波堆積物の検出を試みた。掘削調査の結果、低地の大部分は浜堤の一部と考えられる砂層に覆われていることが明らかになった。低地の最奥部ではシルト~粘土層中に挟在する砂層もみられたが、これらがイベント堆積物であるかは、今後より広い範囲で掘削調査を行って判断する必要がある。

(b) 業務の成果

1) 三重県南伊勢町・こがれ池

本地域の研究については、令和4年度までに大部分の分析が終了しており、令和4年度に国際誌 *Progress in Earth and Planetary Science* (PEPS) に論文を投稿していた。本年度は、イベント層の起源の推定や堆積曲線の見直しを目的として、追加の年代測定・火山灰分析を行った。

こがれ池で採取した堆積物からは、19枚のイベント堆積物(上位から順に、E1-E19と定義)が見つかった。令和4年度までに行った肉眼およびCT画像による堆積構造の観察、火山灰分析、珪藻分析、年代測定等の各種分析と、本年度実施した追加の火山灰分析・年代測定の結果、19枚のイベント層のうち13枚のイベント層

(E1-E10、E12-E14) が、「津波」または「低頻度の非常に大きなストーム」により形成されたことが示唆された。

こうした海水の侵入がいつ発生したのかを推定するために、ベイズ統計を用いた年代統計学のパッケージである Bchron^{2),3)} を用いた堆積曲線 (Age-Depth モデル) の推定を行ってきた。本年度は、追加の放射性炭素同位体年代測定を行ったため、その結果を利用して Age-Depth モデルの再構築を行った形である。

構築された Age-Depth モデルと各イベント層の堆積年代は、それぞれ図 2-3-③-2 と表 2-3-③-1 の通りである。モデル構築においては、イベント堆積物は瞬時に堆積したとみなしているため、各イベント堆積物の層厚はコアログから差し引いている。図 2-3-③-2 及び表 2-3-③-1 における各イベント堆積物の深さ (Depth) は、この補正を行った後の値である。これまでに同様のプログラムを用いて Age-Depth モデルの構築を行っている研究でも、この補正は取り入れられている^{4),5)}。また、モデルの構築は 3 回行っており、堆積年代は 3 回の結果の平均値により算出した。本研究で見つかったイベント層の堆積年代と、歴史地震および周辺地域で報告のある津波堆積物との年代の対比の結果を以下に示す。

「津波」または「低頻度の非常に大きなストーム」で形成されたと考えられた 13 枚のイベント堆積物 (E1-E10、E12-E14) のうち、E1 から E9 は、南海トラフにおいて発生したとされる地震・津波の歴史記録が残存している期間 (歴史時代) に形成されたイベント堆積物であった。このうち、E2 の堆積年代 (1620-1786 CE) が 1707 年宝永地震と重複していた。また、E3 の堆積年代 (1556-1673 CE) および E4 の堆積年代 (1520-1612 CE) が 1606 年慶長地震を含んでいた。同様に、E5 の堆積年代 (1415-1538 CE)、E7 の堆積年代 (1079-1246 CE)、E9 の堆積年代 (677-796 CE) が、それぞれ 1498 年明応地震、1096 年永長地震、684 年白鳳地震と重複していた。また、もっとも若いイベント堆積物 E1 (1757-1988 CE) については、1944 年昭和東南海津波、1854 年安政東海津波、1959 年伊勢湾台風の高潮のどれか、もしくはそれらのコンビネーションによって形成された可能性が示唆された。

先史時代に形成されたイベント堆積物 E10-E14 については、先行研究によって明らかにされている地震・津波の地質痕跡と対比を行った。E10 (1354-1279 cal BP)、E12 (1503-1367 cal BP) は、三重県の志島低地で見つかった津波堆積物と年代が重なっていた⁶⁾。また、E12、E13 (1558-1399 cal BP)、E14 (1569-1404 cal BP) は三重県の相差で見つかった津波堆積物と同時期に形成されたと考えられた⁷⁾。



図 2-3-③-1 分析を行った湖底堆積物が採取されたこがれ池の位置。基図は国土地理院発行 1:25000 地形図「贅浦」を使用。

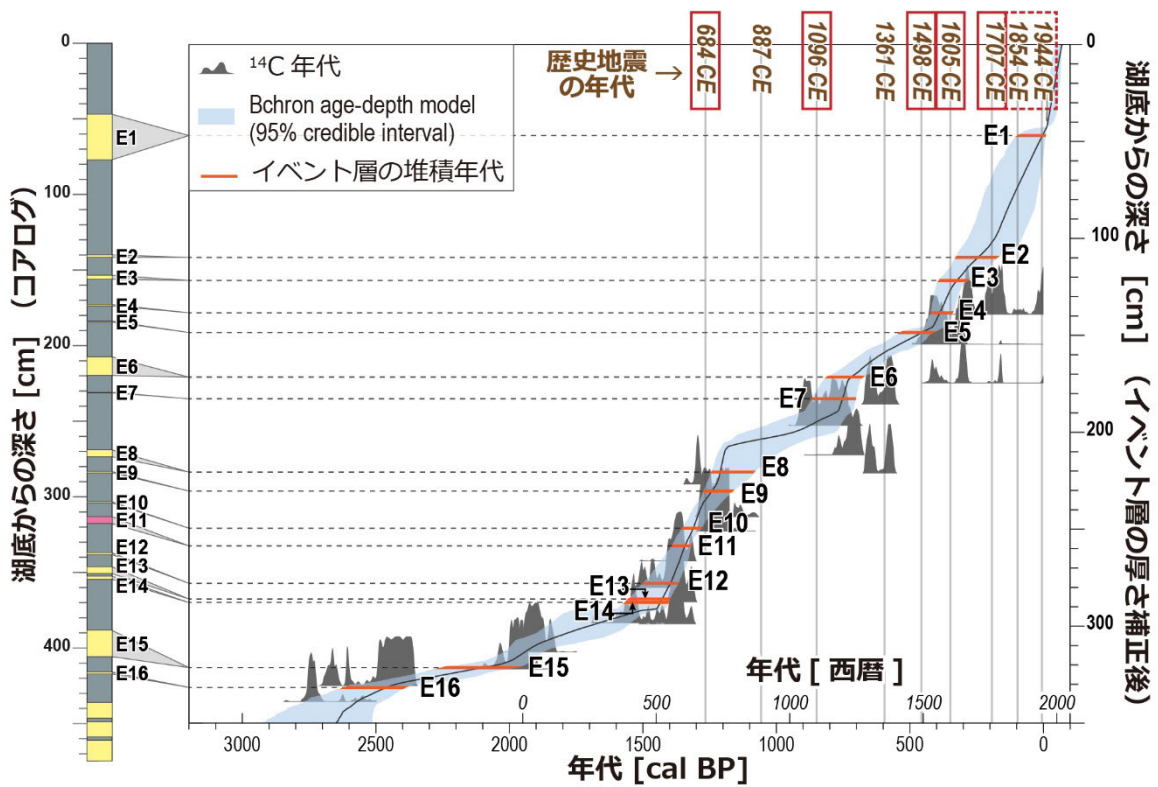


図 2-3-③-2 Bchron によるこがれ池の湖底堆積物についての Age-Depth モデル。(Shimada et al., 2024¹⁾ を編集)。

表 2-3-③-1 Age-Depth モデルによって推定された E1-E16 の堆積年代 (E17-E19 については、limiting maximum age が得られていないため、堆積年代の推定を行っていない)。

Core location	Name of event deposits	Corrected depth below the lake bottom [cm]	Calibrated depositional age (95 % credible interval, cal yr BP)	Calibrated depositional age (95 % credible interval, cal yr CE / BCE)
K-4	E1	46.9	193--38	1757-1988 CE
K-4	E2	109.8	334-157	1616-1793 CE
K-4	E3	121.7	383-249	1567-1701 CE
K-4	E4	138.4	427-334	1523-1616 CE
K-4	E5	148.5	489-386	1461-1564 CE
K-4	E6	171.5	775-636	1175-1314 CE
K-4	E7	182.7	862-701	1088-1249 CE
K-4	E8	220.5	1240-1052	710-898 CE
K-4	E9	230.3	1268-1141	682-809 CE
K-4	E10	249.5	1345-1275	605-675 CE
K-4	E11	258.6	1387-1317	563-633 CE
K-4	E12	277.9	1493-1364	457-586 CE
K-4	E13	286.0	1545-1395	405-555 CE
K-4	E14	287.7	1557-1400	393-550 CE
K-4	E15	321.4	2243-1948	293 BCE - 2 CE
K-4	E16	331.6	2604-2363	654-413 BCE

2) 和歌山県那智勝浦町・太田川低地

a) 下里地区

下里地区の沿岸低地 (図 2-3-③-3) では、令和 4 年度に 6 地点 (図 2-3-③-4) においてジオスライサーによる地質試料 (掘削長 1.40~1.93m) を計 13 点採取した。令和 5 年度は、本地質試料について、主に肉眼観察に基づいた堆積相解析を行うとともに、地点 1 で得られた試料 (SS-02) について粒度分析の前処理を実施した。また、地点 4 と地点 6 で得られた試料 (SS-08、SS-13) について計 9 件の放射性炭素年代測定の依頼分析を実施した。

地点 1~6 において昨年度採取したジオスライサー試料について、粒度や堆積構造に加え、生物擾乱の有無や微化石などの含有物などに着目して肉眼観察を行ったほか、軟 X 線撮影画像による観察も行った。これらの観察結果に基づき堆積相を区分した結果、全ての地点において下から順に F3、F2、F1 の堆積相が累重していることが明らかとなった (図 2-3-③-5)。ジオスライサー試料で観察された F3 相は層厚 60~100 cm 程度で、主に淘汰の良く白色の細粒砂からなる

が、層厚数 cm 以下の薄い植物片濃集層を挟む。主に石英や長石などの白色鉱物からなるが、二枚貝の破片や有孔虫、巻貝などが含まれるほか、合弁の二枚貝もわずかに含まれる。場所によっては平行葉理や緩い角度の斜交葉理が発達するほか、生痕が発達している様子もみられる。F2 相は層厚 20~50 cm 程度で、F3 相との境界は明瞭であり浸食的である。F2 相は主に泥質な極細粒砂からなり、数 cm 程度の泥炭層やパッチ状の泥炭を頻繁に挟む。貝殻片や有孔虫などはほとんど含まれず、堆積構造や生痕もほとんどみられない。F1 相は層厚 50~80 cm 程度で、F2 相との境界は不明瞭である。F3 相の下部は主に淘汰の悪い砂質泥からなり、数 cm 程度の大きさの角礫が含まれるほか、植物の材や根も多く含まれる。F3 相上部の数 10cm は現在の耕作土や湿地性の泥炭である。これらの観察結果から、F3 相は浅海環境で形成された堆積物、F2 相は津波などのイベントによる堆積物、F1 相は近傍の斜面崩壊や人為的な土壌改良に伴う堆積物と考えられる。しかしながら、後述する堆積年代からは F3 相が比較的短期間に形成されていることから、F3 相自体も津波などのイベント堆積物である可能性もあると考えられる。

次に、堆積物の形成年代を推定するために地点 4 と地点 6 のジオスライサー試料から葉や枝などの植物片を抽出し、9 件の放射性炭素年代測定の依頼分析を実施した（図 2-3-③-5）。その結果、今回観察された F3 相は最長でも約 300 年という比較的短い期間に形成されていること、F3 相と F2 相の間には約 4000 年の年代ギャップがある可能性が高いこと、F2 相は約 900~670 年前に形成された津波などのイベント堆積物である可能性があることが示された。

F3 相の形成過程や形成年代を確かめるため、令和 6 年 2 月に深さ約 3 m までのジオスライサー試料を追加で採取した。その結果、F3 相の下位に粘土層があることが明らかとなった。この試料については今後詳細な観察や分析を進める予定である。



図 2-3-③-3 調査地の位置図。基図は国土地理院の地理院地図を使用。

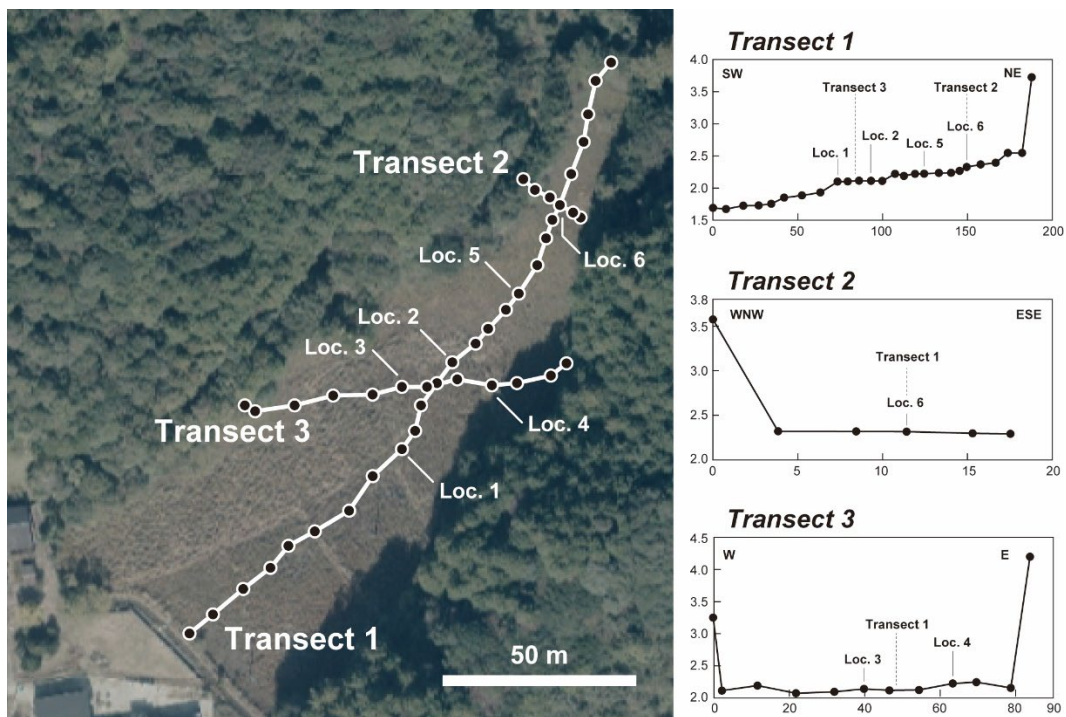


図 2-3-③-4 下里地区の沿岸低地における掘削地点と測量結果。基図は国土地理院の地理院地図を使用。

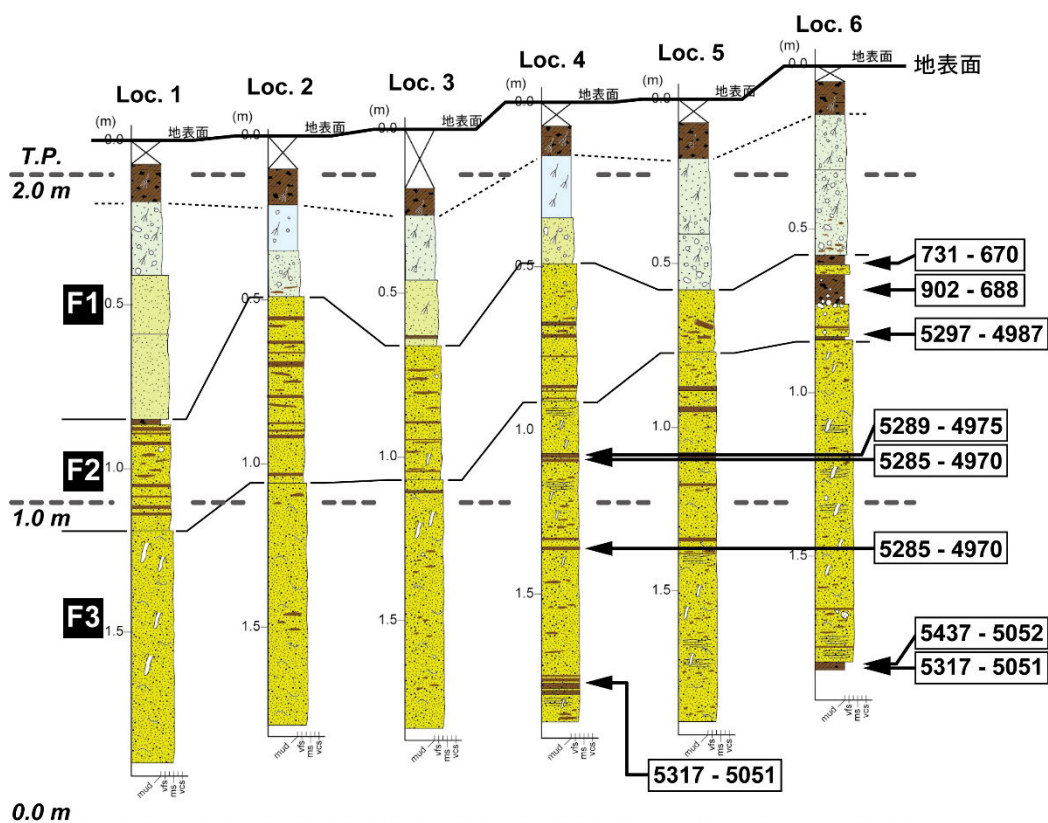


図 2-3-③-5 ジオスライサー試料の柱状図と堆積相区分。矢印は放射性炭素年代測定用試料の採取位置、四角内の数値は年代測定値 (cal BP) を示す。

b) 八尺鏡野地区

八尺鏡野地区には、太田川河口から約 1.2km 遡った右岸側に幅 100m 以下、奥行き約 400m の溺れ谷状の湿地が分布する（図 2-3-③-3、図 2-3-③-6）。この湿地の海側から陸側に向けて設定した約 100m の測線上の 4 箇所（海側から YT-01、YT-01-2、YT-02、YT-03）で、文部科学省委託事業「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」（文部科学省研究開発局・海洋研究開発機構、2020）⁸⁾において産業技術総合研究所が令和元年に採取した堆積物コア試料（コア径約 5 cm）がある。これらに追加して、同一測線上で YT-02 と YT-03 の間で 2 箇所（YT-02-1 および YT-02-2）、YT-03 のさらに陸側で 1 箇所（YT-04）において、ハンドコーラー（コア径約 3 cm）を用いた掘削調査を実施した（図 2-3-③-6）。YT-02-1 は深度 5.3m、YT-02-2 は深度 6.0m、YT-04 は深度 6.0mm までそれぞれ掘削し、層相観察を行うとともに年代測定試料を採取した。また既存のコア試料についても追加で年代測定試料を採取した。年代測定用試料は、実体顕微鏡による観察で堆積物からおもに植物化石（葉や果実）を拾い出し、放射性炭素同位体年代測定を実施した。

層相は既存のコア試料と同様に、下位から暗褐色有機質シルト、黒～暗褐色泥炭、黒～暗褐色有機質シルトおよび黄灰色シルト～粘土が分布する（図 2-3-③-7）。それらの間に浸水イベントを示す砂層が複数枚挟まっている。既存のコアと合わせて検討した結果、イベント砂層は 10 層が識別できる。年代測定結果はおおよそ 5400～2300 cal BP を示し、これまでの報告と調和的である。特に下位のイベント砂層は下里地区のイベントと対比できる可能性がある。

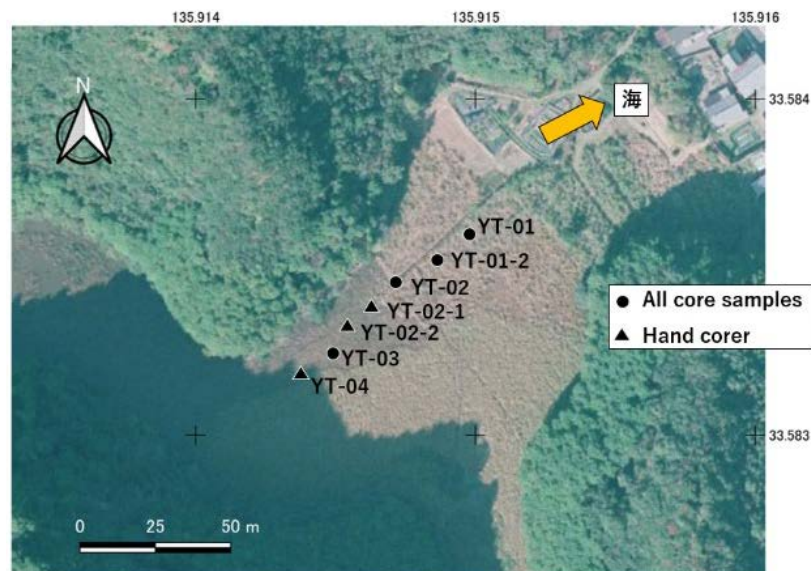


図 2-3-③-6 八尺鏡野地区の沿岸低地における掘削地点。基図は国土地理院の空中写真を使用。

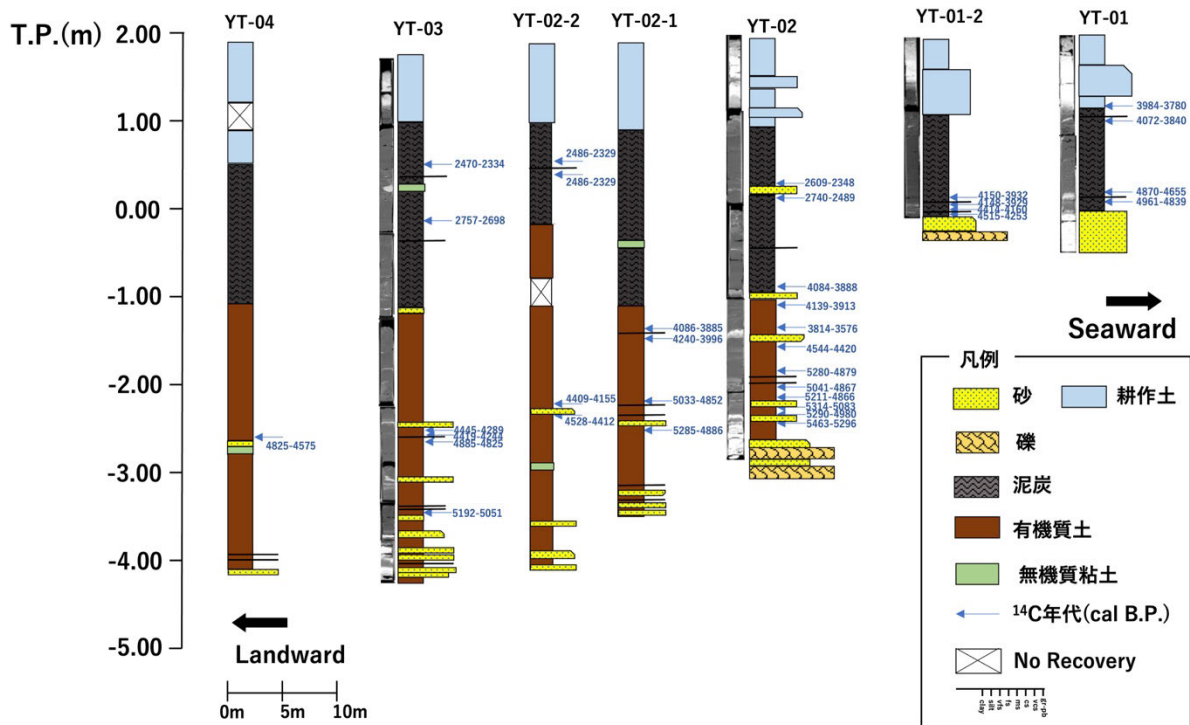


図 2 - 3 - ③ - 7 コア試料の柱状図と CT スキャンイメージ。

3) 高知県東洋町

調査地域は高知県東洋町河内地区の海岸低地である（図 2 - 3 - ③ - 8）。この低地は海岸から約 800m 内陸に位置し、海側には集落の立地する浜堤が分布する。海岸線沿いの浜堤背後の低地は、かつて湿地や沼などであった可能性が高く、そのような静穏な環境ではシルト～粘土層や泥炭層などが堆積しやすい。そのため、砂質のイベント堆積物を検出するのに適している。また、当地域では、1605 年慶長地震、1707 年宝永地震、1854 年安政地震で津波による浸水被害があったことが知られている。以上の背景から、東洋町河内地区の海岸低地を調査地域に選定した。掘削調査はハンドコアラーを用いて人力で行い、16 地点で掘削を行った。

掘削地点の拡大図を図 2 - 3 - ③ - 9 に、南北方向（X-X'）及び東西方向（Y-Y'）の断面図を図 2 - 3 - ③ - 10 及び 11 に示す。本低地の標高は最奥部を除き約 1.6～1.8m で、かつては水田として利用されていたが、現在はその多くが休耕田となっている。低地から海への出口を塞ぐように分布する浜堤の標高は約 2～3.5m で海側ほど高くなる傾向を示す。

掘削は最大約 2m まで行った。X-X' 沿いの表層地質は、最上部の 50cm 程度が耕作土や盛土、それより下位では砂質シルト層、シルト質砂層、砂層から構成される（図 2 - 3 - ③ - 10）。砂層は淘汰のよい細粒～中粒砂からなり、内陸側の 2 地点では標高約 50cm 以下で貝殻片を多く含む。貝殻片は 1mm 程度の非常に細かいものも多く、2mm を超えるようなものはほとんど見られなかった。地下水位が高いため標高-10cm 以深は掘削できなかったが、標高約 0～1.2m は基本的に砂層で構成されることから、浜堤が当初の推定より内陸まで分布していたと考えられる。X' に近い最奥部

のコアでは、盛土直下に灰褐色の砂礫層が確認された。この砂礫層は下部に貝殻片を含み、礫は概ね 5 cm 以下の垂円礫である。盛土も砂礫から構成されるが、層相が大きく異なるため盛土とは明瞭に区別される。砂礫層直下には植物片を含む砂質シルト層が分布し、その層相変化からは砂礫層がイベント堆積物である可能性も考えられる。砂礫層直下の砂質シルト層は海側のコアでも連続して確認されるが、砂礫層は他の地点では確認されない。最奥部の一角のみ標高が 60cm 程度高くなっており、その高くなった部分に砂礫層が存在することから、一方で、この砂礫層も人工改変層である可能性も考慮する必要がある。

Y-Y' 沿いの表層地質は、最上部の 60cm 程度が耕作土や盛土、それより下位では砂質シルト層～有機質粘土層、砂層などから成る（図 2-3-③-11）。X-X' 沿いに比べ Y 側の 2 地点では、盛土直下のシルト～粘土層が厚く堆積しており層厚は約 50～60cm で、やや有機質である。地下水位が高いため Y-Y' 沿いでも標高 0m 以深は掘削できなかったが、最下部はシルト～粘土層中に砂層が挟在、あるいはシルト層と砂層の互層であるとみられ、これらの砂層がイベント堆積物である可能性がある。しかし、その分布は局所的であり、標高 0m 以深の地層も確認できていないため、現時点での判断は難しい。

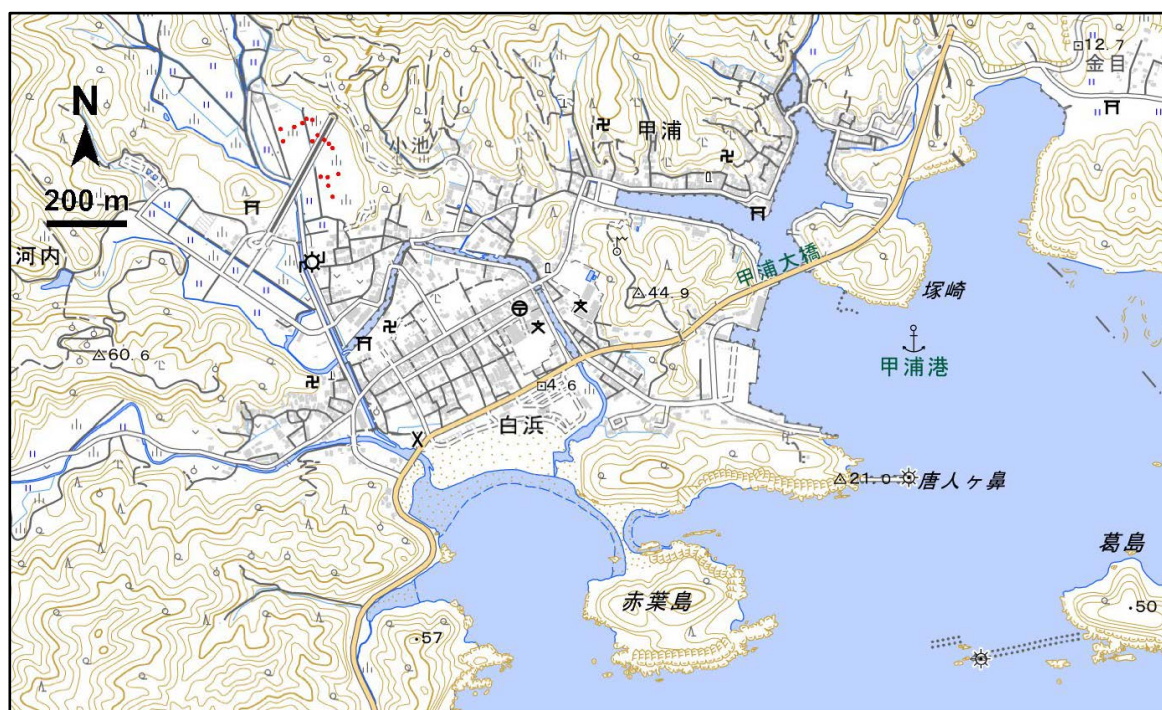


図 2-3-③-8 高知市東洋町の調査地域。赤丸は掘削地点を示す。基図には地理院地図を使用。

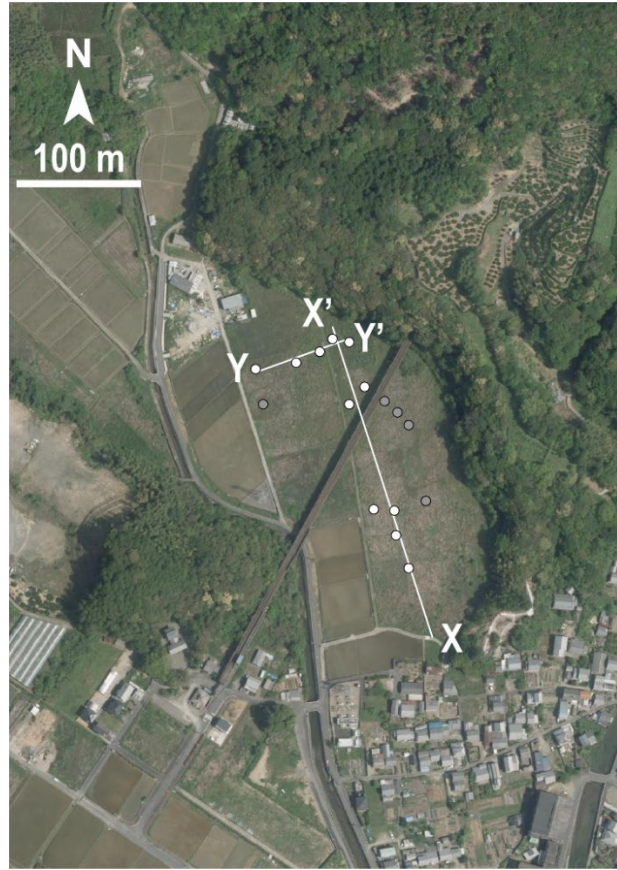


図 2-3-③-9 掘削地点拡大図。白丸は断面図（X-X'、Y-Y'）に使用した地点を示す。基図には地理院地図を使用。

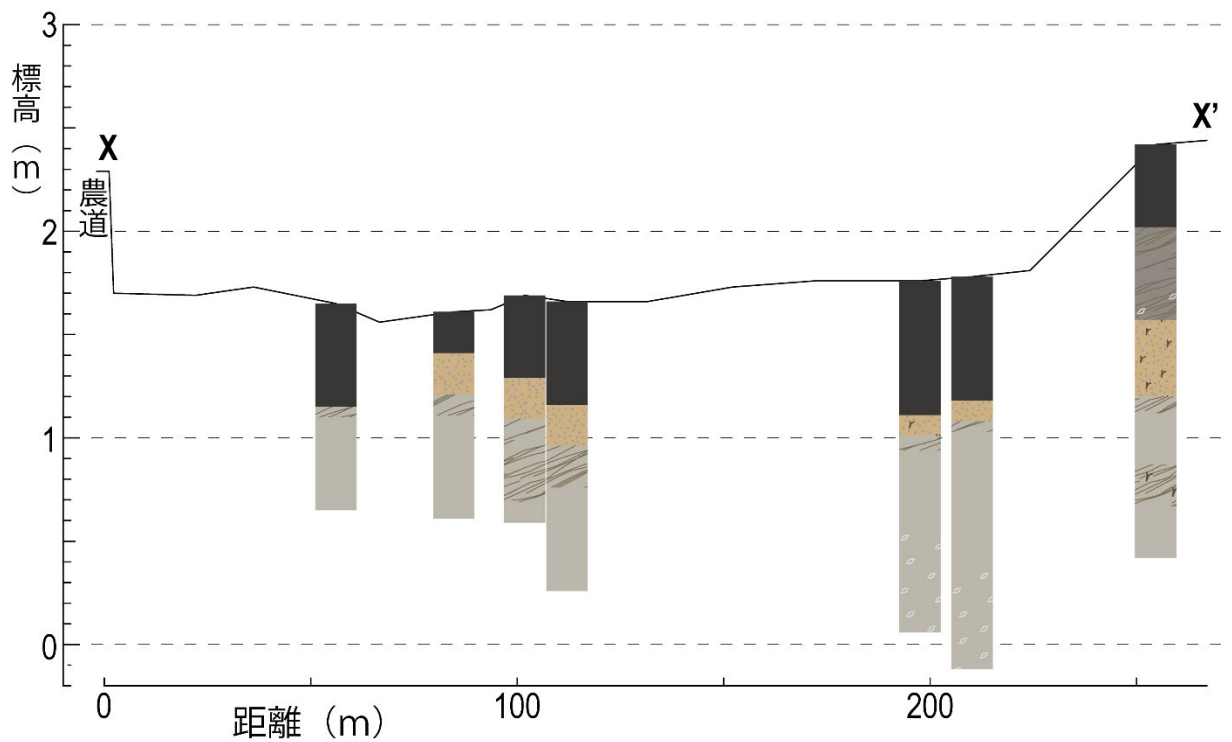


図 2-3-③-10 X-X' 測線の断面図。測線位置は図 2-3-③-7 を参照。

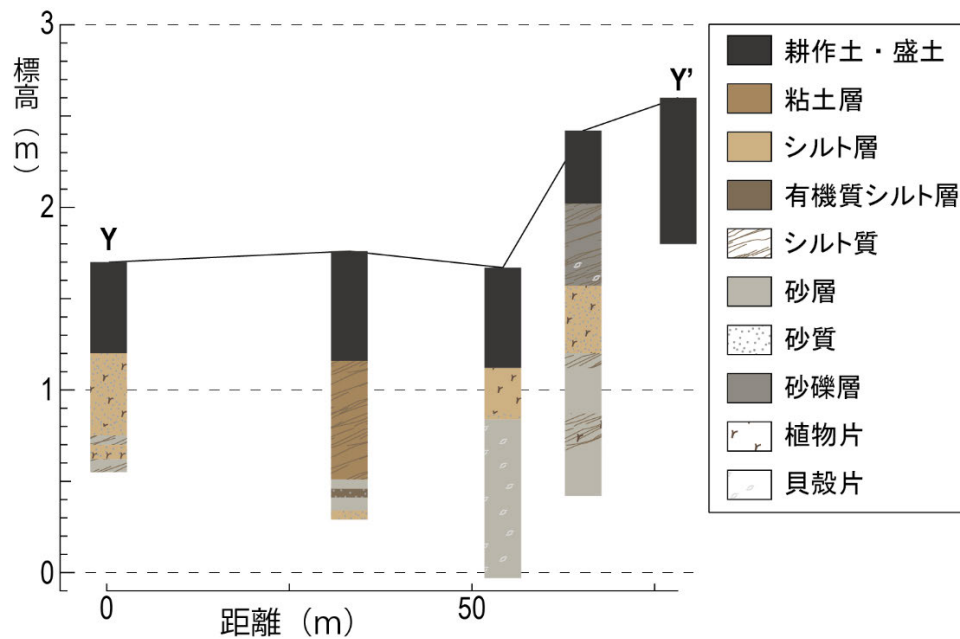


図 2 - 3 - ③ - 11 Y-Y' 測線の断面図。測線位置は図 2 - 3 - ③ - 7 を参照。

(c) 結論ならびに今後の課題

三重県南伊勢町「こがれ池」の湖底堆積物から、過去 3000 年間における「津波」または「低頻度の非常に大きなストーム」による海水侵入が少なくとも 13 回あったことを明らかにした。5 回または 6 回の南海トラフの歴史地震と対応する可能性があるイベント堆積物が含まれていた。今後も、南海トラフ沿岸地域における地質調査・分析を行い、過去数千年間の津波浸水履歴を復元するとともに、その結果を地域間で対比することで南海トラフにおける地震発生履歴を詳細に解明できる可能性がある。

和歌山県東牟婁郡那智勝浦町の太田川低地では、下里地区のジオスライサー試料の解析を行った結果、F1～F3 の 3 つの堆積相からなる累重を確認することができた。このうち、F2 相は津波などのイベントによって約 900～670 年前に形成された堆積物であることが明らかとなった。F3 相は約 5300 年前から約 5000 年前にかけて浅海環境で形成されたと考えられるが、この頃に津波などのイベントによって形成された堆積物である可能性もある。F3 相の形成過程や形成年代を確かめるため、令和 6 年 2 月に深さ約 3m までのジオスライサー試料を追加で採取した。今後は、現在実施中の粒度分析を進めるとともに、今年度の追加試料を含めて採取した試料について微化石などの分析を行い、F2 相や F3 相が津波由来であるかどうかの検証を行うとともに、年代測定を追加で行うことでより精度の高い堆積年代を推定することが必要である。八尺鏡野地区では既存のコア試料 4 箇所に加えて 3 箇所ハンドコアラによる掘削を行い、5400～2300 cal BP の年代を示す 10 層のイベント砂層を確認した。今後は下里地区と八尺鏡野地区との間でのイベントの対比と、太田川低地全体の過去の地形と浸水域との関係解明が必要である。

高知県東洋町河内地区では、ハンドコアラを用いた津波堆積物調査を実施した。調査地域の海岸低地表層には盛土直下に広く砂層が分布しており、想定より内陸まで浜堤が分布していたと考えられる。低地の最奥部の西側ではシルト～粘土層が比較的厚く堆積しており、標高 50cm 付近にはイベント堆積物の可能性のある砂層がシルト層中に挟在して

いた。今後はこれらの砂層の分布を確認するため、最奥部での掘削範囲を広げて掘削調査を行う必要がある。

(d) 引用文献

- 1) Shimada, Y., Sawai, Y., Matsumoto, D. Tanigawa, K., Ito, K., Tamura, T., Namegaya, Y., Shishikura, M. and Fujino, S.: Marine inundation history during the last 3000 years at Lake Kogare-ike, a coastal lake on the Pacific coast of central Japan. *Prog Earth Planet Sci* 10, 49. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00577-9>, 2023.
- 2) Haslett J. and Parnell A: A simple monotone process with application to radiocarbon-dated depth chronologies. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 57, 399-418, 2008.
- 3) Parnell AC, Haslett J, Allen JRM, Buck CE, and Huntley B: A flexible approach to assessing synchronicity of past events using Bayesian reconstructions of sedimentation history. *Quaternary Science Reviews*, 27, 1872-1885, 2008.
- 4) Sabatier S, Wilhelm B, Ficetola GF, Moiroux F, Poulencard J, Develle A, Bichet A, Chen W, Pignol C, Reyss J, Gielly L, Bajard M, Perrette Y, Malet E, Taberlet P and Arnaud F: 6-kyr record of flood frequency and intensity in the western Mediterranean Alps - Interplay of solar and temperature forcing. *Quaternary Science Reviews* 170:121-135, 2017.
- 5) Kempf P, Moernaut J, Van Daele M, Pino M, Urrutia R and De Batist M Paleotsunami record of the past 4300 years in the complex coastal lake system of Lake Cucao, Chiloé Island, south central Chile. *Sedimentary Geology*, 401, 105644, 2020.
- 6) Fujino S, Kimura H, Komatsubara J, Matsumoto D, Namegaya Y, Sawai Y, and Shishikura M: Stratigraphic evidence of historical and prehistoric tsunamis on the Pacific coast of Central Japan: implications for the variable recurrence of tsunamis in the Nankai trough. *Quaternary Science Reviews*, 201:147-161, 2018.
- 7) Okahashi, H., Yasuhara, M., Mitamura, M., Hirose, K. and Yoshikawa, S.: Event deposits associated with tsunamis and their sedimentary structure in Holocene marsh deposits on the east coast of the Shima Peninsula, central Japan. *Journal of geosciences Osaka City University*, 48:143-158, 2005.
- 8) 文部科学省委託事業「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」令和元年度成果報告書, pp.1-655, 2020.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
高知県南国市における完新世後期の海岸砂丘発達と津波浸水への影響（ポスター）	谷川晃一朗 田村 亨 小森康太郎 根来湧輝	日本第四紀学会 2023 年大会	2023.9	国内
Marine inundation history during the last 3000 years at a coastal lake on the Pacific coast of central Japan (poster)	Yumi Shimada Yuki Sawai Dan Matsumoto Koichiro Tanigawa Kazumi Ito Toru Tamura Yuichi Namegaya Masanobu Shishikura Shigehiro Fujino	AOGS2023 20th Annual Meeting 開催場所： シンガポール (Suntec Singapore)	2023.8	国外
紀伊半島那智勝浦町八尺鏡野湿地における津波堆積物調査（ポスター）	隅 拓渡 宍倉正展 前李英明 田原敬治	日本地球惑星科学連合 2023 年大会	2023.5	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Marine inundation history during the last 3000 years at Lake Kogare-ike, a coastal lake on the Pacific coast of central Japan (査読あり)	Yumi Shimada Yuki Sawai Dan Matsumoto Koichiro Tanigawa Kazumi Ito Toru Tamura Yuichi Namegaya Masanobu Shishikura Shigehiro Fujino	Progress in Earth and Planetary Science	2023.8	国外 (国際誌)

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

④ 史料に基づく南海トラフ巨大地震の履歴

(a) 業務の要約

1498 年明応東海地震の津波痕跡高分布と津波堆積物調査の研究成果を基に津波波源モデルを推定した。本業務では、文献記録から読み取られる津波痕跡高だけでなく、津波堆積物調査地の浜提高さを津波痕跡の上限高さとして波源推定^{1、2)}の制約条件に加えることで、断層破壊領域の東端と西端のすべり量を制約した。東海セグメント領域の東端で 19.2m と最もすべり量が大きく、西に向かうにつれてすべり量は減少した。本業務で推定した断層モデルから求まる計算津波高と津波痕跡高の幾何平均および幾何標準偏差は 1.15 と 1.71 で、鳥羽市国崎の 15 m など一部の津波痕跡高を再現できないものの、断層すべりに伴う津波でおおむね説明できた。地震規模を示すモーメントマグニチュードは 8.6 で、地震で発生したエネルギーは安中ほか(2003)³⁾の 1.8 倍だった。津波波源モデルと津波土砂移動数値計算^{4、5)}で、静岡県湖西市白須賀や焼津市浜当目の津波堆積物は観測結果を再現できた。一方で、こがれ池や井田の計算結果は過大評価だった。これは明応東海地震時の汀線位置や浜提高さに不確実な要素が含まれることや津波堆積物を構成する砂の粒径と数値計算で使用する中央粒径が合致しないためだと推測される。すべり量分布を推定する上でこがれ池と井田は重要な調査地であるため、今後中央粒径を観測事実に合わせた計算シナリオを追加してさらなる検討を進める。

(b) 業務の成果

南海トラフ沈み込み帯で発生した明応東海地震に伴う津波は和歌山県から千葉県のパシフィック沿岸部の広範囲にわたって被害を及ぼした(津波痕跡データベース; 東北大学・原子力規制庁⁶⁾)。これまで安中ほか(2003)³⁾や阿部(2017)⁷⁾による津波波源モデルの推定や Kitamura et al. (2020)⁸⁾により海底地すべりが津波を励起した可能性が示唆されているが、昭和東南海・南海地震や安政東海・南海地震、宝永地震に比べて津波痕跡が少なく波源推定にはさらなる検証の余地がある。本業務では、津波痕跡高分布と津波堆積物が報告されている調査地の浜提高さに着目して、津波土砂移動解析モデル(TUNAMI-STM)^{4、5)}を用いて、三重県南伊勢町こがれ池⁹⁾・静岡県湖西市白須賀¹⁰⁾・静岡県焼津市浜当目⁸⁾・静岡県沼津市井田¹¹⁾における津波堆積物の数値再現および津波堆積物調査に基づいた観測事実との比較による明応東海地震津波波源モデルの検証を行った。

こがれ池は外海との間におよそ 4 m の浜堤を持つ沿岸湖沼である。こがれ池の周囲に大規模な碎屑物供給を伴う河川は存在しない。浜堤と外海の間には漁業関連施設が建造されており、300m 程度の埋め立てが行われている。白須賀は浜名湖が遠州灘に注ぐ今切口から西へ 9 km 弱離れた海岸沿いの低地である。低地内には段丘崖の谷の出口から発達した小さな扇状地以外に陸側からの碎屑物供給経路はない。浜堤の高さは 5 m ほどで、現在は国道 1 号バイパスが走っている。浜当目は焼津平野の北東に位置する標高 2~4 m の低地で、西を瀬戸川に囲まれて北と東は低い丘陵に囲まれている。瀬戸川の南にある焼津漁港周辺は大規模な人工改変を加えられていて防潮堤も設置されており、浜当目周辺でも海岸線の一部に人工改変の影響が見受けられる。井田は伊豆半島西側の付け根、駿河湾の東岸に位置する沿岸低地で、集落の北側に小規模な河川があることを除いて巨礫で構成される

標高 5 m の浜堤で外海と切り離されている。低地の大部分は米田として利用されており、集落の南側には小さな溜め池が存在する。

いずれの調査地も沿岸の地形を地震当時のものに近付けるため国土地理院が公開している数値標高モデルから埋立地や海岸構造物を除去し、デジタル伊能図¹²⁾の旧汀線を参考に海岸線を後退させた。その後、海底地形デジタルデータ (M7000 シリーズ) と合成して数値計算に使用する地形データを作成した。地震発生当時の浜堤の高さを推定することは困難であるため現在の高さと同じであると仮定して数値計算を実行した。津波波源モデルとして安中ほか(2003)の二枚矩形断層モデル³⁾と楠本ほか(2023)の五枚小断層モデル¹³⁾を採用した。津波堆積物を構成する砂の粒径は一部のみしか公表されていないため、本解析では細～中粒砂に相当する粒径 0.267 mm に設定した。

1) 痕跡高と浜堤高さから推定されるすべり量分布

図 2-3-④-1 に本業務で推定した明応東海地震のすべり量分布を示す。安中モデルは平均すべり量 5.3m と 7.0m の二枚矩形断層であったのに対して、本業務で推定した津波波源モデルでは東海セグメントの東端で最大 19.2m のすべりがあり、西に向かってすべり量が減少する傾向が見受けられた。本業務で推定した断層モデルから求まる計算津波高と津波痕跡高の幾何平均および幾何標準偏差 (相田、1978)¹⁴⁾は 1.15 と 1.71 で、計算津波高と痕跡高は整合性にややばらつきがあるものの概ね合致していることを示している。一方で、三重県鳥羽市国崎で報告されている 15m の痕跡高は断層すべりでは説明できない。これはリアス式海岸の影響で局所的に津波が大きくなった、局所的な大滑りがあった、もしくは海底地すべりに伴って局所的に高い津波が発生した可能性がある。地震規模を示すモーメントマグニチュードは 8.6 と推定され、地震で発生したエネルギーは安中ほか(2003)²⁾の 1.8 倍だった。

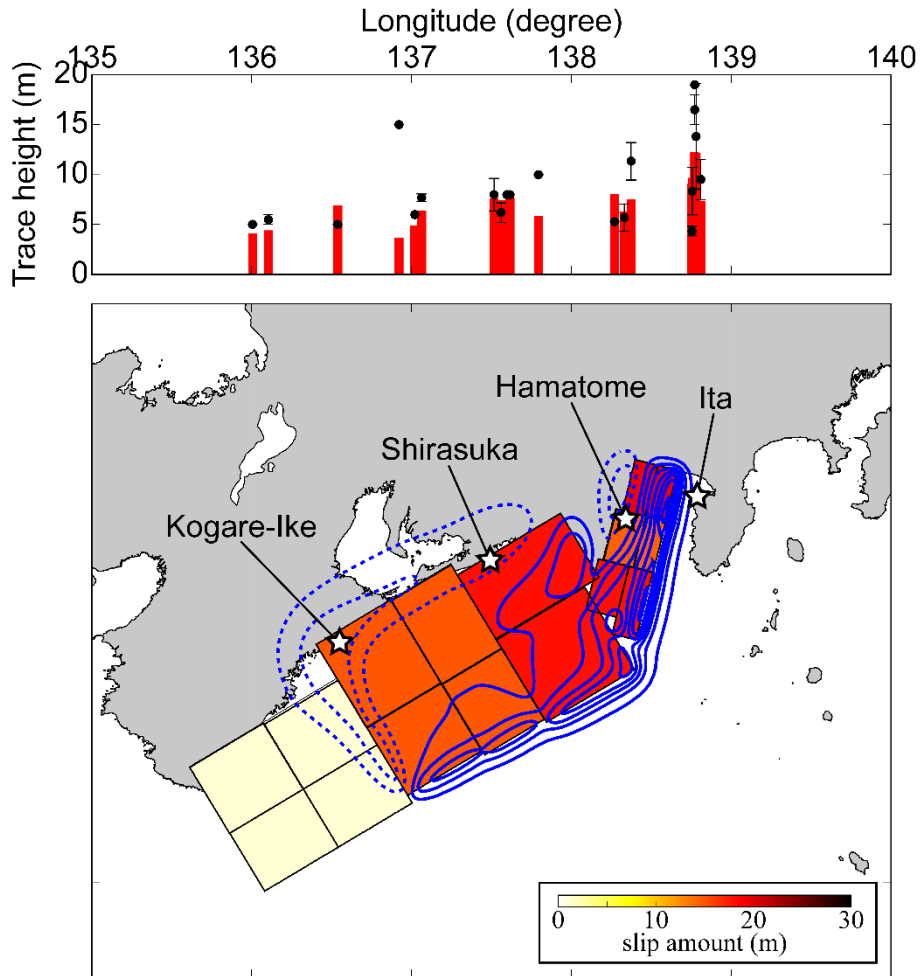


図 2-3-④-1 明応東海地震の五枚小断層モデルと痕跡高分布。

2) 三重県南伊勢町こがれ池

地震発生から3時間後までに最大3.5 mの津波が来襲し、少なくとも三度浜堤を乗り越えてこがれ池内部に侵入した。土砂の堆積量は地震発生からおよそ20分後に到達する第一波による寄与が最も大きい。地震発生から3時間後にはおよそ40 cmの土砂が池内部に堆積した(図2-3-④-2)。一方、堆積物コアの明応東海地震に相当する津波堆積物の堆積層厚は1 cm未満であったと報告されており、計算結果と大きな差異があった⁹⁾。これは地震当時の浜堤高さが不確かであるため、数値計算では地震発生当時の津波より大きな津波が侵入したため過剰な土砂の堆積が生じたと推測される。

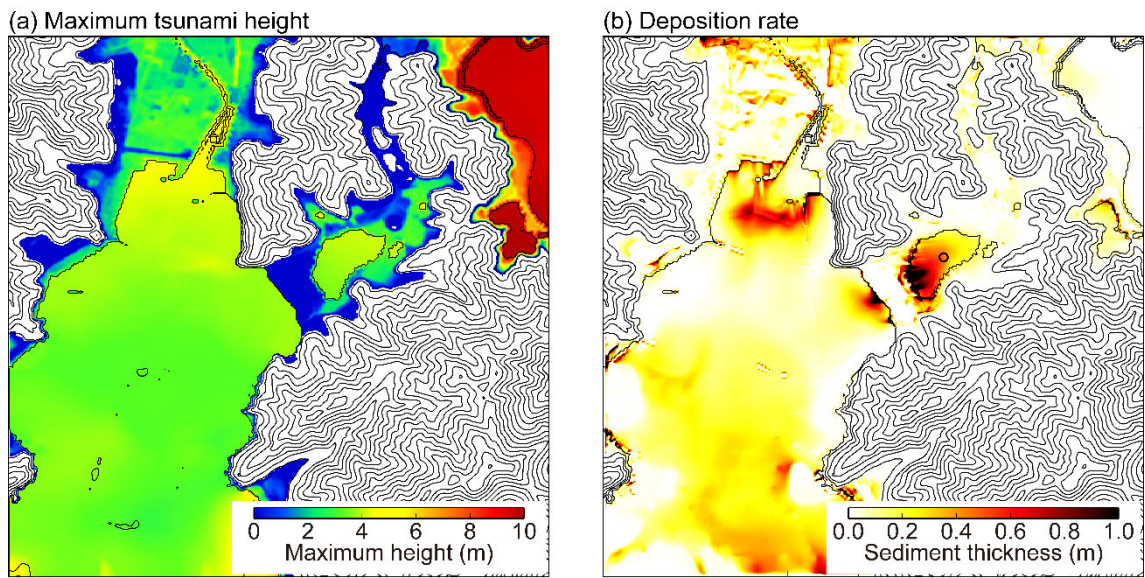


図 2 - 3 - ④ - 2 三重県南伊勢町こがれ池における最大津波高分布と土砂の堆積量分布。

3) 静岡県湖西市白須賀

地震発生から3時間後までに最大6.8 mの津波が来襲し、少なくとも6度浜堤を乗り越えて白須賀低地に侵入した。土砂の堆積量は地震発生からおよそ120分後に到達する第一波による寄与が最も大きい。地震発生から3時間後には50 cmを超える土砂が低地に堆積した(図2-3-④-3)。Komatsubara et al. (2008)¹⁰⁾の調査報告によると白須賀低地における明応東海地震に相当する津波堆積物の堆積層厚は最大50 cmで、計算結果と概ね整合的であった。

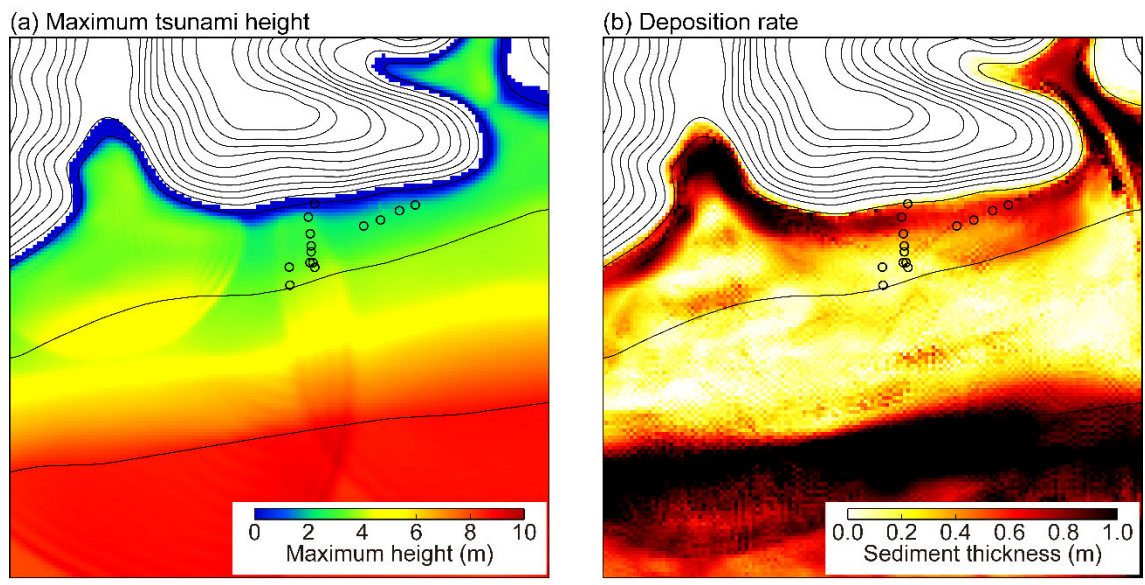


図 2 - 3 - ④ - 3 静岡県湖西市白須賀における最大津波高分布と土砂の堆積量分布。

4) 静岡県焼津市浜当目

地震発生から3時間後までに最大6.5 mの津波が来襲し、少なくとも三度浜堤を乗り越えて浜当目低地に侵入した。土砂の堆積量は地震発生からおよそ10分後に到達する第一波による寄与が最も大きい。地震発生から3時間後にはおよそ40 cmの土砂が池内部に堆積した(図2-3-④-4)。一方、堆積物コアの明応東海地震に相当する津波堆積物の堆積層厚は最大35 cmで⁸⁾、計算結果と概ね調和的であった。

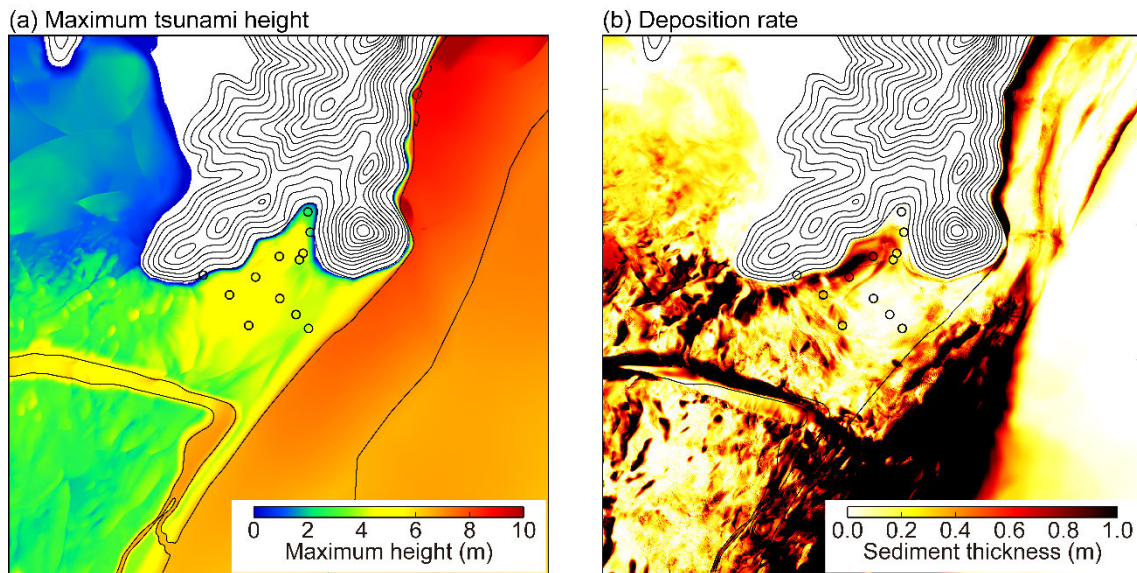


図2-3-④-4 静岡県焼津市浜当目における最大津波高分布と土砂の堆積量分布。

5) 静岡県沼津市井田

地震発生から3時間後までに最大8.7 mの津波が来襲し、繰り返し浜堤を乗り越えて井田低地に侵入した。土砂の堆積量は地震発生からおよそ60分後に到達する後続波による寄与が大きい。堆積と浸食を繰り返して、地震発生から3時間後にはおよそ4 cmの土砂が低地内に堆積した(図2-3-④-5)。Sawai et al (2016)¹¹⁾の津波堆積物調査の結果によると、井田低地では明応東海地震に相当する津波堆積物は見つからない。しかしながら、井田低地の周辺では10 mを超える津波痕跡が多数確認されており浜堤を乗り越えないほど津波が小さかったとは考えにくい。津波堆積物が地層に保存されていない原因として以下の二つの可能性が挙げられる。一つは数cmオーダーの砂質な津波堆積物が生物擾乱や人工改変で失われた可能性、もう一つは地震発生当時の浜堤が現在と同じ巨礫から構成されていて土砂輸送そのものが発生しなかった可能性である。前者は明応東海地震に相当する層準を詳細に分析することで、後者は津波堆積物そのものが残っていないため検証が困難である。

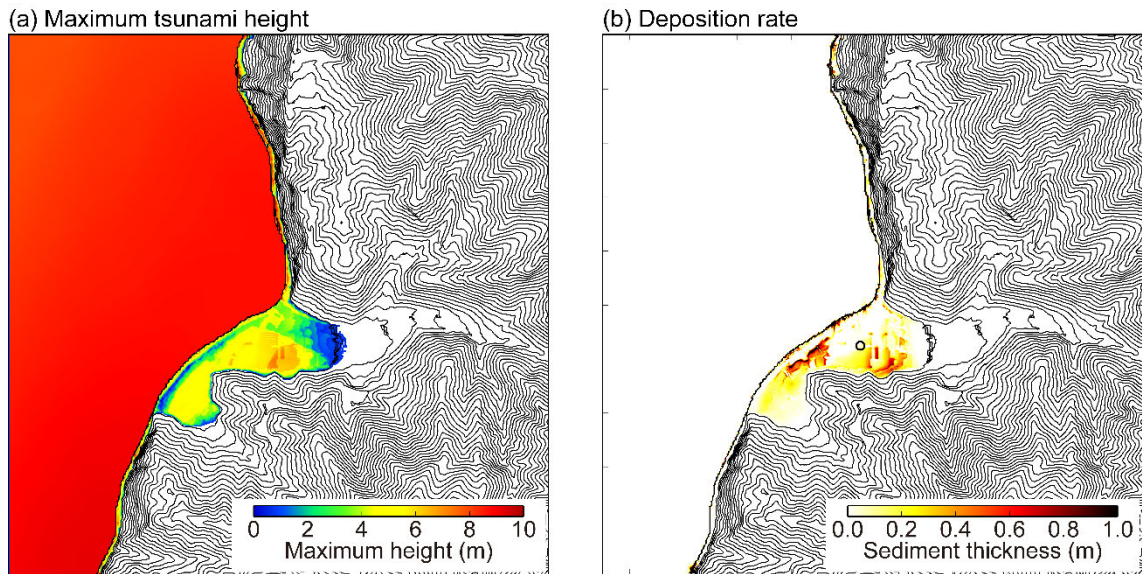


図 2 - 3 - ④ - 5 静岡県沼津市井田における最大津波高分布と土砂の堆積量分布。

(c) 結論ならびに今後の課題

以上の検証から、明応東海地震は東海セグメント領域に大きな滑りを持つ M_w 8.6 の巨大地震だったと推定される。整合性にややばらつきがあるものの、痕跡高は断層すべりによる計算津波高でおおむね説明できる。しかしながら、周りと比較して突出している三重県鳥羽市国崎 (15 m; 痕跡信頼度 D) に関しては過小評価となる。これはリアス式海岸の影響で局所的に津波が大きくなった、もしくは海底地すべりに伴って局所的に高い津波が発生した可能性がある。

三重県南伊勢町こがれ池・静岡県湖西市白須賀・静岡県焼津市浜当目・静岡県沼津市井田における津波堆積物の数値再現および津波堆積物調査に基づいた観測事実との比較による明応東海地震津波波源モデルの検証を行った。白須賀や浜当目の津波堆積物の最大層厚はおおむね再現できるものの、こがれ池や井田に関しては計算堆積層厚が観測より大幅に過大評価となった。これは地震発生当時の浜堤の高さが不確実さを伴うこと、津波土砂移動数値計算で使用している砂の中央粒径が現実に即していないことに起因すると考えられる。今後計算シナリオを増やして現実に即した形で検討を進める。

(d) 引用文献

- 1) Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. (1983) Optimization by simulated annealing, *Science* 220, 671-680.
- 2) Imai, K., Okada, S., Takahashi, N., Ebina, Y., Tsuji, Y. (2020) Fault Model of the 1804 Kusakata Earthquake (Akita, Japan). *Seismological Research Letters*, 91, 5, 2674-2684.
<https://doi.org/10.1785/0220200074>
- 3) 安中正・稲垣和男・田中寛好・柳沢賢(2003)津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴, 第 27 回地震工学研究発表会梗概集.

- 4) 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔 (1999) 掃流砂層・浮遊砂層の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 46, 606-610.
- 5) Sugawara, D., Yu, N. T., Yen, J. Y. (2019) Estimating a Tsunami Source by Sediment Transport Modeling: A Primary Attempt on a Historical/1867 Normal - Faulting Tsunami in Northern Taiwan, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 124, 1675-1700.
<https://doi.org/10.1029/2018JF004831>
- 6) 東北大学、原子力安全基盤機構: 津波痕跡データベース、<https://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/tsunami/>
- 7) 阿部郁男 (2017) 駿河湾内の津波痕跡に着目した 1498 年の明応東海地震の津波波源の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_301—I_306, 2017.
https://doi.org/10.2208/kaigan.73.I_301
- 8) Kitamura, A., Yamada, K., Sugawara, D., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Hamatome team (2020) Tsunamis and submarine landslides in Suruga Bay, central Japan, caused by Nankai-Suruga Trough megathrust earthquakes during the last 5000 years, Quaternary Science Reviews, 245, 106527. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106527>
- 9) Shimada, Y., Sawai, Y., Matsumoto, D., Tanigawa, K., Ito, K., Tamura, T., Namegaya, Y., Shishikura, M., Fujino S. (2023) Marine inundation history during the last 3000 years at Lake Kogare-ike, a coastal lake on the Pacific coast of central Japan, Progress in Earth and Planetary Science, 10:49, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00577-9>
- 10) Komatsubara, J., Fujiwara, O., Takada, K., Sawai, Y., Aung, T. T., Kamataki, T. (2008) Historical tsunamis and storms recorded in a coastal lowland, Shizuoka Prefecture, along the Pacific Coast of Japan, Sedimentology, 55, 1703-1716.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00964.x>
- 11) Sawai, Y., Tanigawa, K., Tamura, T., Namegaya, Y. (2016) Medieval coastal inundation revealed by a sand layer on the Ita lowland adjacent to the Suruga Trough, central Japan. Natural Hazards 80, 505-519.
- 12) 村山祐司監修 (2015) 『デジタル伊能図プロフェッショナル版』, 河出書房新社
- 13) 楠本聡・今井健太郎・堀高峰 (2023) 明応東海地震の初期津波波源モデルの再検討, 日本地震学会 2023 年秋季大会, S17P-05.
- 14) 相田勇 (1978) 1978 年宮城県沖地震に伴った津波の数値実験, 地震研究所彙報, 53, 1167-1175.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
2011年東北地方太平洋沖地震の津波浸水高・津波堆積物の堆積層厚分布から推定される初期津波波源モデル（口頭）	楠本 聡 今井 健太郎 堀 高峰 菅原 大助	日本地球惑星科学連合 2023 年大会	2023.5	国内
宝永地震による地殻変動と津波痕跡の再整理（口頭）	今井健太郎 都司嘉宣 楠本聡 堀高峰	第40回歴史地震研究会	2023.9	国内
津波痕跡高から推定される1498年明応東海地震の初期津波波源モデル（口頭）	楠本聡 今井健太郎 堀高峰	第40回歴史地震研究会	2023.9	国内
明応東海地震の初期津波波源モデルの再検討（口頭）	楠本聡 今井健太郎 堀高峰	2023年度津波堆積物研究会	2023.10	国内
明応東海地震の初期津波波源モデルの再検討（ポスター）	楠本聡 今井健太郎 堀高峰	日本地震学会秋季大会	2023.10	国内
津波痕跡から推定される1498年明応東海地震の初期津波波源モデル（口頭）	楠本聡 今井健太郎 堀高峰	巨大津波災害に関する合同研究集会	2023.12	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Sensitivity of slip distribution on tsunami trace heights and geological evidences: a case study of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (査読有り)	Satoshi Kusumoto Kentaro Imai Takane Hori Daisuke Sugawara Kenji Satake	Progress in Earth and Planetary Science	2023.8	国外（国際誌）

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし