

研究成果報告書

研究課題名：革新的技術を駆使した 2011 年東北沖津波後の
沿岸地形長期変化過程の解明

2023 年 9 月 30 日 提出

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

後藤 和久（代表）

目次

1. はじめに
2. 調査研究手法
 2. 1. 現地調査
 2. 2. 地中レーダー（GPR）を用いた地下構造データの取得
 2. 3. LiDAR 機器を用いた高精度地形測量
 2. 4. 掘削による津波以降の土壌発達過程の追跡調査
3. 結果と予察的考察
 3. 1. 津波による侵食が発生した海岸の現況確認
 3. 2. GPR 探査による地下構造把握
 3. 3. LiDAR 機器を用いた高精度地形測量
 3. 4. 掘削による津波以降の土壌発達過程の追跡調査
4. まとめ

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波（以下、2011年東北沖津波）は、東北地方太平洋側の浅海域を含む沿岸地形を大規模に改変した。震災直後から、津波後の地形回復過程は地形学的な一大課題として認識されてきたが、実態は未解明である。その理由は大きく3つ考えられる。第一に、集中的に研究が行われた仙台湾沿岸部等、被災海岸のほぼ全域に早い段階から大規模復興工事が入ったため、多くの地点で長くても津波後3年程度しか追跡調査ができなかった。第二に、盛んに調査された2010年代半ば頃、空中写真等は活用できたものの調査・解析技術は未発達であり、定量的な検討が十分に行えなかった。第三に、仙台湾など複数の海岸で比較的回復が早かったため、10年以上継続しての長期観測の重要性が十分に認識されていなかった。しかし、津波前の状態に戻っていない、あるいは別の定常状態に落ち着いた可能性のある海岸も多数あり、そこで何が起きているのかを長期的視点に立ち解明することが、津波地形変化の本質を理解するために重要である。

このように、津波地形変化過程の解明には、本来は短期的な研究だけでは不十分であり、10年を超える長期的な地形変化過程を時系列的に調査・解析し、巨大津波の影響が時間とともに地形に刻まれていく過程を明らかにする必要がある。このような地形学的一大課題に対し本研究では、沿岸地形発達過程における巨大津波の短期・長期的影響を解明することを目的とした。特に、東北沖津波後に人工改変が行われていない沿岸部に着目し、ドローン（UAV）、光による検知と測距技術（LiDAR）、地中レーダー（GPR）等の最先端の非破壊かつ超高精度の測量機器や、複数枚の画像から3次元モデルを構成する技術（SfM/MVS）を駆使し、津波前、直後、数年後、現在の沿岸地形を、地中を含め3次元的に高精度復元す

るためのデータを取得した。

本計画は、津波後の長期地形変化を人為的影響の少ない海岸で行うという基礎的な研究の延長上にありながら、LiDAR や地中レーダー等の先端機器を活用し、地表のみならず地中までも探査し、3次元的かつ時系列的に地形変化を追うことで、津波痕跡の地形への保存過程を明らかにしようとするものである。また、本計画で作成する地形モデルは、被災地沿岸部の現在の状態をデータとして後世に記録する意味合いも強い。

2. 調査研究手法

2. 1. 現地調査

宮城県、岩手県、青森県の沿岸部のうち、人為的影響の少ない海岸を対象とした。現地調査では、①津波による侵食が発生した海岸の現況確認、②GPR 探査による地下構造把握、③LiDAR 機器を用いた高精度地形測量、④掘削による津波以降の土壌発達過程の追跡調査、に重点を置き実施した。なお、調査対象地は国立公園あるいは国指定名勝等に指定されている場合があるため、事前に関係機関に確認を行い必要な手続きと許可を得たうえで現地調査を実施した。

以下に、津波による侵食が発生した海岸の現況確認を行った地域を示す。結果については主要な地域を対象に報告する。

青森県八戸市鮫町日蔭沢	大須賀海岸
岩手県久慈市夏井町大崎第 15 地割	
岩手県九戸郡野田村野田第 1 8 地割	十府ヶ浦
岩手県下閉伊郡普代村第 7 地割明神	普代浜海水浴場
岩手県下閉伊郡田野畑村明戸	
岩手県下閉伊郡田野畑村羅賀	平井賀漁港付近
岩手県下閉伊郡田野畑村和野	ハイペ海岸
岩手県下閉伊郡岩泉町小本須賀	小本港付近

岩手県宮古市田老重津部北	青の滝川河口
岩手県宮古市田老重津部	
岩手県宮古市田老乙部野	沼の浜
岩手県宮古市田老和野	
岩手県宮古市田老和野	真崎海岸海浜
岩手県宮古市田老和野	原下展望台付近
岩手県宮古市田老越田	沢尻海岸
岩手県宮古市田老西向山	
岩手県宮古市崎山第 4 地割	松月海岸
岩手県宮古市崎山第 4, 6 地割	女遊戸海岸
岩手県宮古市崎山第 3 地割	中の浜
岩手県宮古市重茂第 2 3 地割	荒巻浜
岩手県宮古市重茂第 1 0 地割	姉吉海岸
岩手県下閉伊郡山田町山田第 2 地割	
岩手県下閉伊郡山田町船越第 7 地割	浦の浜海水浴場
岩手県下閉伊郡山田町船越第 1 0 地割	
岩手県下閉伊郡山田町船越第 1 8 地割	小谷鳥海岸

岩手県上閉伊郡大槌町吉里々々第13地割	浪板海岸
岩手県上閉伊郡大槌町吉里吉里	吉里吉里海岸
岩手県釜石市片岸町第10地割	
岩手県釜石市唐丹町小白浜	唐丹漁港付近
岩手県釜石市唐丹町片岸	片岸漁港付近
岩手県釜石市唐丹町下荒川	荒川漁港付近
岩手県大船渡市三陸町吉浜沖田	吉浜海水浴場
岩手県大船渡市三陸町越喜来沖田	越喜来漁港付近
岩手県大船渡市三陸町綾里白浜	野々前漁港付近
岩手県大船渡市赤崎町合足	合足漁港付近
岩手県大船渡市末崎町石浜	
岩手県大船渡市末崎町大田	門の浜漁港付近
岩手県陸前高田市広田町前花貝	広田海水浴場
岩手県陸前高田市広田町天王前	田谷海岸
岩手県陸前高田市小友町三日市	小友浦海岸
岩手県陸前高田市気仙町砂盛	高田松原海水浴場
宮城県気仙沼市唐桑町竹の袖	大沢漁港付近

宮城県気仙沼市外畑	田中浜
宮城県気仙沼市中山	小田の浜
宮城県気仙沼市波路上明戸	
宮城県気仙沼市波路上明戸	
宮城県気仙沼市波路上杉ノ下	御伊勢浜
宮城県気仙沼市本吉町野々下	沖の田海岸
宮城県気仙沼市本吉町大谷	三島漁港付近
宮城県気仙沼市本吉町三島	大谷海岸
宮城県気仙沼市本吉町日門	
宮城県気仙沼市本吉町日門	日門漁港付近
宮城県気仙沼市本吉町谷地	赤牛港付近
宮城県気仙沼市本吉町中島	小泉海水浴場
宮城県気仙沼市本吉町今朝磯	二十一浜漁港付近
宮城県本吉郡南三陸町歌津馬場	中山漁港付近
宮城県本吉郡南三陸町歌津大沼	長須賀海水浴場
宮城県本吉郡南三陸町歌津館浜	
宮城県本吉郡南三陸町歌津伊里前	伊里前漁港付近

宮城県本吉郡南三陸町志津川清水浜	清水浜
宮城県本吉郡南三陸町志津川袖浜	サンオーレそではま海水浴場
宮城県石巻市釜谷	
宮城県石巻市尾崎弘象	
宮城県石巻市雄勝町船越荒	荒浜海水浴場

2. 2. 地中レーダー（GPR）を用いた地下構造データの取得

津波による侵食地形は，発災から 10 年以上を経過していることを鑑みると，既に地中に埋没している可能性がある．地中の構造を非破壊で計測する技術として，本研究では地中レーダー（GPR）を用いた．GPR 探査を実施した地域は以下のとおりである．

- 1) 青森県八戸市鮫町日蔭沢の大須賀海岸：2022 年 11 月 14 日
- 2) 岩手県久慈市夏井川河口：2022 年 11 月 15 日
- 3) 宮城県仙台市若林区蒲生干潟：2022 年 11 月 16 日
- 4) 宮城県仙台市若林区荒浜沿岸部：2023 年 5 月 30 日，31 日

用いた機種は，GSSI 社製の SIR-4000 で，アンテナの周波数は 400MHz である．同機種は，これまでにも申請者らによる調査研究で活用され，砂丘や平野等での地下数 m までの浅部の構造を計測するのに適している（例えば，Takeda et al., 2018）．

ただし、同機種は GNSS 機器を搭載していないため、別途 GNSS 機器を用意して接続する必要がある。これまでは、GPR のデータ収集装置に GNSS 受信機を一台接続し、単独測位により位置情報を取得していた。この方法は、受信機一台で複雑な事前設定なく実施できることから簡便である。今回の調査の一部地域でも、この方法により位置情報を取得している。ただし、GNSS 受信機の単独測位の精度上、10 m 程度の誤差が生じる場合がある（ただし、実用上は水平測位についてはそれほど大きな誤差は出ない一方、水平位置より標高値のほうが誤差が出やすいという問題がある）。そのため、精度の高い標高値についての位置情報データを得たい場合は、高精度の地形データ（国土地理院の基盤地図情報や、UAV による測量結果など）を用いて、測位結果の標高値を補正する必要があった。

近年では、安価かつセンチメートルオーダーの高精度 GNSS 測量を実施することのできる機器が販売されており、こうした機器を用いれば、GPR の位置精度を格段に向上させることができる可能性がある。そこで本研究では、GNSS 測量機器として Drogger（ビズステーション（株）社製）を導入し、GPR の高精度位置情報取得を行うこととした。具体的な設定方法は以下のとおりである。

1. 必要な機材は次のとおりである。地中レーダー（アンテナおよびデータ収集装置）、接続ケーブル、Drogger（本研究では DG-PRO1RWS を用いた）を 2 台、および Drogger の操作端末 2 台、そしてモバイルデータ通信が可能な環境である。
2. 実際の作業手順は次のとおりである。

① 基準局となる点の準備：

基準局となる点は、位置・標高とも事前に定めておく必要がある。測量地点の近くに三角点などの基準点があればそれを活用すればよいが、多くの場合は現地調査においてこのような基準点が近くにあるとは限らない。基準点が周辺にない場合は、スタティック測量により座標を決定した場所を基準局にできる。スタティック測量を行い基準局を定めるために、DG-PRO1RWS を 1 台設置し基準局として動作させる。

② 機器の接続

まず GPR のアンテナとデータ収集装置を接続する。続いて、データ収集装置と GNSS 操作 Android 端末をシリアルケーブルで接続する。DG-PRO1RWS と Android 端末の接続は無線 (Bluetooth) で行う。データ収集装置に接続した Drogger (DG-PRO1RWS) は移動局となる。基準局と移動局間の通信はインターネットを介して行われるため、モバイルデータ通信環境が必要となる。

③ 探査

上記の接続によりデータ収集装置で位置情報を受信することができる。この状態で位置情報を受信しながら GPR 探査を行うことで、高精度位置情報が付与された探査データを取得することができる。

この手法では測位に単独測位ではなく RTK-GNSS (誤差約数 cm) を導入することによ

って、位置情報の精度が飛躍的に高めることができる。RTK-GNSS では、位置の定まった基準局と位置が未知の移動局において同時に GNSS 信号を受信し、両地点で観測された信号を解析することにより未知点の位置を高精度で決定できる（国土地理院ウェブサイト）。ただし、この方法のデメリットとして、位置の確定した既知点を近傍に用意する必要があることと、基準局・固定局間の通信が必要であるため、モバイルデータ通信が可能な端末が2台必要となり、データ通信ができない環境では本手法を活用することができない。

なお、今回の手法の開発前の GPR 探査では、従来通り地理院地図または UAV 等による測量結果をベースとして標高値の補正を行った。取得したデータは、REFLEXW ソフトウェアにより解析を行った。

2. 3. LiDAR 機器を用いた高精度地形測量

LiDAR は近年急速に発展している測量技術である。地形測量に LiDAR を用いる最大のメリットは、短時間に広範囲の点群情報を高精度で得ることができることと、森林等の通常の写真測量では DEM の作成が困難な場所でも、植生の被覆度によってはレーダーが地表面に到達するため、DEM を作成しやすいことが挙げられる。LiDAR は、ドローンに搭載するタイプ (ALS)、携帯端末に搭載するタイプ (MLS)、固定式のタイプ (TLS) の3種類に大きく分けられる。

本研究では、ALS および MLS を活用した。用いた機材は、ALS は DJI 社製の MATRICE300RTK に搭載した Zenmuse L1 であり、MLS は GreenValley 社製の GC50 である。ALS は、海岸の地形変化を追跡する目的で、青森県八戸市鮫町日蔭沢の大須賀海岸に

において 2023 年 8 月 10 日に実施した。MLS は、GPR の位置情報補正に活用することを念頭に、岩手県久慈市夏井川河口（2022 年 11 月 15 日）および宮城県仙台市若林区荒浜沿岸部（2023 年 5 月 30 日、31 日）で実施した。

2. 4. 掘削による津波以降の土壌発達過程の追跡調査

2023 年 8 月 11 日に、青森県八戸市鮫町日蔭沢の大須賀海岸において掘削調査を実施した。調査には 60 cm ジオスライサーを利用し、津波浸水範囲内の 10 地点で行った。

3. 結果と予察的考察

3. 1. 津波による侵食が発生した海岸の現況確認

ここでは、特に顕著な特徴が見られた宮城県気仙沼市の小田の浜海水浴場と、岩手県陸前高田市の田谷海岸について報告する。

図1左に、宮城県気仙沼市の小田の浜海水浴場の津波直後（2011年3月撮影）の空中写真を示す。この図から、津波による侵食は砂浜を切る大きく3本のチャネルの形成によって特徴づけられる一方、全体として砂浜が維持されていることがわかる。現在（2023年5月）の空中写真（図1右）と比較をすると、もっとも北よりに形成されたチャネル（黄色矢印）の部分は埋没している一方、中央および南側の侵食箇所は、現在も河川からの淡水の流出により細いチャネルが形成されていることがわかる。中央付近のチャネルおよび北側の黄色の矢印で示した付近の現況を図2に示す。この図から、中央付近には排水路が設けられており、そこから現在も水の流れが確認できる。また、黄色の矢印で示した部分にも、現在は水が流れていないものの細い水路が存在することができた。このように、河川や排水路のように陸上から海へ水が流れる流路が存在し、これに沿って陸上に遡上した津波によりもたらされた海水が海へと排水したことがわかる。

次に、図3に岩手県陸前高田市の田谷海岸の例を示す。2011年3月撮影の画像（図3左）の中で、黄色の矢印で示した部分を見ると、陸地が激しく侵食されている様子を確認することができる。これは、小田の浜海水浴場などとは異なり、陸上に流入した海水が低地に集中し、強く海側へ流れ戻ることにより陸地を侵食したものと推定される。

ここでは2つの海岸を例として示したが、今回の調査の結果、津波による海岸侵食は大

きく4つのパターンに分類できる可能性があることがわかった。今後、津波の波高や地形、砂浜の粒径等をパラメータとして多変量解析を行うことにより、侵食パターンと地形、津波、地質の関係を定量化する予定である。

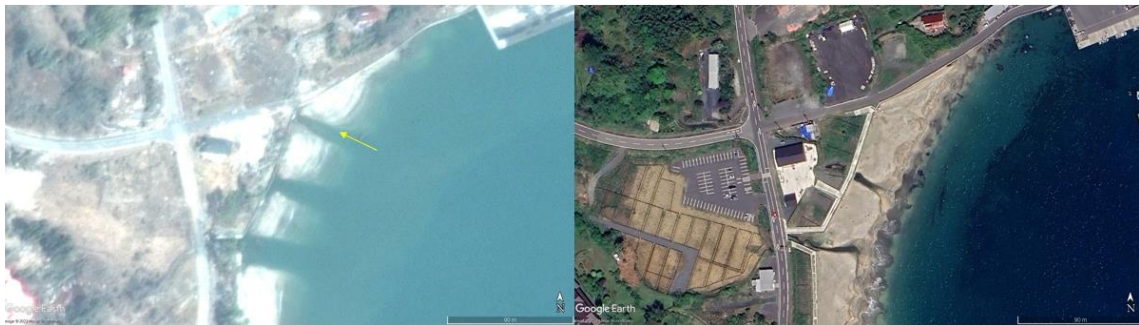


図1 宮城県気仙沼市の小田の浜海水浴場。(左)津波直後(2011年3月撮影)の空中写真。

(右)2023年5月の空中写真。いずれもGoogle Earth画像を使用。



図2 宮城県気仙沼市の小田の浜海水浴場。(左)中央付近のチャンネルが形成された場所の現

況。(右)図1の黄色の矢印付近の水路。



図3 岩手県陸前高田市の田谷海岸. (左) 津波直後 (2011年3月撮影) の空中写真. (右) 最近 (2021年9月) の空中写真. いずれも Google Earth 画像を使用.

3. 2. GPR 探査による地下構造把握

図4 (左) に, 宮城県仙台市若林区の荒浜海岸周辺の津波後の空中写真を示す. 津波により, 砂浜にチャンネル上の侵食痕が形成されていることがわかる. 田中ほか (2013) は, 古地図を解析してこのチャンネルは旧河川の流路にあたることを明らかにしている. また, 田村 (2018) では GPR を用いた探査を行い, 侵食地形の検討を行っている. このチャンネル地形は津波による侵食地形として特徴的なものであることから, 本研究でも GPR 探査の対象とした. 図4 右に, 津波による侵食が生じたライン上の GPR 探査断面図 (上) と侵食が生じなかったライン上の GPR 探査断面図 (下) を示している. これらの比較から, 津波による侵食を受けなかった砂浜は, 海側に傾斜する前浜に典型的な反射面を示すのに対し, 津波による侵食を受け, その後自然/人為的に埋没したチャンネル状の構造上では, 一部に陸側に傾斜する特徴的な反射面が確認された. これは, 埋没した津波による侵食面を見ている可能性がある. また, 八戸市の大須賀海岸においても, 砂に埋没した津波侵食地形を GPR により可視化することができた. このように, 津波による侵食面は津波後に埋積しても, 地中構造

として GPR を用いることで認識できる可能性があることがわかった。

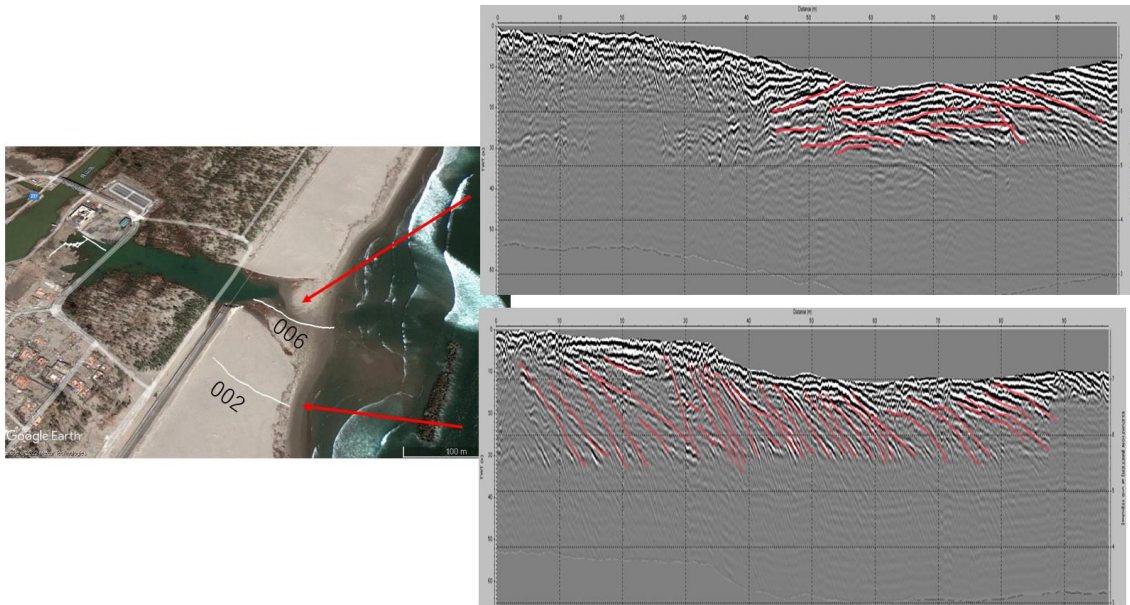


図 4 宮城県仙台市若林区の荒浜海岸周辺の津波後の空中写真（左）。空中写真は Google Earth 画像を使用。右は、2 測線での GPR 地中断面図。図：井村春生氏提供

3. 3. LiDAR 機器を用いた高精度地形測量

図 5 に、2023 年 8 月に実施した八戸市の大須賀海岸での ALS 測量結果を示す。本地域は、砂丘背後に沿岸林が広がる地域であるが、沿岸林の樹木を除去した DEM を作成することができている。これは、樹木が散在していて被覆率が低いため、地表面にも十分レーダーが到達しているためであると考えられる。また、本海岸は 2011 年東北沖津波により砂丘にチャンネル上の侵食痕が形成されたことが報告されているが（鎌田，2011），その名残も地形的に認めることができる。

一方、MLS は複数の砂浜海岸に適用をした。その一例として、岩手県久慈市夏井川河口

での測量結果を図6に示す。MLSに用いた機種は、自己位置推定と環境地図作成をリアルタイムに行うSLAMと呼ばれる機能を搭載している。しかしながら、砂浜海岸ではランドマークとなる特徴点が極めて少ないため、測量中にエラーが生じることが多くなる。そのため、砂浜等の測量には適さないことを再確認した。

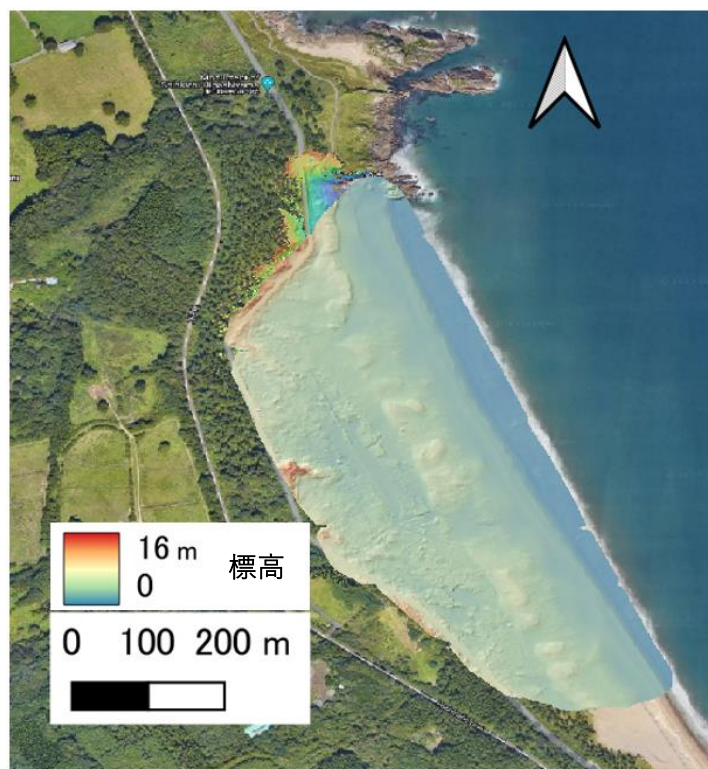


図5 八戸市の大須賀海岸でのALS測量結果（標高図に陰影起伏図を重ねた）。砂丘の侵食痕を特徴的に確認できる。QGISを用いて作成。

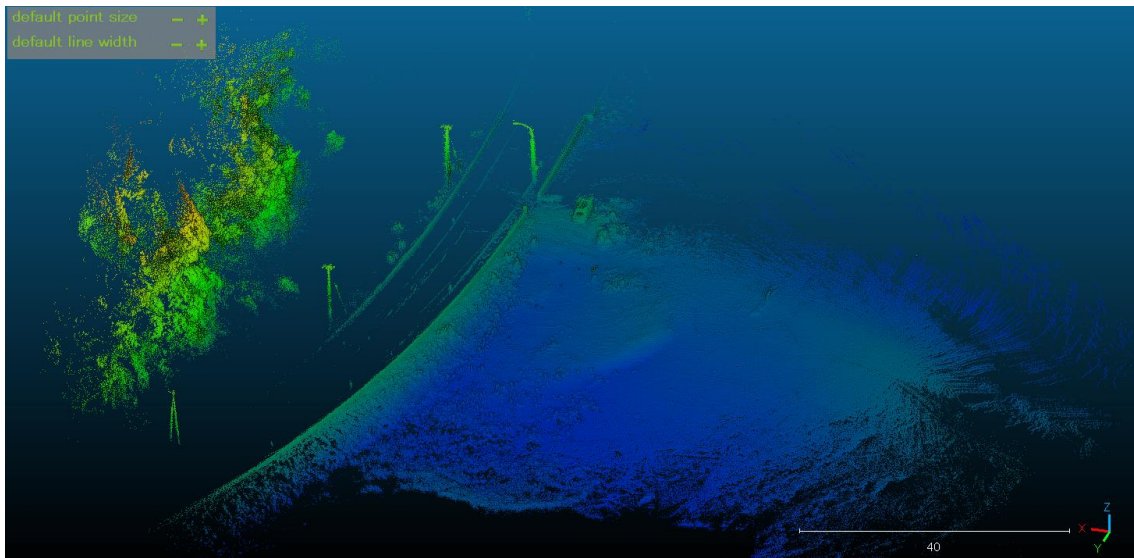


図 6 岩手県久慈市夏井川河口での MLS 測量結果。崖や道路に近い部分ではデータが取得できているものの、海岸付近では十分なデータを取得できなかった。

3. 4. 掘削による津波以降の土壌発達過程の追跡調査

本調査では、八戸市の大須賀海岸において図 7 に示す 10 地点で掘削調査を行った。これらの調査地点は比較的浸水限界に近い場所を選定している。それにもかかわらず、図 8 に示すように、茶色の土壌層を覆う層厚数 cm~10cm 程度の津波堆積物と考えられる白砂層を一部で確認することができた。また、これらの砂層は津波後に堆積したと考えられる数 cm 厚の土壌層に覆われていることを確認した。

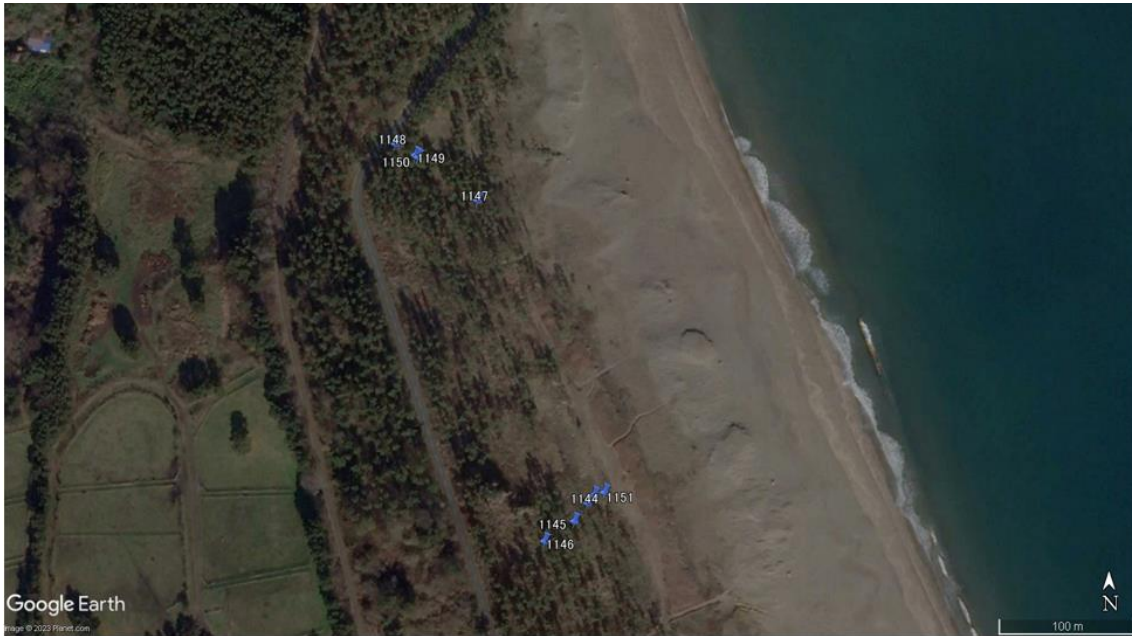


図7 八戸市の大須賀海岸における掘削調査地点（背景図は Google Earth 画像を使用）.



図8 掘削調査結果. 左側が上位（地表面側）. 表層から 3cm~12cm 付近に津波堆積物と考えられる白砂層が認識できる.

4. まとめ

本研究では、津波による侵食が発生した海岸の現況確認、GPR 探査による地下構造把握、LiDAR 機器を用いた高精度地形測量、掘削による津波以降の土壌発達過程の追跡調査などを行うことにより、津波前、直後、数年後、現在の沿岸地形を地中を含め 3 次元的に高精度復元するためのデータを取得した。予察的な検討の結果、津波による地形侵食には大きく 4 つのタイプが存在すること、侵食地形は地中に埋没している場合があり、GPR を用いてその構造を復元できる可能性があること、ALS により広範囲の侵食地形を短時間に習得できること、砂質津波堆積物は現在も良好に保存されている場合があることなどを明らかにした。今後、これらのデータを統合することにより、地中を含めた 3 次元地形の復元を行っていく予定である。

謝辞：本研究は、国土地理協会による研究助成を受けて行われたものである。関係都道府県および市町村、並びに環境省、文化庁の担当者の方々には、調査の承諾及び許可において大変お世話になった。また、東京大学の井村春生氏には、調査によるデータ取得および図の作成でお世話になった。以上の方々に感謝申し上げます。

引用文献：

鎌田耕太郎，2011，大須賀海岸における 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波による地形改変と津波堆積物．日本地質学会第 118 年学術大会・日本鉱物科学会 2011 年年会合同学術大会要旨，R10-O-3.

国土地理院ウェブサイト，<https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html>

Takeda, H., Goto, K., Goff, J., Matsumoto, H., Sugawara, D., 2018, Could tsunami risk be under-estimated using core-based reconstructions? Lessons from ground penetrating radar. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 808-816.

田中 仁，Adityawan, M. B., 有働恵子，真野 明，2013，津波による旧川位置での河道形成と戻り流れの排水機能．土木学会論文集 B2 (海岸工学)，69，I_411-I_415.

田村 亨，2018，古環境記録としての日本列島の波浪卓越海岸，*第四紀研究*，57，197-210，<https://doi.org/10.4116/jaqua.57.197>