

内湾海底谷の堆積環境と津波洗掘リスク –和歌山県内之浦を例に–

Inner Bay sedimentary environment and Tsunami Scouring risk – Example from Uchinoura cove on Tanabe Bay, Southwest Japan –

吉永佑一¹・原口 強²・関口秀雄³・鳥居和樹⁴・東 良慶⁵

Yuichi YOSHINAGA, Tsuyoshi HARAGUCHI, Hideo SEKIGUCHI
Kazuki TORII and Ryohei AZUMA

This paper is concerned with tsunami sedimentation and attempts to promote preparedness against tsunami-induced scour for critical infrastructure. The sub-bottom seismic profiling in Uchinoura cove identified a few distinct reflectors in the seabed, implying the presence of tsunami-related horizons. This was substantiated by retrieval of a continuous sediment core, showing the consequences of past tsunamis. A high-resolution side scan imaging with bathymetry captured a signature of extensive scouring at the constriction of the cove. These findings provide a stimulus for examining stream powers of the past tsunami events, especially the one induced by the 1946 Nankai Earthquake.

1. はじめに

和歌山県田辺湾は、紀伊半島の西岸に位置する海域で、南海トラフで発生する海溝型巨大地震に伴う津波被害を顕著に受け、今後も被害を受けるリアス式海岸地域の一つである。その湾奥に位置する内之浦は、波食棚に縁取られた狭長な海底谷をなす。

近年、内之浦水際線の土地利用が進み、かつて津波エネルギーを吸収していた枝谷の開口部は海岸堤防や水門によって締め切られてきた。もし津波が再来し、これらの海岸防災施設の基礎部が津波流動によって洗掘されると、海岸堤防の崩壊や水門施設の沈下や傾斜が発生し、機能不全を招く可能性がある。

本研究では、これまでに津波被害を受けてきた内之浦での海底地形計測、ボーリング調査および音波探査を実施した。これらの結果から、堆積学的手法をふまえた津波洗掘災害リスク評価に係る新たな展望を提案する。

2. 田辺湾・内之浦の地形概要および津波災害履歴

図-1に田辺湾の海底地形図を示す。田辺湾は、湾口から湾外にかけて比較的単純な地形をなしている。一方、湾内とくに文里、内之浦から南側の田辺湾奥では島や礁が散在し、枝湾と呼ばれる入り江が複数刻まれる。入り江の谷地形は海底へ、岬の尾根は背後の陸地へ連続する

ことや、入り江の奥に小河川が流入することなどは、かつての谷間が海水準の上昇によって水没し、溺れ谷になったと解釈される(大垣, 2002)。

内之浦は開口部から浦の奥までの長さが約1km、谷幅が約300-400mである。背後には干潟が分布しており、流入河川は内之浦と干潟との間の水路(水門設置)によって制限されている(図-2)。

歴史記録によると、田辺湾では684ADの白鳳地震を始めてとして、M7-8クラスの地震に伴う津波の被害を多く受けてきた。比較的近い時代の津波被害は、1854ADの安政南海地震、1944ADの東南南海地震、1946ADの昭和南海地震などがある。このほかに、遠地地震による津波として1960ADのチリ地震がある(田辺市, 2008)。

襲来した津波の波高は、安政南海地震時に田辺で3.0-3.5m、昭和南海地震時に内之浦で4.3mと記録されている(渡辺, 1998; 田辺市, 2008など)。

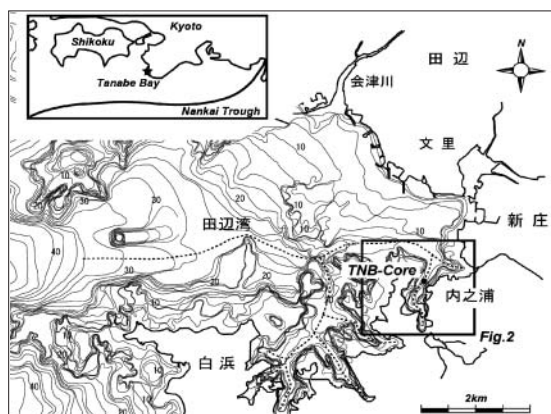


図-1 田辺湾海底地形図(海上保安庁(2002)をもとに作成)

1	修(理)	大阪市立大学大学院理学研究科生物地球系専攻
2	正会員	博(工) 大阪市立大学准教授
3	フェロー	工博 京都大学防災研究所教授
4		修(理) 国際航業(株)(旧大阪市立大学大学院理学研究科生物地球系専攻)
5	正会員	博(工) 京都大学防災研究所助教

表-1 C3D仕様

周波数	200 kHz (6 個)
最大使用可能水深	3000 m
計測レンジ幅	水深の10 倍
分解能 (横方向)	5 cm, ビーム幅1°
最小探知高さ	10 cm

3. 調査概要

(1) C3Dによる海底地形計測

2008年5月に内之浦内にて海底地形計測を実施した。計測には、測深、音響画像撮影機能を兼ね備えたマルチアングル広帯域測深サイドスキャンソナー(Benthos社製, C3D Sonar Imaging System)を使用し、動揺センサ、方位センサおよびGPSを同期付けさせた。C3Dは、CATTI (Computed Angle of Arrival Transient Imaging) システムを採用しており、海岸堤防や橋脚等の垂直的な起伏を伴う人工構造物基礎部の形態を詳細に計測することが可能である。表-1にC3Dの仕様を示す。

計測結果は、ランダム点群データであるため、ノイズ処理、潮位補正等の後、1m格子データ(DSM; Digital Surface Model)に生成した。このデータからGISエンジンを用いて、水深段彩図および海岸堤防付近のコンター図を作成した(図-2, 図-3)。

図-2を見ると、内之浦は開口部で水深約12-14m、浦の奥で水深10m以浅の平坦面をなしている。また、奥側へ向かって谷幅が狭まり、海底表面に岩礁の突出部が散在している。さらに、浦の中央部には、海岸堤防および標識灯の基礎部が設置されている岩礁(東側)と孤立岩礁(西側)の間に狭隘部が存在し、その海底面(泥質)には高度差1-2mの三日月型の凹みが認められる(図-3)。この特徴ある凹地形は、狭隘部における流れの集中による洗掘の影響を反映していることが唆される。

(2) ボーリング調査

2007年6月に内之浦の開口部付近にて、海上ボーリング調査(TNB-Core, 図-2の星印)を実施した。採取したコア長は15.2mである。採取コアに対して堆積相解析、堆積物中のサンゴの生息深度の同定、 ^{14}C 年代測定法や ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 測定法を行った。

コアの堆積相は、海底面からの深度約10mまでは、海成泥質堆積物を主体とする。その泥層の間に、サンゴ片を多量に含む粗粒堆積物(津波イベント層)が10層挟み、約7.8mに鬼界アカホヤ火山灰層(K-Ah)が確認される。約10.2mからは非海成有機質シルト層が分布し、15.2mで基底泥岩層(Bed rock)に達する(図-4)。

イベント層は、層厚がおおよそ3-10cmで、構成物質の淘汰が非常に悪く、基底部の境界が明瞭であり磨耗を受

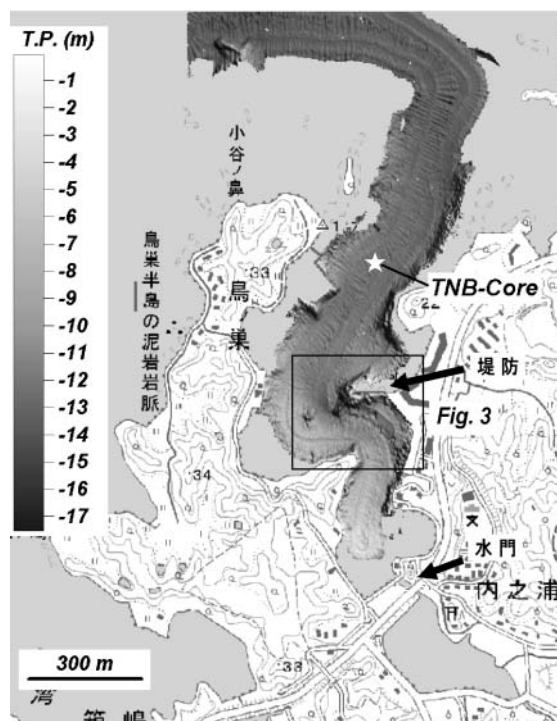


図-2 内之浦内のC3D計測結果から作成した水深段彩図(枠線は図-3の表示範囲を示している。)

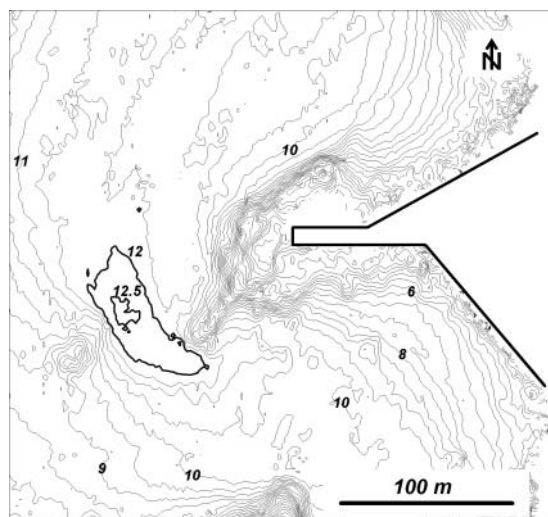


図-3 海岸堤防付近の水深コンター図(コンター線の間隔は0.5mで、右側の太実線部は海岸堤防位置である。水深12-12.5mの部分が洗掘の影響によると考えられる。)

けていない。また、サンゴ片や自形の貝化石、植物片等を雑多に含む。サンゴは、おもに深度数m-10数mに生息する浅海性のものが主体で、表面構造が明瞭に残る。

^{14}C 、 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 年代測定結果およびK-Ah層の層準に

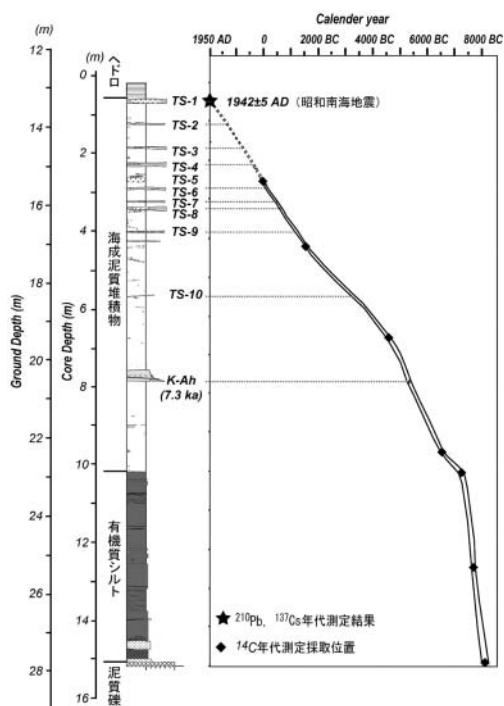


図-4 TNB-Coreのコア柱状図およびAge-Depthモデル (鳥居 (2008) を改編, TS-1は年代結果から昭和南海地震と推定される。堆積曲線の破線部は今後の研究課題である。)

もとづく採取コアのAge-Depthモデル構築 (図-4) の結果, 最上層のイベント層 (TS-1) は1946年ADの昭和南海地震にともなう津波イベント層である可能性が高い (鳥居, 2008; 原口ほか, 2008)。

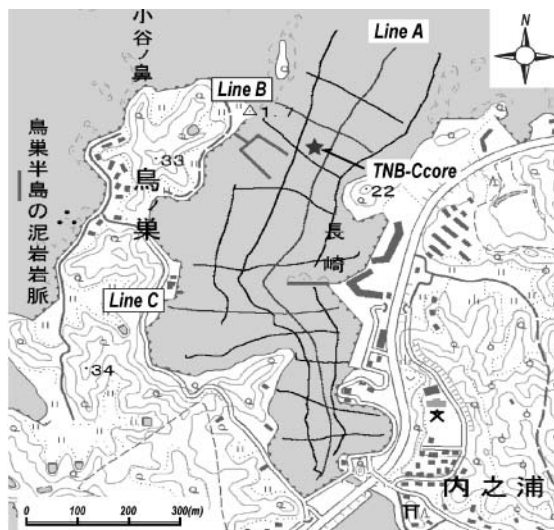


図-5 ボーリング調査位置および音波探査測線図 (星印はボーリング掘削地点, 実線は音波探査測線)

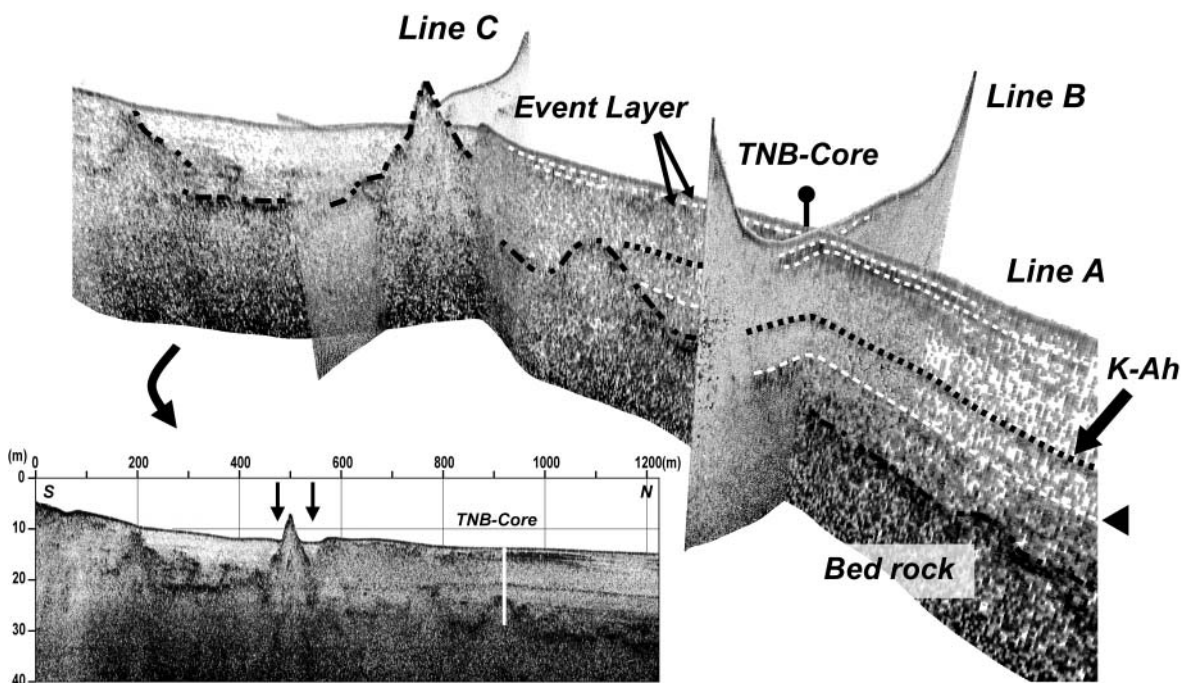


図-6 Line Aの南北投影断面図および鳥瞰図 (断面図の太線はTNB-Coreの採取長分に相当する位置。鳥瞰図のK-Ah層相当の反射面の下位にある反射面のコントラストの変換点 (黒三角) は海成泥質堆積物とその下位の有機質シルト層の境界面の可能性がある。)

(3) 音波探査

2008年3月に内之浦全域で音波探査を実施した。測線は図-5に示すような内之浦内をくまなく俯瞰できるように計14本設定した。探査には、固有周波数3.5kHzのシングルチャンネル地層探査装置（SyQwest社製、StrataBox；地層分解能6cm、深度解像度10cm）を使用し、GPSによる単独測位を同時に行った。

探査記録は、音波ビーム1発射ごとに、経緯度、深度および16階級区分された音響反射強度に相当する波形データをパソコン上へ連続的に収録される。このデータからGISエンジンを用いて、各測線の投影距離断面図を作成した。また、探査データから反射強度を属性とする4次元の点群データを生成し、3D GISツール（IVS社製、Fledermaus）を用いて、3次元地質モデルを構築した。図-6にA測線の南北投影断面およびA-C測線の鳥瞰図を示す。さらに、TNB-Coreとの対比を行い、津波イベント層、K-Ah層等を同定した。

探査の結果、深度40mの範囲で明瞭な音響反射パターンが明らかになった。以下にその特徴を記述する。

- 1) 内之浦の平坦部は、海底面からBed rock相当層上面までの層厚が約10-15mである。
- 2) Bed rock相当層は、浦の奥に向かって高くなっている。
- 3) 各測線において海底面下に3-4枚の明瞭な音響反射面が認められた。その中、水面下20m付近の反射面はK-Ah層に対比される。
- 4) 海底面付近の2枚の反射面はTNB-Coreで認められたイベント層に対応される可能性が高い。これらの反射面は、内之浦の開口部に限られ、浦の奥に向かい不明瞭になる。
- 5) 海底に突出した岩礁部（図-6の断面の矢印）に着目すると、岩礁両端が凹んでおり、洗掘が進行していると示唆される。

4. 内之浦における津波洗掘災害リスク評価

図-7に和歌山県提供の内之浦周辺における津波予測ハザードマップを示す。これは、満潮時に東海・東南海・南海地震が同時発生（M8.6程度）した場合における浸水域・浸水深の予測結果を示しており、陸域部における氾濫浸水規模の予測が安全側となるように、海岸堤防や臨海道路護岸の存在は考慮していない。

現在における内之浦湾口から湾奥（水門橋）までの長さは約1 kmである。一方、1946年南海地震津波来襲時点には、内之浦干潟を横断する道路は未だ建設されておらず、地震津波は内之浦干潟および隣接低平地奥深く侵入し深刻な被害をもたらした。その後、臨海道路が建設されるにあたり、干潟と内之浦海域の海水交換が維持されるように、道路横断方向に箱型断面の通水路、海側には

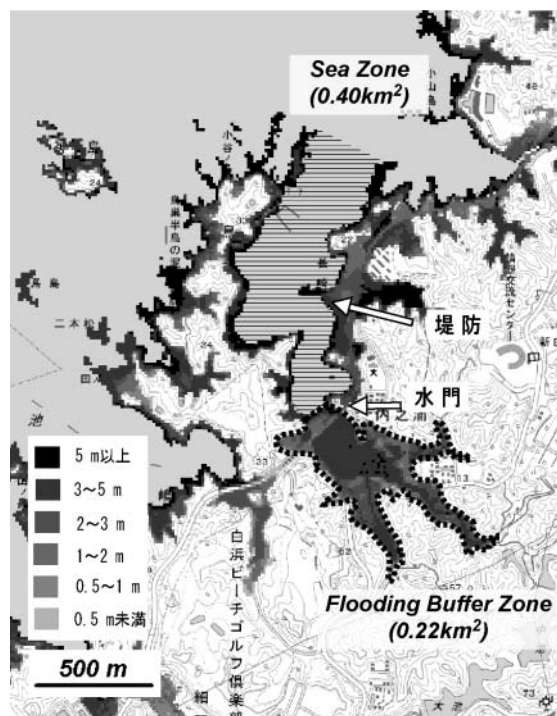


図-7 内之浦周辺の津波予測ハザードマップ（和歌山県提供デジタルデータをもとに作画。図の段彩部は津波の浸水深を示している。）

開閉装置付の水門が構築された。留意すべきことは、水門橋より陸側の干潟および低平地は潜在的な氾濫水受入れ域（Flooding Buffer Zone、図-7）にあたることである。その面積は約0.22km²であり、現在の内之浦の海域（Sea Zone、図-7）面積の55%に当たる。

来るべき南海地震による内之浦湾口での入力津波流動の規模が過去のそれと同様であるとする、内之浦沿岸域の都市化にともなう枝湾面積の減少（内之浦干潟面積を含む）により、少なくとも局所的には湾内水位の上昇やそれにとまう津波流動速度の増大をもたらす可能性が高い。

特に内之浦中央部では湾軸が屈曲し、かつ岩礁の存在による狭隘部が形成されている。そこには流れが集中しやすく、実際に侵食地形が残存している。上述のように、都市化に伴う内之浦湾の海域面積の減少によって津波流動速度が増大すると、海底地形変化がより強調される可能性がある。

戦後直後の状態とは様相が格段に異なり、内之浦湾内には多数のプレジャーボートや沖合釣堀等が係留している。海底部の係留装置が津波流動にとまう洗掘や侵食により破損すると、想定外の災害や混乱が湾内に生じる可能性が高い。これらのリスクの定量化を行ううえに、先ずそのようなリスクが存在することに注意を喚起する

本研究の意義は大きい。

5. おわりに

本研究では、これまでに津波被害を受けてきた和歌山県内之浦での海底地形計測、ボーリング調査および音波探査を実施し、過去の津波災害の痕跡を追跡した。この結果、以下のことが明らかになった。

- 1) C3Dによる精細な海底地形計測によって、湾内中央の流路が屈曲した狭隘部（泥質）に洗掘地形が確認された。これは、過去の津波流動によって形成された可能性がある。
- 2) 音波探査の結果、3枚の音響反射面が確認され、ボーリング調査の結果から上位2枚はサンゴの破片を含んだ淘汰の悪い砂泥混在層（津波イベント層）に対応する。イベント層は水平方向の連続性が見られ、津波流動による侵食・再堆積作用を受けている可能性が高く、今後津波に伴う土砂移動の事例となる。
- 3) 精細な海底地形計測結果をふまえた堆積学的方法論の導入により、各津波イベント層の形成年代が高解像度で同定できると、通常の堆積速度により形成される堆積層厚との比較から、歴史津波流動による底質の削剥量、すなわち津波流動による海底地形変化ポテンシャルを推定する新たな方法論が切り拓ける。

従来、自然堆積した海底泥質土の強大な水流に対する侵食抵抗や削剥・輸送特性について実証データは乏しいので、内之浦湾域は貴重なジオ・アーカイブになり

得る可能性がある。

今後、C3D探査で取得した音響画像解析から内之浦海底面の表面形態を明らかにし、津波流動に伴う洗掘地形の形成発達を高解像度で定量化していく予定である。

謝辞：²¹⁰Pb法および¹³⁷Cs法の適用において山崎秀夫氏（近畿大学）、造礁サンゴの同定において深見裕伸氏（京都大学）にご協力を頂いた。田辺湾の堆積環境調査では、京都大学防災研究所白浜海象観測所の武藤裕則、芹澤重厚の各氏にご協力頂いた。また、和歌山県より「津波浸水予測図」に関する電子ファイルを提供して頂いた。以上の方々と各機関に記して感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 原口 強・鳥居和樹・吉永佑一・関口秀雄・芹澤重厚・東 良慶・武藤裕則・山崎秀夫（2008）：田辺湾の津波堆積物，平成19年度京都大学防災研究所研究発表講演会予稿集，www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/hapyo/08/C21.pdf，参照2009-05-11。
- 海上保安庁（2002）：2万分の1海底地形図「田辺港」
- 大垣俊一（2002）：田辺湾周辺の地質、地形と海岸生物，関西海洋生物談話会連絡誌「Argonauta」，No. 7，pp. 3-19。
- 田辺市防災対策室：田辺市地域防災計画震災対策編（平成20年度修正），<http://www.city.tanabe.jp/bousai/bousai-plan.html>，参照2009-05-11。
- 鳥居和樹（2008）：津波堆積物に記録された巨大地震履歴に関する古地震研究（三陸海岸および紀伊田辺湾を例として），大阪市立大学大学院修士論文，pp. 45-76。
- 渡辺偉雄（1998）：日本被害津波総覧[第2版]，東京大学出版会，248p。