

公益財団法人国土地理協会第24回学術研究助成（2024年度）

研究成果報告書

課題名

琵琶湖水中遺跡の調査から壊滅的地震地盤災害のメカニズムを探る

研究組織

山崎 新太郎（代表，京都大学防災研究所）

銭 玉（京都大学大学院理学研究科）

中川 永（豊橋市美術博物館）

谷川 亘（海洋開発研究機構）

山本 裕二（高知大学海洋コア国際研究所）

1. はじめに

沿岸域が地震によって大規模に喪失する事例に関しては世界中で知られているが、痕跡が急速に失われたりして調査をする機会が乏しい、一方で、そのような危険な場所の条件を明らかにすることは将来の防災上も重要である。

このような水中遺跡が関連づけられる著名遺跡にジャマイカのポートロイヤル遺跡がある。1692年6月7日にジャマイカの港町ポートロイヤルを襲った大地震（図－1）は、町の約3分の2が数分のうちに海中へ沈降する壊滅的被害をもたらした。当時のポートロイヤルは西インド諸島有数の商都であり、珊瑚砂で形成された砂州の上に繁栄していた。現在では当時の町の遺構が水深数メートルから十数メートルの海底に横たわっている。さらに地震直後には津波も発生したと記録されている。

このような海外の著名事例と同じく琵琶湖湖底に存在する水中遺跡の中には過去の地震災害と関係するものがあることが知られている。

本研究では琵琶湖の水中遺跡において特に、考古学的検討が進んでいる水中遺跡を中心に、その発生条件を地形・地質学的に理解する試みを行なった。以下にその説明を行なう。

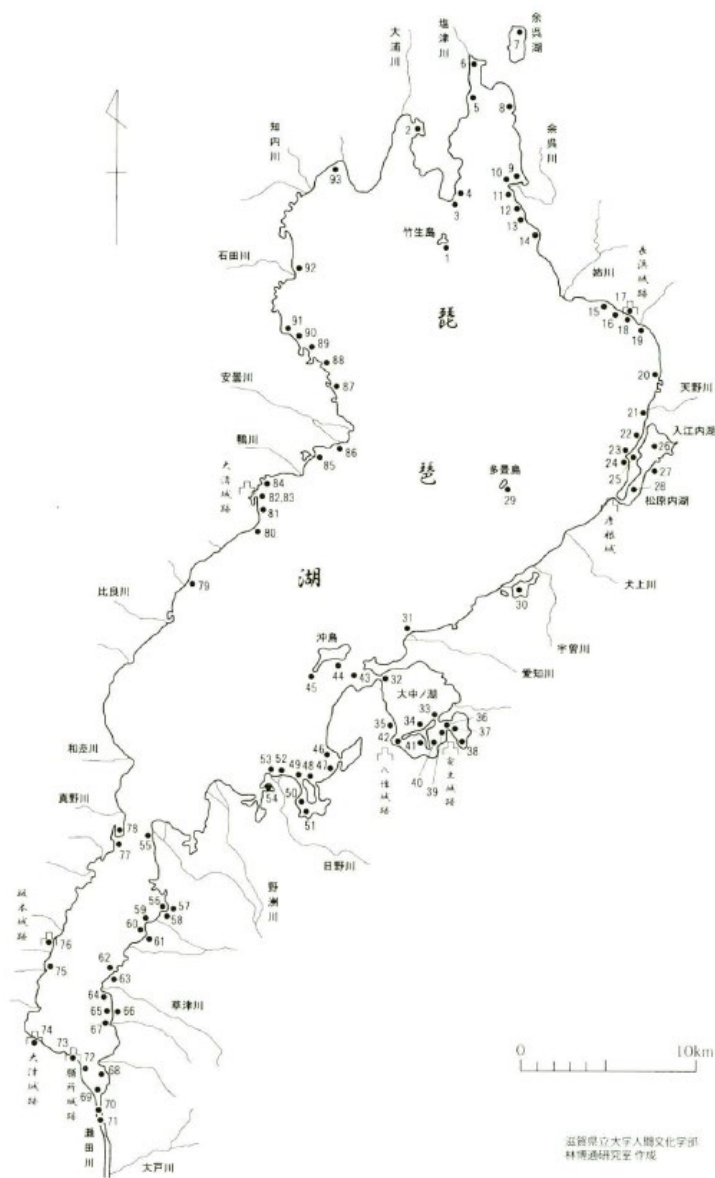


図－1 Jan Luyken による 1692 年ポートロイヤル地震災害の想像図

琵琶湖では、90～100 箇所に及ぶ水中遺跡が確認されている。その研究は古くからあるが、ここでは近年まとまった著書である林ら（2012）から概要をまとめる。なお林らは「湖底遺跡」と呼んでおり、湖底遺跡は、琵琶湖の基準水位（標高 84.371m）より低位に所在するものと定義される。最も古い遺跡は約 9,500 年前の縄文時代早期以降にさかのぼり、琵琶湖が現在の形態をほぼ整えた 1 万 5,000～1 万年前以降に形成されたと考えられる。

湖底遺跡は性格により、以下の区分が認められる。

1. 当時の集落遺構が直接湖底化したケース
（例：赤野井湾遺跡、栗津湖底遺跡ほか）
2. 土器・古銭等の遺物のみ湖底から出土するケース（二次的堆積・祭祀性が示唆される。例：葛籠尾崎湖底遺跡、多景島遺跡ほか）
3. 城郭・港湾遺構などの石垣・構造物が認められるケース
（例：坂本城跡、大津城跡膳所城跡ほか）
4. 村や町が湖底に沈んだという伝承を持つ
「水没村伝承」由来のケース（例：三ツ矢千軒、尚江千軒、下坂浜千軒ほか）



図－2 林ら（2012）による琵琶湖の湖底遺跡の分布

特に、水没村伝承（分類 4）の三ツ矢千軒、尚江千軒、下坂浜千軒の 3 遺跡は、湖水位変動や地盤沈下の可能性から、地震や地盤変動が主因として強く示唆される。

湖底遺跡の成因解明にあたっては、大地震に伴う液状化や地すべり（側方流動）による地盤沈下が主要因として挙げられる。ただし、すべての湖底遺跡についてその成因が完全に解明されているわけではなく、成因解析には課題が残されている。これを検討することが本研究の目的である。

本研究で特に重点的な調査を行なった 2 遺跡の概要は下記の通りである。

● 下坂浜千軒遺跡

下坂浜千軒遺跡は、琵琶湖湖底遺跡の一つで、長浜市下坂浜町の湖岸沖合に分布する（図－3）。当地域の伝承では、集落や寺院（良疇寺、りょうちゅうじ）が大地震によって湖底に沈み、避難民「水上がり」が周辺集落に定着したとされる。湖底地形は遠浅で凹凸が多く、1952 年の水位低下時には木製井戸枠が露出した事例も記録されている。これまで、考古資料・地質資料の分析から下坂浜千軒遺跡の水没は、天正 13 年（1586 年、推定 M7.8）の地震に伴う液状化・地すべりが指摘されている。

その考古調査記録（林ほか、2012）によると、湖底の標高 82m 台に多数の立木根・杭があり、スギ・ケヤキ等の枯れ株の放射性炭素年代は 1460 年～1660 年頃に相当することが判明している。湖岸近くでは 15 世紀～16 世紀の五輪塔礎石があり、湖底面からは 8 世紀後半～9 世紀初頭の土師器も未摩耗の状態で発掘されている。一部の木材には縄文時代よりも古い紀元前 1 万年頃の年代も認められ、これも地盤変動で湖底にもたらされた可能性があることが指摘されている。

なお陸域の地盤調査では、良疇寺の載る砂礫層が湖へ傾斜し、下位の軟弱粘土層の上に載る構造があるとされている。そのため、寺院基礎ごと地すべり（側方流動）が生じ、主要部が湖底に沈降したと推定されている。音波探査では、地すべり特有の流れ山地形があるとされているが、背景地質は流れ山を形成することが困難な軟弱堆積層であり、また解像度も低いために、流れ山状の地形は確定できないように思われ、追加調査が必要であった。



図－3 2025年現在の長浜市下坂浜町沖の状況（空撮）、右端に良疇寺の境内がある。

● 尚江千軒遺跡

尚江千軒遺跡は琵琶湖の湖底遺跡の一つであり、米原市筑摩沖合を中心とする。水没村伝承に関し、「近江坂田郡志」等の古文書には、かつて筑摩北西に尚江村が存在し、正中2年（1325年）の大地震によって集落のほぼ全域が湖底に没したと記されている。湖底には井戸跡が数多く確認されたとの記録や、筑摩神社の鳥居が沖合約800m地点に沈んでいたとの伝承も残されている。筑摩神社所蔵資料「筑摩大神之紀」（1567年成立）には、湖岸線の後退と松原消失が記され、地形変化との関連性が示唆される。

これまでの考古調査の結果、筑摩神社沖地区では湖岸から 277m 付近の湖底（標高 80.06m、水深 4.31m）で石群が発見され、須恵器横瓶の破片（7～8 世紀）や各種土師器も出土した。不定形及び円形土坑も複数確認されている。朝妻湊地区では 11 世紀～14 世紀頃の須恵器・瓦類が湖底微高地で発見され、湖岸沖約 250m 地点（標高 80.291m、水深 4.08m）には 18～19 世紀の矢穴石群が分布していた。

ここでは、限定的な地質学的調査が実施され、陸域の軟弱泥混じり砂層（深度 4m 付近）が著しく液状化強度に乏しいことが判明している。具体的には、正中 2 年（1325 年、M6.5 以上）および文政 2 年（1819 年、M7～7.5）の地震が主要成因と指摘されている。

一方で、古文書記録や水深・探査データには不明確もあり、より高精度の調査が求められてきた。



図-4 2024 年現在の米原市琵琶湖朝妻湊－尚江千軒付近の状況（朝妻湊跡付近から南を望む）。中央左の白いビル付近が筑摩神社である。

本研究では、過去の地震と関連が深いと考えられ、多くの考古調査が残されている
尚江千軒遺跡、下坂浜千軒遺跡のより高い解像度での地形調査、地質構造調査、物理
地質構造探査を実施した。

2. 方法

本研究では以下の3つの手法を用いて徹底分析を行なった。

● GNSS 連動型ソナーによる精密な水底地形マッピング

この方法は音響計測技術と衛星測位システムを統合することにより、水中地形および湖底・海底の地物分布を高精度かつ効率的に把握する手法である。その原理は、魚群探知機やサイドスキャンソナーによって発信された音響波が水底表面で反射する際の伝播時間や反射強度を利用し、水深・底質・地物形状を画像化・数値化することである。特に、GNSS(Global Navigation Satellite System)によるリアルタイムの位置座標取得情報をソナーの計測データと同期させることで、計測した水深および音響画像の情報に緯度・経度のタグを付けて記録可能となり、測点間隔を縮めることで高解像度の地形マップ構築が可能となる（山崎ほか，2013；Yamasaki and Kamai, 2015）。こうした GNSS 連動型ソナー調査は、従来困難であった浅水域・アクセス困難地域の高精度マッピングおよび地質・遺構調査を革新的に実現可能とした技術である。

手法としては、軽量の音響探査機器（例：Lowrance HDS-7 Gen2／HDS-9 Gen2、StructureScan HD サイドスキャン、Airmar B60/P319 トランスデューサー等）やレジャー用魚群探知機を小型ボートや無人艇（ツインハル型クラフトやゴムボート等）へ搭載し、船底に音響センサーを設置する。測線間隔や走行速度は対象水域の水深や地形に応じて調整される。例えば、水深 80 m 以浅なら 455 kHz 高周波による高解像度なサイドスキャン画像取得が有効であり、広域・詳細双方のマッピングが可能となる。

実際の作業は、湖沼や海域において、複数の並行トラックを航走することで音響データと GNSS 位置情報を同時記録し、魚群探知機内蔵の SD カード等に保存する。収集データは ReefMaster Pro や SonarTRX などの専用 GIS 解析ソフトウェアを用いて位置情報と水深・音響画像を同期させた CSV データとして抽出される。これらデータを Kriging 手法などで格子化・補間した上で、Golden Software Surfer や QGIS 等により等深線・三次元地形図、底質分類図、反射強度分布図（E1・E2 指標や PeakSV 指標）として可視化される。底質分類については、反射波形の一次・二次エコー成分から表面粗度・硬度指標を算出し、湖底構造や埋没物体・沈降物の物理特性を把握できる。



図ー5 GNSS 魚群探知機による調査の状況

事例としては，神奈川県芦ノ湖水域（山崎ほか，2013）や相模湾・静岡県根府川沖の水底マッピング（Yamasaki and Kamai, 2015）や福島県桧原湖水中遺構調査（中川ほか，2024）が挙げられ，同システムで，沈水木や埋没構造物，角礫など（直径数十 cm 程度～10 m 級）まで検知に成功している．具体的には，水深 30 m 前後において，GNSS の組み合わせにより 3 m 程度の測位誤差内で位置情報タグ付きの音響イメージが取得され，湖底構造の変化や地質区分も明瞭に反映された地形図が作成されてい

る。さらに、サイドスキャン画像や高解像度音響画像によって、地すべり由来の岩塊分布や、コンクリート遺構・鉄道レールなどの沈降物分布も特定されている。

本研究で用いた機材としては、Lowrance HDS-9 Gen 2, StructureScan LSS-HD サイドスキャン, Airmar B60 トランスデューサー, Point-1 Antenna, 解析ソフトウェア ReefMaster Pro Ver 2, Surfer 12 と Windows PC が主な構成要素である。

● CHIRP サブボトムプロファイラによる水底下地層の音響構造解析

サブボトムプロファイラ (Sub-bottom Profiler: SBP) は、主に水底下の堆積層構造や地盤特性を調査する音響機器である。低周波音波 (数 kHz~十数 kHz) を海底に向けて発信し、その反射波を解析することで、地層境界や堆積物の厚さ、硬さ、さらには埋設構造物の分布などを高分解能で可視化する技術である。SBP は例えば、洋上風力発電基礎や海洋構造物設置時の最適地盤調査、海底ケーブルや配管埋設ルート選定、海底地すべりや軟弱地盤リスク評価、海底下に埋没した考古学的遺物や人工構造物の探索などである。

SBP は音響測深原理に基づき、トランスデューサーから低周波のパルス音波を海底直下に向けて発信する。音波が地層や構造物の境界で反射し、返ってくるエコー信号をリアルタイムで解析し、地層断面図として可視化する。周波数が低いほど音波はより深く浸透し、厚い堆積層や岩盤との境界も把握可能となる。現在では、複数の周波数帯の音波を利用したパラメトリック方式や時間変化して周波数が変化する音波を用いた CHIRP 方式などがあり、分解能が飛躍的に高まっている。

本研究で利用した米国 SyQuest 社の Bathymetry-2010PC は、高解像度 CHIRP 方式を採用したサブボトムプロファイラであり、湖沼および海底における堆積層構造や地質状況の調査に広範に用いられている。本機は、トランスデューサーから 3.5kHz 等の低周波音波を発射し、音波が水底や底質内部の地層界面に反射する現象を利用して、海底下断面情報を取得する原理に基づいている。特筆すべきは、前述した CHIRP

(Compressive High-Intensity Radar Pulse) 方式を導入しており、周波数を連続的に変化させた広帯域 FM パルスを送信し、受信波形と送信波形の相関 (マッチドフィルタ) 処理を行うことで、高い層序分解能と深部浸透力を兼備している点にある。さらに、底層反射信号には BT-TVG (bottom-triggered time varied gain) を適用し、深部層や底質性状の差異も強調し得る。

本研究で利用した Bathymetry-2010PC の構成とスペックは以下の通りである。トランスデューサー (TR-109)、対応水深 2.5~5000m、最大 100m (海底下) までの探査深度

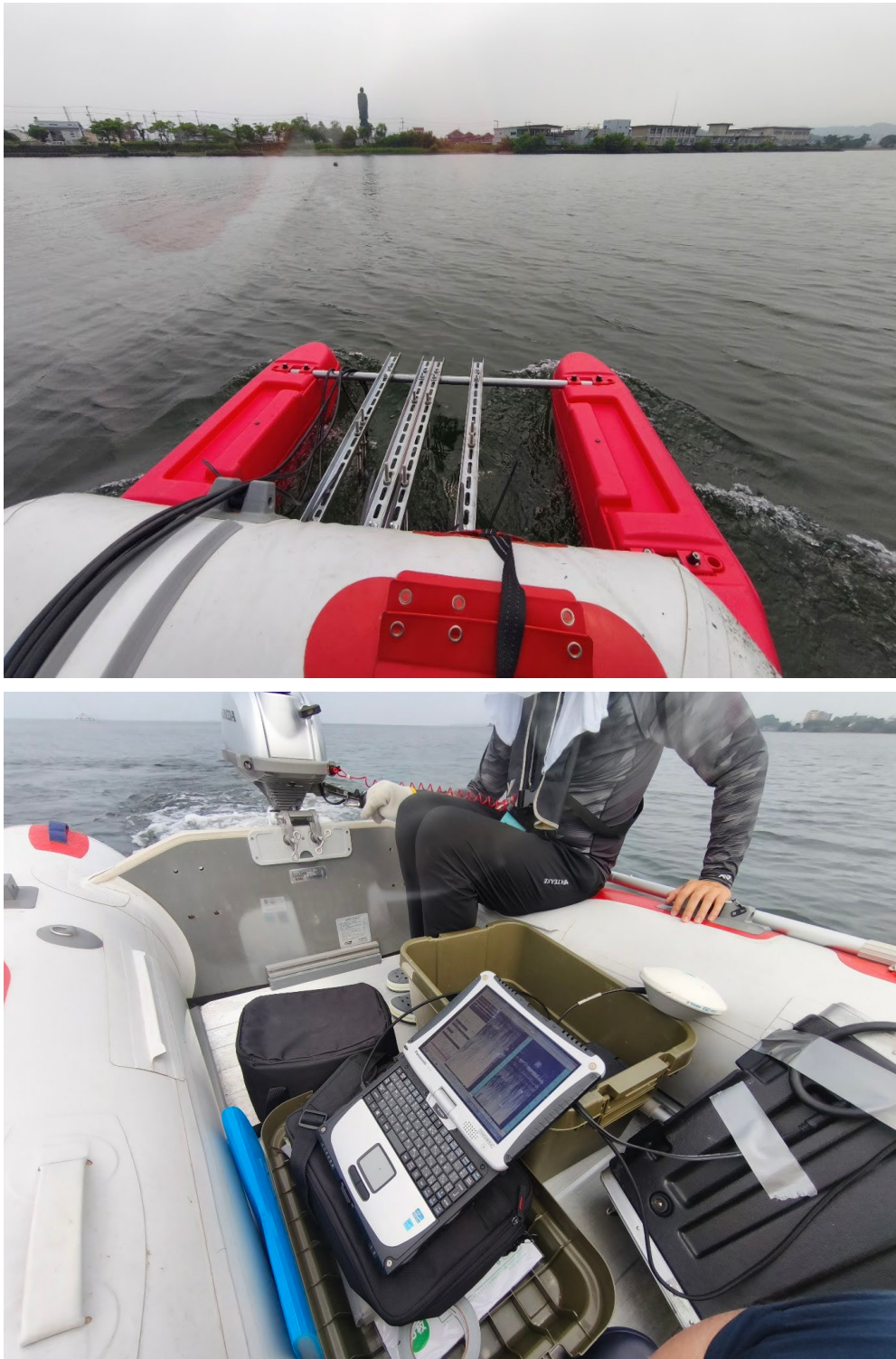


図-6 Bathy-2010PC による調査状況

を有する。中心周波数 3.5kHz, 垂直分解能は 6cm. 同機は Windows PC 上で動作する。ナビゲーションとして TRIMBLE 社の SPS351 DGPS/ビーコン受信機を用いた, この精度は 1m 以下である。

- 陸上および水底の多チャンネル表面波探査

表面波探査は、地表面上で人工的に発生させた振動により生成される表面波を利用して地盤の S 波速度分布を非破壊で測定する物理探査手法であり、本研究で用いた多チャンネル表面波探査（Multi-channel Analysis of Surface Waves（MASW））は、起振機等を用いて地盤表面に振動を加え、発生したレイリー波等の表面波を複数箇所に設置した受振器で計測することにより、表面波伝播速度の波長依存性（分散特性）を解析する点に特徴がある。表面波は、波長が長いものほど深部へ到達し、各波長ごとの速度分布から地盤断面における硬軟構造を推定可能である。

データ取得後は、分散曲線を抽出し、逆解析手法を用いて二次元の S 波速度分布を導出する。この際の解析結果は、地盤の支持力評価や液状化リスク判定、さらには斜面構造の不安定領域検出等にも活用できる。加えて、舗装面や市街地等従来の屈折法やボーリング調査が困難な環境下でも施工可能であり、調査地点の面的情報取得に優れる。



図－7 陸上表面波探査の状況

本手法の一般的な探査深度は 10～20m 程度であるが、地盤条件、測線長、起振機出力等により最大深度は変動する。軟弱層が深く分布する地域や低速度層の検出を要する対象に特に有効である。

本研究では陸上及び水底でこの調査を実施し、陸上では受振器を 1m ピッチで設置し、カケヤを用いた起震を行なった。水底部では林ほか（2005）に基づき、2 m ピッチで設置された受振器を持つハイドロフォンケーブルを利用し、さらに金属製のパイプで水底に衝撃を発生することで起震を行なった。



図-8 水中表面波探査の状況，下がハイドロフォンの施設作業

4. 結果と考察

ここでは、以上の実施調査ごとに結果を示し、現時点での簡単な考察を述べていくことにする。

● 下坂浜千軒遺跡付近の地形

図-9 に示すのは、長浜市下坂浜町沖において GNSS 連動型ソナーによって計測した、測線（黒線）であり、これらの測線沿いで取得した測深データによる地形図が、図-10 である。作業時間は2日間にわたり合計6時間であった。



図-9 下坂浜千軒遺跡周辺の GNSS 連動ソナーの調査測線

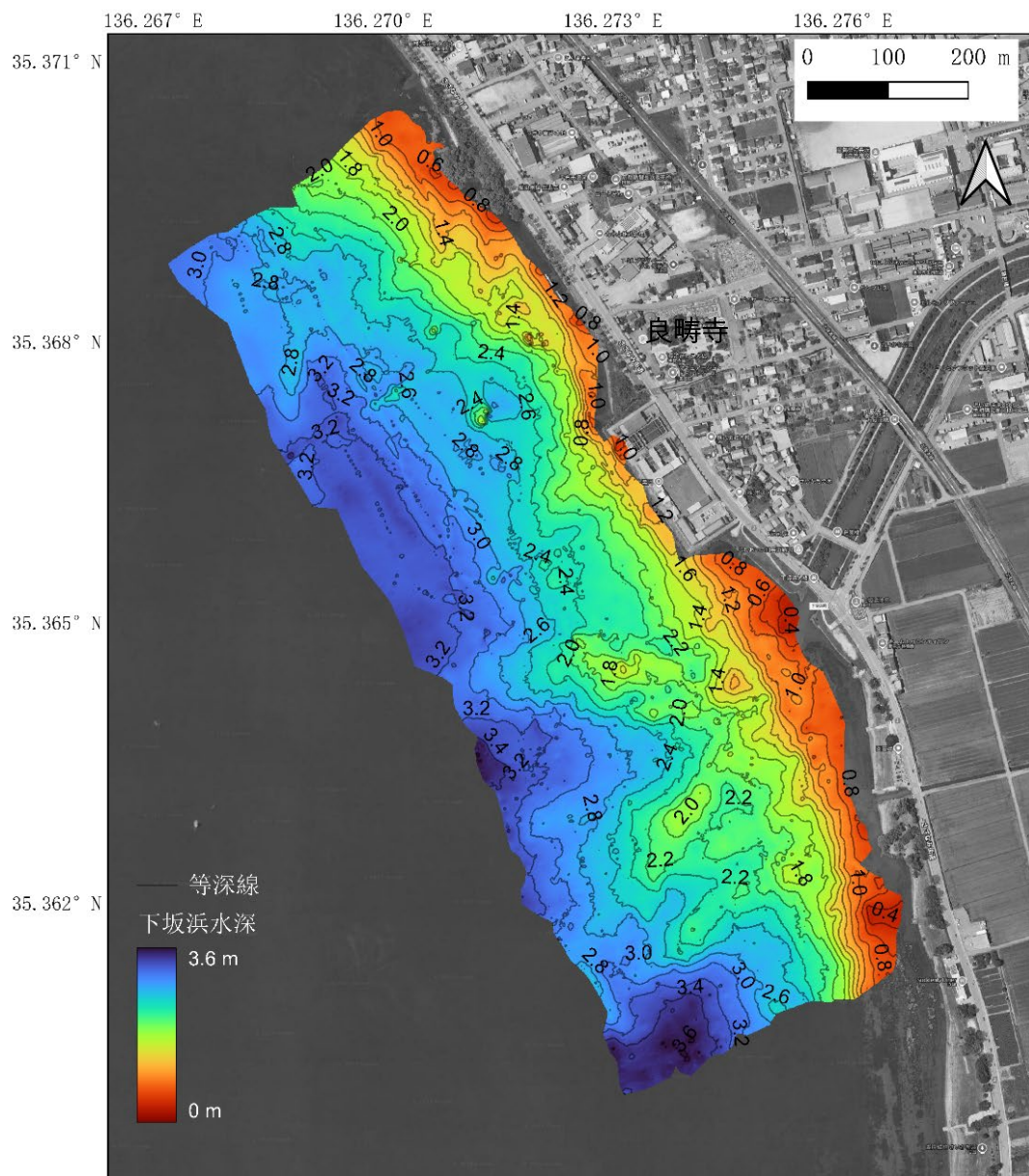


図-9 下坂浜千軒遺跡周辺の GNSS 連動ソナーによって作成した地形図

全体的な地形としては、沖合 300m でも水深 3m 程度と遠浅の地形であることが判明したが、特に沖合 50m 以降にかけて、水深 1m から 2m に比較的急に水深が変化する領域がある。それよりも沖合は緩やかに地形が変化する。注目すべきは緩やかな尾根状または湾状の地形が数多く水没していることであり、このような地形は基本的には侵食地形であると推定される。また、寺院が水没したと伝わる良晴寺沖には陸側北東に明確な湾状の地形とやや小丘状の地形（水深 2.4m）が存在する。

- 下坂浜千軒遺跡付近の SBP 音響地質構造

ここでは下坂浜千軒遺跡付近で取得した SBP による音響地質構造を紹介する。

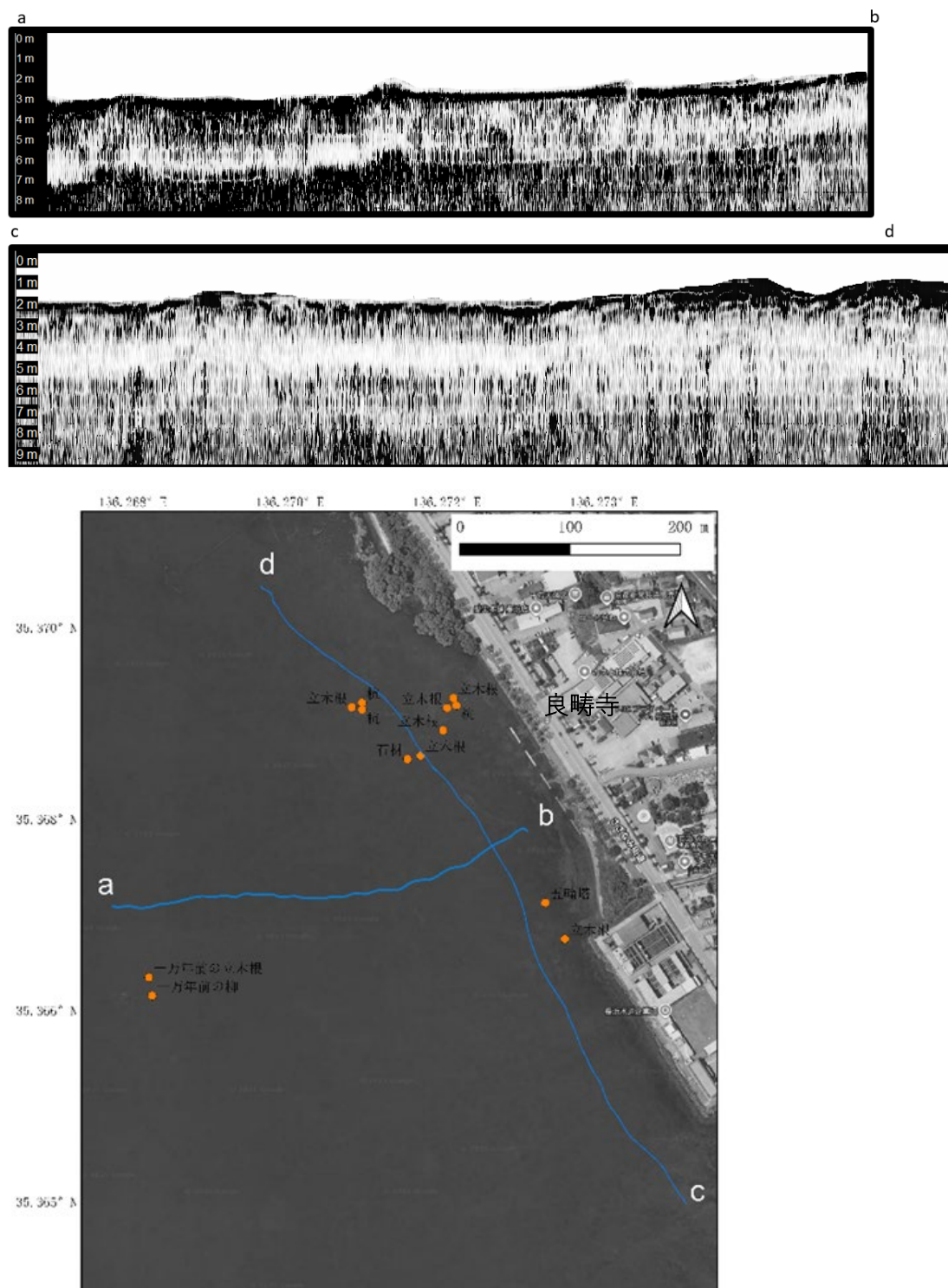


図-10 下坂浜千軒沖で取得した SBP による音響地質構造。上図の記号はそれぞれの下図の位置に対応する。下図のオレンジの点は既発見の遺構や樹木である。

図-10 の a-b の側線は、良疇寺沖の湾状の地形と小丘を通過するように設定したものである。この断面の解釈には、地質データを併せて検討する必要があるが、水底下 0.5m 以下の地層には乱れがあることが示唆される。今後遺跡の分布とも併せて検討予定である。

● 下坂浜千軒遺跡付近の表面波探査結果

ここでは下坂浜千軒遺跡付近で取得した多チャンネル表面波探査結果を紹介する。

図-11 がその結果であるが、陸上部で取得した zm および zl 測線ではいずれも地下 4m から 5m 付近にかけて、S 波速度の小さな領域があることが判明した。そのような低速度層は水中部分である zm' および zl' 測線でははっきりしないが、zl' 測線は zm' 測線に比べて比較的深部まで低速度域が広がっていることが判明した。

以上の結果から、下坂浜千軒遺跡付近には、これまでに水底が繰り返し侵食されたと考えられる地形、それに対応する乱れた地質構造、遺跡に接続する陸上部の地下に脆弱な地質構造などが存在することが明らかになった。

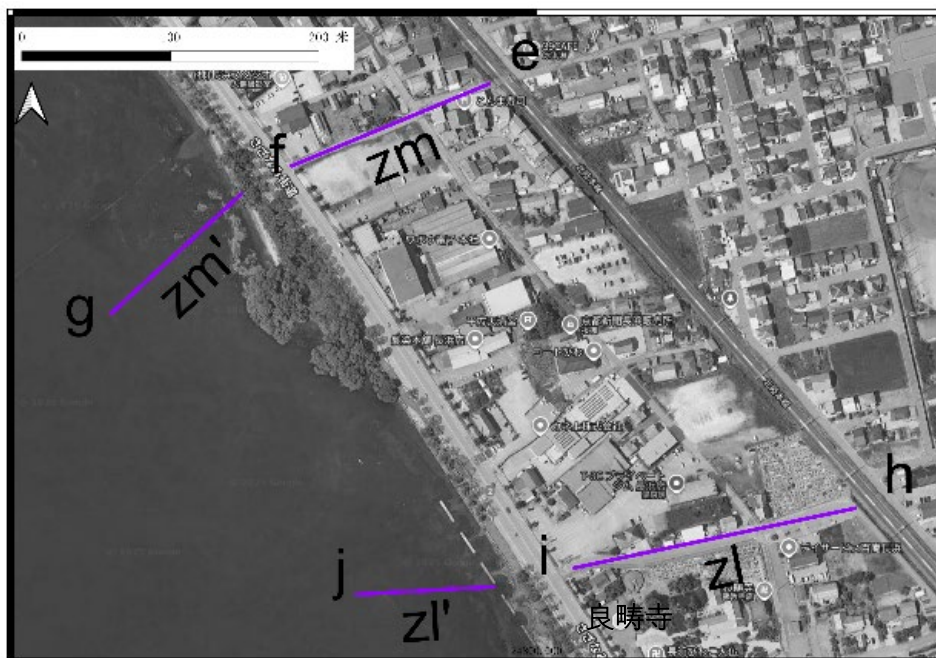
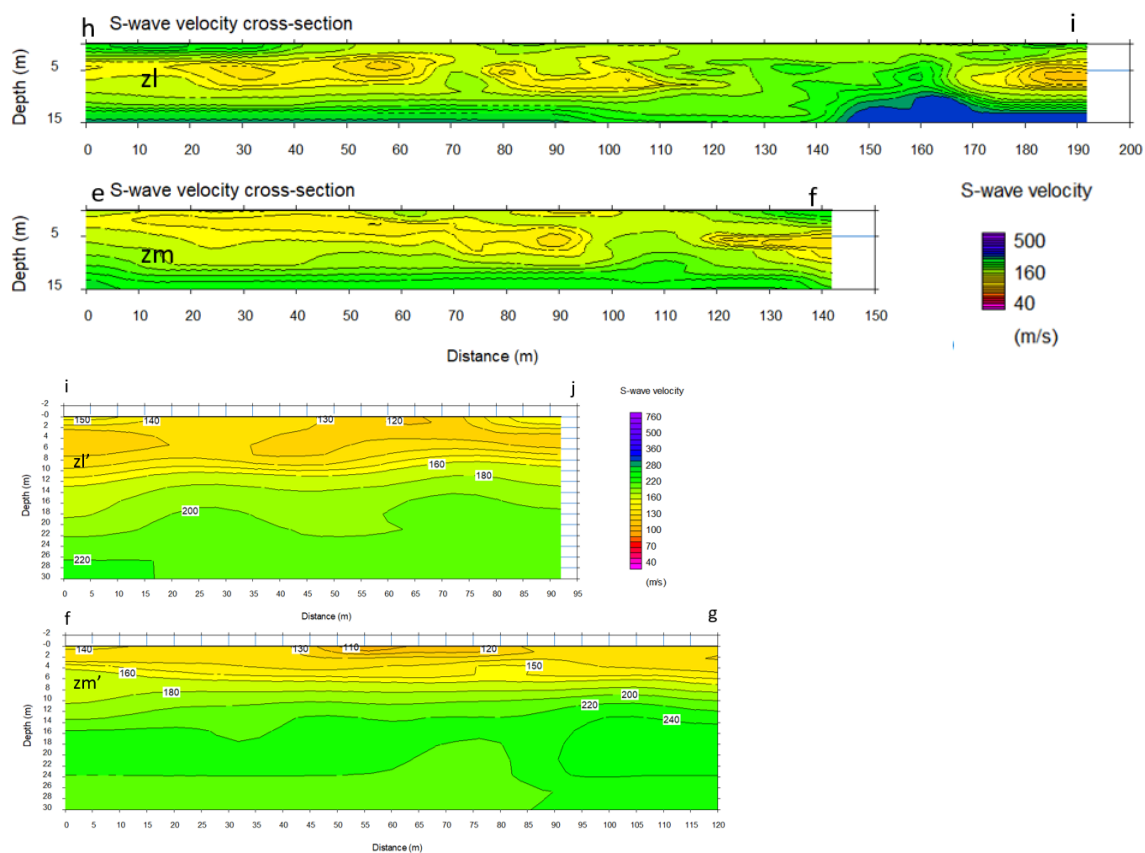


図-11 下坂浜千軒沖で取得した多チャンネル表面波探査結果. 上図の探査断面図は下図に位置が示されている.

- 尚江千軒遺跡付近の地形

図-12 に示すのは、米原市尚江千軒沖において GNSS 連動型ソナーによって計測した、測線（黒線）と測線沿いで取得した測深データで作成した地形図である。作業時間は合計約 3 時間である。

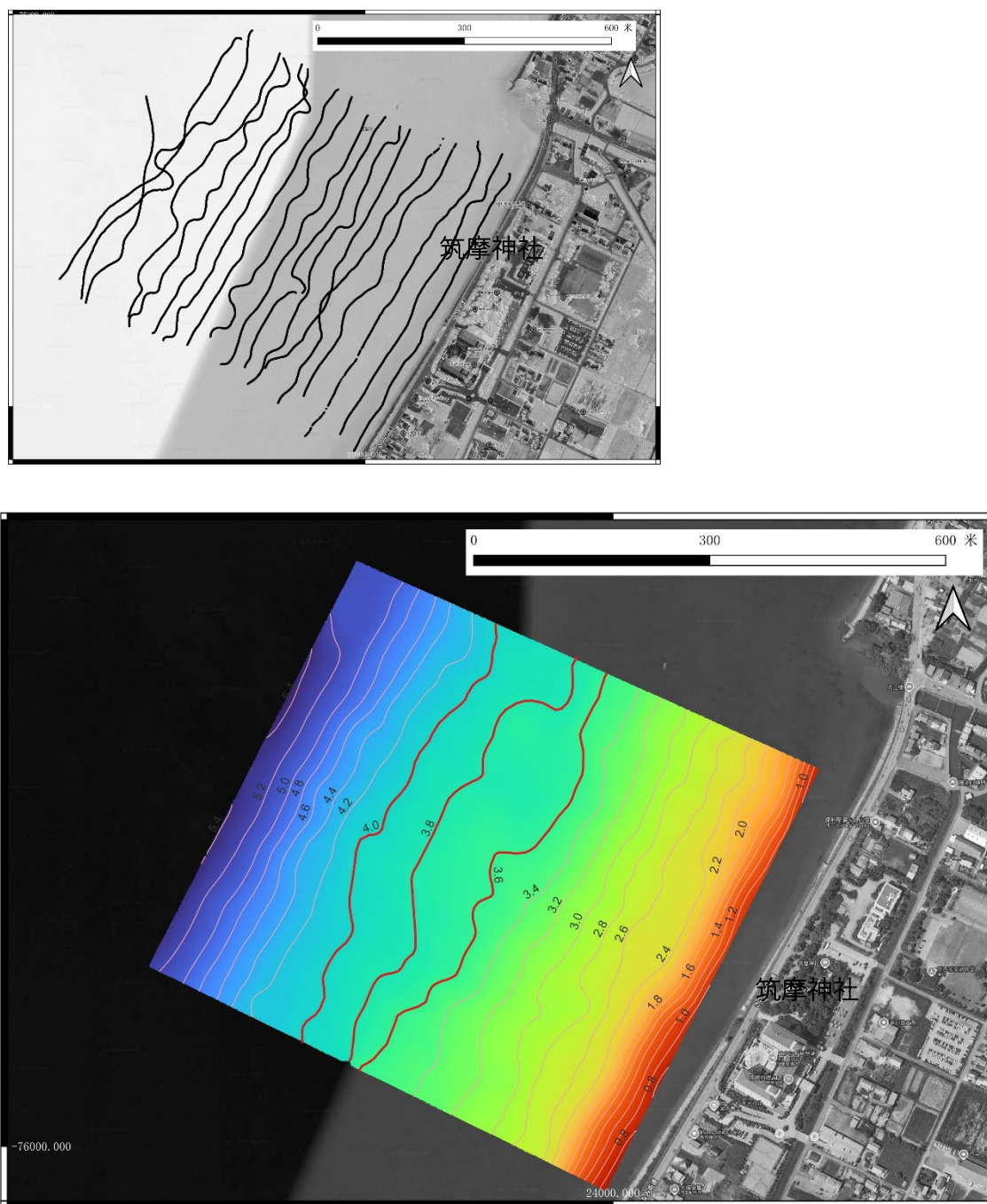


図-12 尚江千軒周辺の GNSS 連動ソナーの調査測線（上図）と作成した地形図

水没したとされる筑摩神社沖の水域では、明確な沿岸域の地すべり様の変形は認められないものの、水中部分に水底地すべりの可能性を示唆させる舌状の地形が検出できた

- 尚江千軒遺跡付近の SBP 音響地質構造

ここでは筑摩神社沖付近で取得した SBP による音響地質構造を紹介する。

ここで実施した音響地質構造では、水底下 2m 下に断片的な強反射層が得られた。これらの地層は水底地すべりの可能性がある。具体的な地層の解明が待たれる。

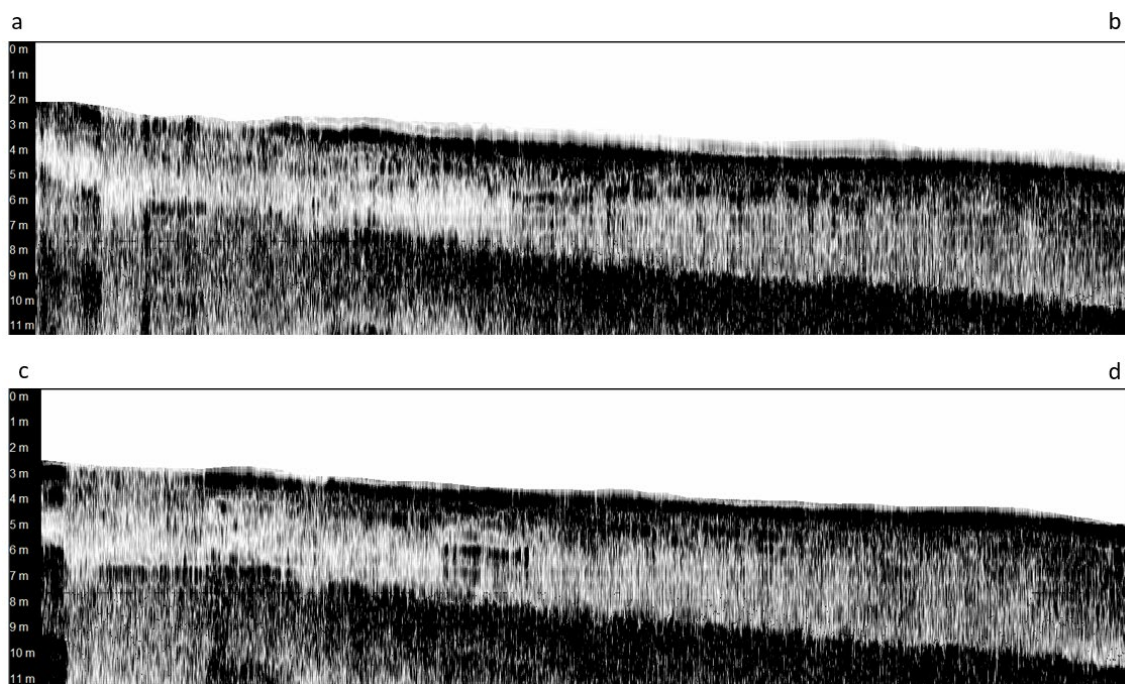
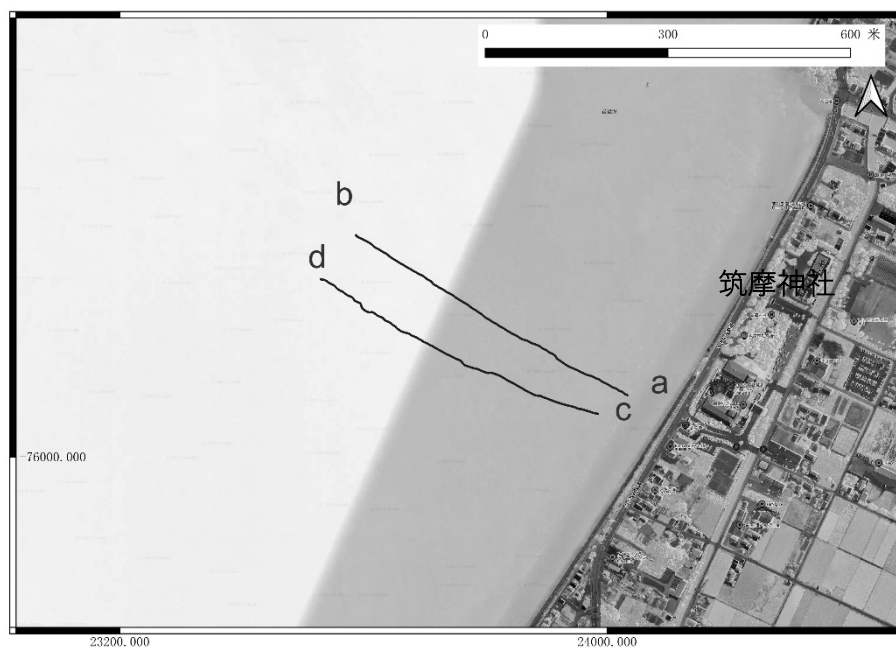


図-13 筑摩神社沖で取得した SBP による音響地質構造. 上図の記号はそれぞれ
の下図の位置に対応する.

5. まとめ

本研究では琵琶湖の水中遺跡の中で特に、地震災害によって水没した可能性が高いことが考古資料や歴史資料から示唆される2遺跡（下坂浜千軒遺跡・尚江千軒遺跡）の地形学的・地質学的・地盤工学的調査を実施した。

得られたデータでは両水中遺跡で、過去に湖底の攪乱が生じた可能性を示唆するものであり、なおかつ、特に尚江千軒遺跡の陸上部では脆弱な地質構造が地下に存在している可能性が示唆された。本研究期間内には実現できなかったが、今後陸上サンプリング、強度調査などを通じて物理探査データを材料強度の実測データまたは地質サンプリングを行なうことで実態の解明を実施したいと考えている。

引用文献

- 林 博通 (2012) 地震で沈んだ湖底の村: 琵琶湖湖底遺跡を科学する. サンライズ出版, p. 137.
- 山崎新太郎, 原口 強, 伊藤 陽司 (2013): レジャー用魚群探知機を利用した水底地形調査, 応用地質, 54(5) 204-208.
- Yamasaki,S., Kamai,T. (2015):A novel method of surveying submerged landslide ruins: Case study of the Nebukawa landslide in Japan. Engineering Geology, 186, 28-33.
- 山崎 新太郎, 松四 雄騎, 片岡 香子, 山口 直文 (2016) 神奈川県・芦ノ湖の湖底調査: 低価格サイドスキャンソナーによる水底調査の試み, 京都大学防災研究所年報, 60, 453-460.
- Yamasaki,S.,Tabusa,T.,Iwasaki, S.,Hiramatsu, M.(2017):Acoustic water bottom investigation with a remotely operated watercraft survey system. Progress in Earth and Planetary Science, 4, Article number 25.
- Yamasaki,S.,Kamai,T.,Watanabe,T.(2021):Geological and seafloor investigations of the cause of partial submergence of Yokoshima Island, Nagasaki, Japan. Engineering Geology, 287, 106108.
- 中川永, 山崎新太郎, 谷川亘, 木村淳, 佐々木蘭貞, 島田章広 (2023): サイドスキャンソナーを用いた水中遺跡調査の実践的取り組み: 桧原宿跡を事例に. 貝塚/物質文化研究会 編, (79), 1-10.
- 林宏一, 藤村尚, 北高穂, 鴨下智裕, 斎藤正徳 (2005): 水底における表面波探査の現場実験, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 112, 141-144

収支報告

旅費 ￥532,266

消耗品費 ￥6,980（船舶燃料用ガソリンなど）

その他 ￥410,754（内訳：倉庫，レンタカー，高速道路通行料金，送料）

取り扱い事務経費 ￥50,000

合計 ￥1,000,000

謝辞

本研究では公益財団法人国土地理協会様には多大なるご支援を頂きました。深く感謝いたします。また、本研究は、京都大学防災研究所教授，林宏一氏，同准教授，土井一生氏，同助教，中山雅之氏，同技術補佐，石井徳幸氏，オーシャンエンジニアリング株式会社北高穂氏に大きな支援を頂きました。