

自然海岸における津波による土砂移動調査

A Study for the Sediment Transport due to Tsunami along the Natural Coast

西畑 剛¹・後藤和久²・田島芳満³・高橋智幸⁴・今村文彦⁵

Takeshi NISHIHATA, Kazuhisa GOTO, Yoshimitsu TAJIMA,
Tomoyuki TAKAHASHI and Fumihiko IMAMURA

In this study, we investigated the sediment transport due to the 2004 Indian ocean tsunami along the natural coast at Hambantota, Sri-lanka. Bathymetry and topography surveys before and after the tsunami were conducted and the results showed significant erosion by the tsunami, especially around the places where shoreline discontinuations were observed. We conducted a numerical simulation of tsunami propagation as well as the bathymetry change induced by the tsunami. Furthermore, we also estimated the bathymetry change due to the usual sea waves at the coast. Our numerical results suggested that the tsunami has strong bottom shear stress at specific landform such as a river mouth and a cape. We also found that the sediment erosion and accumulation due to the tsunami had been mitigated by usual sea waves after the tsunami.

1. はじめに

津波発生時, 沿岸部では大規模な土砂移動が観測されることがある。これまでに測量データを伴った観測例としては, チリ津波時の気仙沼湾内における土砂移動(例えば高橋ら,1999)やインド洋大津波時の港湾における土砂移動(西畑ら, 2005)などが報告されてきた。こうした場所における津波による地形変化は, 狭窄湾や防波堤沿いに局所的に発生した強い流れに起因しているが, 平行等水深線海岸といった一般的な形状の自然海岸においては, 津波による地形変化調査報告例は少ないのが現状である。

本研究では, 2004年インド洋大津波時におけるスリランカ南部の自然海岸において, 津波直前に広範囲に渡って測量された水深データが存在することに着目し, 津波後における地形測量を実施・比較することにより土砂移動を把握した。併せて津波による地形変化数値解析を行い, 自然海岸における津波土砂移動機構について考察することを目的とする。

2. 調査概要

2004年インド洋大津波前後の期間, スリランカ南部ハンバントータ市の一般海岸において海上では音響測深, 汀線付近では陸上水準測量を実施した。また底質の粒度

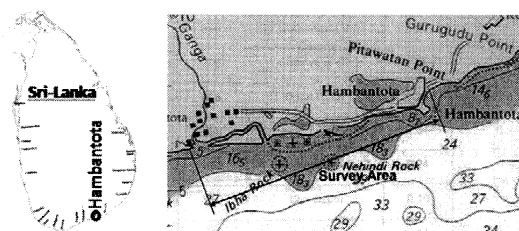


図-1 検討位置

表-1 測量概要

回数	測量期間	資料取得目的	測線数
第1回	2004年11月-12月	津波前地形把握	46
第2回	2005年11月-2006年1月	津波後地形把握	49
第3回	2007年10月-11月	常時波浪地変把握	15

試験およびコア掘削もおこなっている。

当海岸は海底勾配1/100程度の一般的な遠浅海岸である。海岸地形は, 灌木を伴ったデューンが発達し, 河川による流れ込みや小規模の岬, 後背湿地が点在する。また岬先端等, 一部に露岩域を有しており, コア掘削からは砂層浅部に岩が認められるケースもあったが, その平面分布詳細までは調査していない。図-1に検討位置を示す。なお, 現地踏査では検討海岸において津波はほとんどデューンを越えていないが, デューンを侵食して背後ラグーンに至った痕跡が報告されている箇所が1カ所存在する。

測量は, 表-1の通り3回に渡り実施されている。測量範囲はMWL-12mから+2mまでの陸上部を含む範囲とし, 沿岸方向にはWalawe川河口からハンバントータ市街近傍の岬までの延長およそ14kmの範囲である。ただし, 河川内や潟湖といった内水面は測量範囲外である。測線は汀線とほぼ直交するように設定した。第1回と第2回の

1 正 会 員 修(工)五洋建設(株)技術研究所 係長
2 博(理)東北大学大学院工学研究科助教
3 正 会 員 Ph.D. 東京大学大学院工学研究科准教授
4 正 会 員 博(工)秋田大学工学資源学部准教授
5 正 会 員 博(工)東北大学大学院工学研究科教授

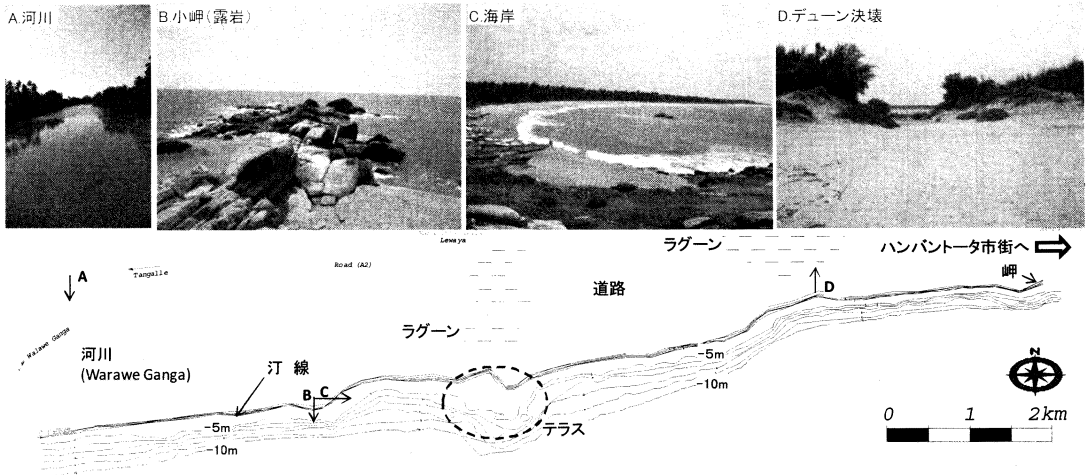


図-2 検討海岸地形

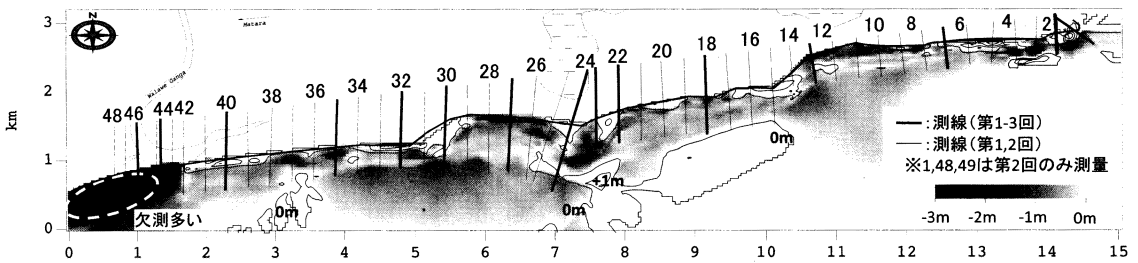


図-3 測線および侵食堆積分布 (津波前後の第1回～第2回)

間にインド洋大津波が発生しており(2004年12月26日), 津波発生から第2回測量までの期間がおおよそ1年あるので, その間は常時波浪による地形変化が想定される. そこで常時波浪による海浜過程を把握するため, 第3回の測量を実施した. 図-2に検討海岸地形に現地写真を併せて示す. また図-3に測線および津波前後における侵食堆積分布を示す. さらにいくつかの測線については, 縦断地形変化を図-4に示した. ここで5m以浅の海域では測量船が近づけず, 欠測が見られる. 第1回から第2回の測量期間にかけては, 海岸は侵食傾向であるが陸上では堆積している箇所も多い. 第2回から第3回にかけては堆積傾向といえ, 津波発生からおおよそ3年後には地形は津波発生前の状態へ回復にむかっている. 第1回から第2回にかけて比較的欠測が少ない測量範囲(測線2から測線44の間の海域で水深0mから10m)における総侵食量・堆積量はそれぞれ2,667,206 m^3 , 669,403 m^3 である.

なお第1回および第2回測量時には底質サンプルを陸上および海上で採取している. 粒度試験より中央粒径は陸上で1mm以上, 5m以深の海域では概ね0.1~0.3mmとばらつきが大きい. 本研究では, 底質は粒径0.3mmの砂として検討を進めることにした.

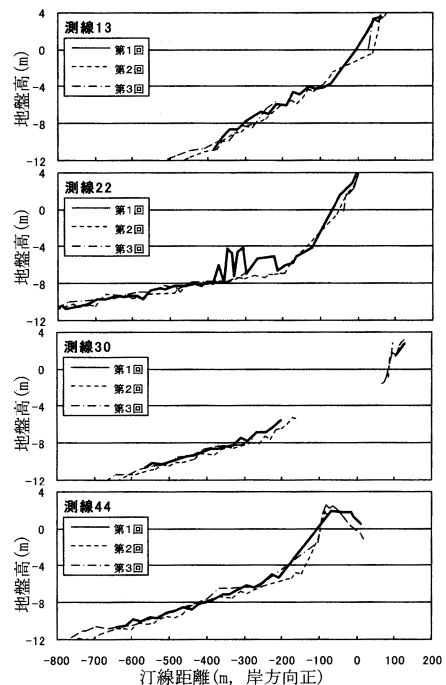


図-4 縦断方向地形変化

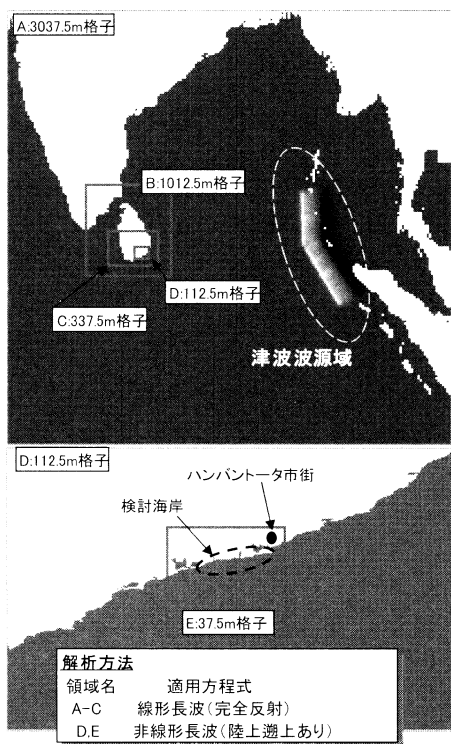


図-5 計算領域と解析手法

3. 数値モデルによる地形変化の再現

数値解析による地形変化の再現は、(1)津波の伝播計算、(2)津波による地形変化計算、(3)常時波浪による侵食堆積評価の3段階から成る。以下に計算手法および解析結果を順次示す。

(1) 津波の伝播計算

最初にスリランカにおけるインド洋津波の再現性が高い富田・本多(2006)の断層モデルを使用して地震による初期地盤変位をMansinha & Smylie(1971)による方法で計算し、数値解析初期水位とした。計算は直交座標系でおこない、波源と検討範囲を含む広領域から対象海域が近づくにつれて狭領域へ格子サイズを小さくしながら領域接続し、領域境界において水位と線流量の受け渡しを行っている。広領域における津波伝播計算は線形長波方程式に基づき水位と線流量をスタッガード格子によって差分し、陸域では完全反射境界を設定した。狭領域では非線形長波方程式を基本とし、小谷ら(1998)による方法で陸上遡上計算までおこなった。なお、潮位はスリランカ南部ゴール市での現地時間9時における潮位+0.2mを与えている。図-5に計算領域と解析手法を示す。

津波の伝播計算は地震発生から6時間に渡って解析した。津波は検討範囲では南南東より第1波が襲来する。図-6は計算によるE領域沖合での津波波形を、図-7に解

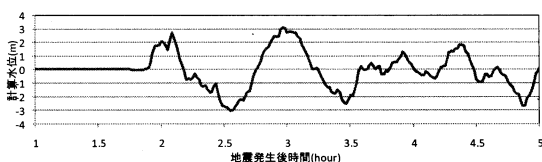


図-6 沖合津波波形

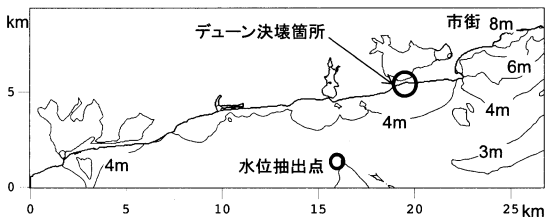


図-7 解析最大水位

析最大水位を示す。ハンバントータ市街における津波第1波到達時刻は9:10-9:20(Local time)とされるが、計算では122分以降(9:01以降)に市街での第1波最大遡上水位が解析され若干早く到達する結果となった。なお当地の被害調査は柴山ら(2005)によって報告されており、市街は津波の集中によって周辺より高い7m以上の痕跡高(最大遡上高10.87m)が記録されるが、計算結果とほぼ整合している。検討海岸汀線ではデューン高を越えない程度の計算水位(4m強)であるが、デューン決壊箇所では5m強の計算水位となり、痕跡高5.88mとほぼ整合し、妥当な規模の津波が解析されたといえる。

(2) 津波による地形変化計算

検討海岸周辺に対しては非線形長波式に基づく津波伝播と同時に底質移動を考慮した解析を実施した。解析は西畑ら(2007)に従い、津波による流量解析結果に平均流れの対数則を適用し、Tajima(2004)による底面せん断応力に基づいて底質の掃流移動を評価した。一方で浮遊砂に対しては、巻き上げ沈降を考慮した移流拡散方程式を計算することで別途評価した。ここで浮遊砂濃度の鉛直分布形算定時に仮定する渦動拡散係数の鉛直分布は一樣、乱れの水平方向のスケールは水深と等しいと仮定した。格子サイズなどは津波の伝播計算における狭領域と同様である。

地形変化計算上も検討海岸においてデューンを決壊させる津波は計算されなかった。図-8に解析による侵食堆積分布を示す。計算では全体的に侵食傾向であり、河口やテラス、岬周辺における侵食堆積が顕著となっているが、これらは観測と同様であり、侵食堆積分布もおおよそ一致する。ここでWarawe川河口では、計算では河口砂州付近に大きく侵食、沖に堆積した。観測では左岸沖の侵食は認められたが右岸側は欠測が多く、津波による

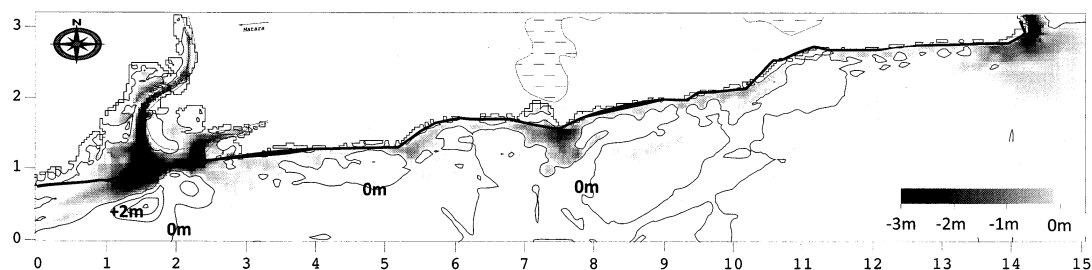


図-8 解析による津波侵食堆積分布

土砂堆積があったかは不明である。

図-9に河口部における津波第1波押し波時および引波時の計算流速と浮遊砂濃度を示す。岸沖方向への強い流速と高濃度の浮遊砂フラックスが解析されている。

一方、テラス付近においてはその地形形状により波の集中と浅水変形による増幅から底質移動を伴う大きな外力が計算されており、河口同様に岸沖方向への浮遊砂移動が認められた。また東側の岬付近は津波自体が大きかったことに加え、上記同様に強い外力が解析された。地形形状と外力の大きさについては後述する。

(3) 常時波浪による侵食堆積評価

津波発生から第2回測量はおよそ1年、第2回測量から第3回測量まではおよそ2年のインターバルがあり、常時波浪による地形変化が想定される。当地はモンスーン気候であり、夏期(5月から9月)は南西風、冬季(10月から4月)に北東風が卓越し、特に前者によるうねりが沿岸に高波浪をもたらす。この間の海浜過程傾向を把握するため、以下の解析を実施した。

a) 波浪データの取得と時化モデルの構築

検討海域の沖波データとして気象庁のGPV全球波浪モデルデータを使用した。データ取得位置は北緯5°、東経81°15′(2007年7月以降は配信変更により北緯5°、東経81°)、取得内容は、有義波高、平均波周期、平均波向である。最初にKarlsonn(1969)によるエネルギー平衡方程式より事前に周期、波向別の波浪変形計算を沖合において実施し、沖波時系列データを検討海域水深20mにおける波浪時系列に変換した。変換した波浪時系列から、時化モデル(津波発生後から第2回測量まで49時化、第2回から第3回測量まで81時化)を構築し、次節に述べる地形変化計算を時化ステップ毎に実施した。

b) 常時波浪による地形変化計算

常時波浪による地形変化計算は清水ら(1996)の手法による。これはエネルギー平衡方程式を用いて、波浪場および海浜流場を評価し、渡辺ら(1984)による局所漂砂量フラックスから波および流れによる地形変化を計算する。図-10に第2回から第3回までの縦断地形変化解析例を各回測量結果と合わせて示す。ここで常時波浪による地形

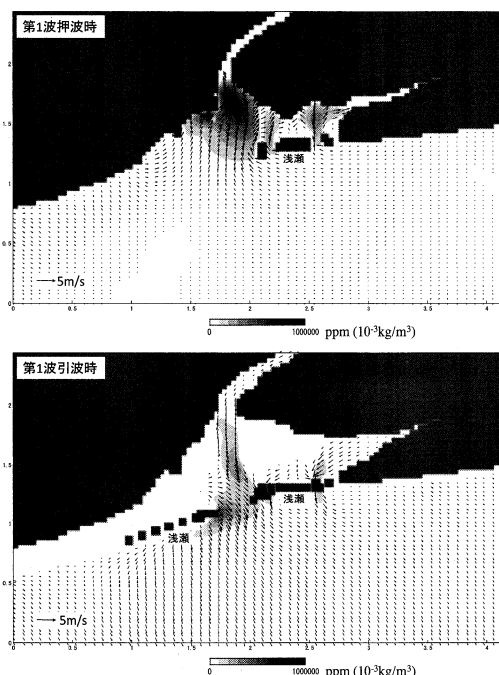


図-9 河口部の津波解析流況場と浮遊砂濃度

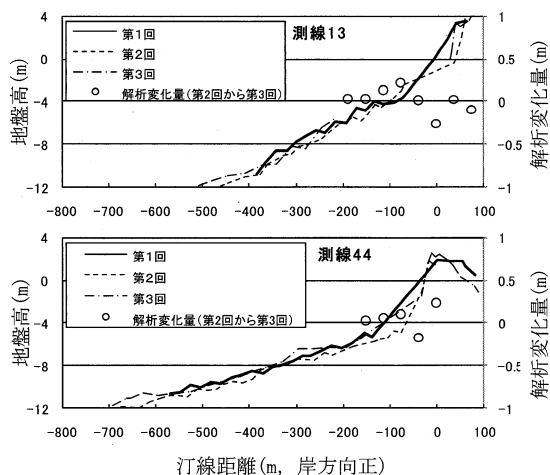


図-10 縦断測量結果と常時波浪による解析変化量

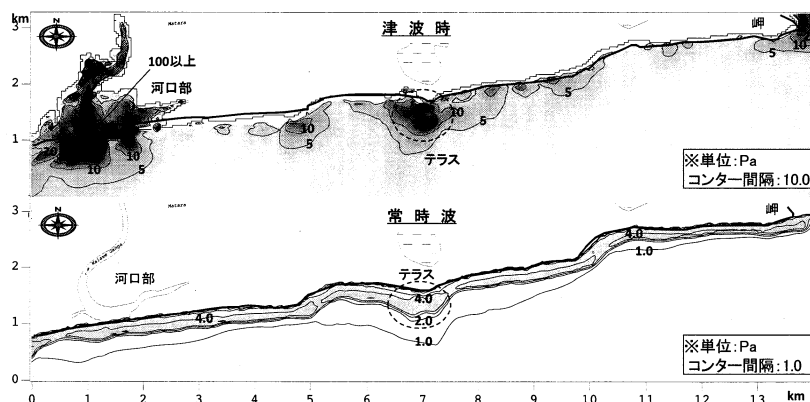


図-11 最大底面せん断応力の比較

変化計算結果は、計算座標軸方向と測量線方向が一致しないため、測量線に最も近い解析岸沖格子の地形変化量を示している。常時波浪による地形変化は、汀線付近で侵食、沖で堆積となる傾向となった。なお津波発生後の地形(計算地形)から第2回測量までの地形変化解析結果も同様の傾向であったが、第2回から第3回の方が沖合で地形変化が大きく解析される傾向であった。解析結果は定量的には過小ではあるが、粒径を0.3mmで計算しており、沖合では中央粒径0.1mm程度の細砂が採取されていることを勘案すると、実際の地形変化は細砂による沖向浮遊移動により解析結果より沖側でも地形変化が起こることが想定される。なお津波時の地形変化を緩和するように海浜変形が進行する傾向は観測結果と一致する。

(4) 津波と常時波浪の外力比較

ここでは底質移動に及ぼす外力条件を津波と常時波浪について比較検討する。津波地形変化計算時および常時波浪計算時に解析された最大底面せん断応力を図-11に示す。常時波浪では砕波点付近でせん断力の極大が見られ、等水深線にはほぼ平行に分布するのに対し、津波時は、せん断応力自体が1オーダー大きく、かつ汀線変化付近では局所的にさらに大きな値を示しており、こうした箇所では津波による地形変化がさらに増大することがわかる。なおテラス部は常時波浪に対しても侵食傾向と解析されるにもかかわらず、津波発生前には安定して形成されていた。理由としては、海底に暗礁があり底質が安定していることや背後ラグーンからの土砂供給が予想される。いずれにしても、津波時に想定される巨大外力によって、付近の底質は一掃されたと考えられる。

4. まとめ

スリランカの自然海岸において2004年スマトラ沖地震津波に伴う土砂移動を調査した。測量によって広範囲に渡る津波侵食が認められ、河口や岬といった汀線変化位

置においてこの傾向は顕著であり、汀線付近では堆積も確認された。地形変化数値計算により一般等水深線海岸における津波による侵食堆積過程を解析した結果、汀線変化位置においては波の集中に伴うせん断力が常時波浪より大きく作用することがわかった。なお、その後の海浜過程で津波による侵食堆積は緩和されていったことが現地測量調査および数値解析から明らかになった。

謝辞：本研究の現地調査の一部は、科学研究費補助金(No.18201033)を用いて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害予測，海工論文集，第45巻，pp.356-360。
- 柴山知也・岡安章夫・Nimal Wijayarathna・佐々木淳・鈴木崇之・Ravindra Jayaratne (2005)：2004年スマトラ沖地震津波のスリランカ南部被害調査，海工論文集，pp.1401-1405。
- 清水琢三・山田晶子・渡辺 晃(1996)：沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数，海工論文集，第43巻，pp.571-575。
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999)：掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発，海工論文集，第46巻，pp.606-610。
- 富田孝史・本多和彦：スリランカにおけるインド洋津波の数値計算による再現に向けて，海工論文集，第53巻，pp.251-255。
- 西畑 剛・佐貫 宏・森屋陽一・後藤和久(2007)：津波による地形変化モデルに関する研究，海工論文集，第54巻，pp.521-525。
- 西畑 剛・田島芳満・森屋陽一(2005)：津波による地形変化の検証—2004年スマトラ沖地震津波 スリランカ・キリンダ港—，海工論文集，第52巻，pp.1386-1390。
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984)：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル，海工論文集，第31巻，pp.406-410。
- Karlson, T. (1969): Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc. ASCE, Vol.95, No. WW4, pp.437-448。
- Mansinha, L. and D.E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Seismol. Soc. Amer., Vol.61, pp.1433-1440。
- Tajima, Y. (2004)：Waves, currents, and sediment transport in the surf zone along long, straight beaches, Doctoral thesis in Massachusetts Institute of Technology, 313p。