

スマトラ沖地震津波のスリランカにおける被災実態

佐藤慎司*・細見 寛**・細川恭史***・福濱方哉****

スマトラ沖地震津波に関して, スリランカ全島規模の現地調査を実施し, 浸水遡上高分布や建物・社会基盤施設の被災状況を分析した。東海岸に発達するバリア砂州上では広域洗掘がみられたことや, 西海岸では複数波の来襲が被害を大きくしたことなど, スリランカにおける被害の特徴を明らかにした。また, 非線形分散波モデルを用いた津波の数値計算により, 津波は, スリランカ島の周囲に存在する陸棚と急勾配斜面により反射・屈折するとともに陸棚上の浅瀬により捕捉・減衰され, 海岸部での波高が場所ごとに大きく変動することを明らかにした。これらをもとに, 海岸での最高水位分布と被害の程度について両者の関係を明らかにした。

1. はじめに

スマトラ沖地震津波ではスリランカで3万人を超える犠牲者と大きな被害が生じた。その被害は, 震源に面した東海岸はもちろん, 島の背後に当たる西海岸までの広範囲に及んだ。被害の程度は, 地域により程度が異なっているが, これは, 海岸部の人口密度や利用状況, 海底や海岸の地形による津波の変形に影響されていると考えられる。被災状況の把握に基づいて津波防災計画を立案するためには, これらに関する詳細な調査が必要である。

本研究では, スマトラ沖地震津波に関して, スリランカにおける全島規模の被害実態調査を実施する(例えば細川・福濱, 2005)とともに, 非線形分散波モデルによる津波の数値計算を実施し, 津波の変形・集中機構と沿岸部被害との関連を考察した

2. 現地調査

現地調査は3班に分れ, 2005年1月18日より3月2日の間で行った。調査地域は西海岸のColomboの北約50 kmのMarawila以南と東海岸全域であり, 本論文では西海岸から順に反時計回りに記述していく。

(1) 西海岸及び南海岸(1月18日~20日)

西部から南部にかけての鉄道は, Colomboより約40 km南のKalutara以南は鉄道敷きの流失, レールの浮き上がりや破絶のため不通であった。一方, 道路については, 幾分被災を受けているが, ColomboからKirindaまでの道路は調査中の通行に支障がなかった。津波来襲により一部橋梁が使用不能になったものの, ベーリー橋により仮復旧されていた。沿岸の海岸保全施設は, 被覆石が一部散乱している程度であった。津波の到達時刻はGalle周辺で9時20分頃, Colombo周辺では9時40分頃

であり, 複数の波が来襲し, しかも後続波の方が波高が高かったことが西および南海岸の特徴である。

a) Beruwala

漁港に漁船がうちあげられ, また, 突堤が1基被災した。漁船は350隻中約40%が船体破損等被害を受けている。漁港施設としての製氷プラントは操業停止, 魚市場・燃料タンクは破損している。一方, 建物は浸水し, 上水・電気設備は被災しているものの, 建築物の構造自体は被害が見られない。陸上での建物の浸水深さは0.5から1 m程度である。近隣のKalutaraにある離岸堤の捨石に散乱は認められなかった。

b) Telwatta / Hikkaduwa

Telwatta周辺では, 内陸部数百 m までの家屋の損壊と浸水が見られた。スリランカの一般の住宅はレンガをセメントで積み重ねた構造であるため, 海岸に近い建築物は基礎のみを残して瓦礫となっていた。Hikkaduwa漁港からTelwattaにかけては, 侵食が著しく(Swan, 1982), 侵食対策と思われる海岸保全施設も石積み消波工の被災と散乱がみられた。また, Telwattaでは列車が脱線横転し第2波以後の波で多くの犠牲者を出した。

Hikkaduwa漁港では, 沿岸で操業している小型の漁船は約70隻すべて被災したものの, 一日の内大半を沖合で操業するワンデイボート, 一度出航すると1週間程度帰港しないマルチデイボートは, 津波来襲時に沖合にいたことから被災は100隻中20隻程度である。

漁港の岸壁は, 背後の土砂が部分的に吸出しを受けているものの大きな被害はみられない。背後の建築物は倒壊しているものはないが海岸に沿って建てられたものは今後の使用は不能なほど破壊されているものが多い。また, 基礎の洗掘も見られる。一方, 沖合土木構造物の被災は防波堤・突堤の天端被覆アスファルト工が部分的に剥離している程度である。

c) Galle

Galle湾に面した開口部正面の新市街地では, 都市施設や商店・住居の大きな損壊が見られた。バスターミナ

* フェロー 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授
** 正 会 員 国土交通省河川局海岸室長
*** 正 会 員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 理事
**** 正 会 員 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室長



写真-1 被災したパースに乗り上げた船舶(Galle 港)

ルなど、都市施設の一部は復旧が進んでいるものの、地域の重要病院が損壊しており、内陸側に移転する計画など、被災は都市計画の見直しにも及んでいる。また、Galle 湾の中央に位置する Galle 港では、写真-1 のようにパースの 1 つが損壊し、背後が吸い出され、水面となっていた。新規に造成された埠頭には 600 トン程度の浅瀬船が乗り上げている。Galle での津波高は概ね 4 m 程度であった。構内の道路が損壊し、エプロン舗装や埠頭の照明灯などが損壊した。泊地に瓦礫や土砂が流入し、浅くなっている。西側隣接河川に架かる橋は津波により損壊していたが、ペーリー橋にて仮復旧済みであった。他の地域と比較して海岸施設の損壊が、最も著しい。

d) Hambantota

住居・市場・商店が並ぶ人口 3000 人規模の海岸沿いの市街地が壊滅した。壊れた建物の瓦礫は敷きならされ、仮設テントが設けられていた。残された建物は地方政府の庁舎など公的施設のごく一部であり、これらも使用不可能な状態で、移転が始まっていた。また、灌漑排水路の下流部に堆砂がみられた。Hikkaduwa で比較的被災の少なかったワンデイボートも 250 隻、それより沿岸で操業される漁船 150 隻がすべて被災しているが、沖合で操業されるマルチデイボートは 14 隻中 4 隻の被災にとどまった。海岸構造物は、栈橋の基部の天端が揚圧力を受け被災したのみである。

e) Kirinda

Kirinda 漁港では、冷蔵庫、製氷プラント、市場、管理事務所など陸上施設が全壊した。漁港内に停泊していた浅瀬船が陸上奥深くまで流され座礁している。浸水高さは概ね 7～8 m 程度と推測される。一方、海岸施設は、防波堤の被覆石の転落が見られるものの、機能に影響はない。なお、閉塞していた港口部が津波により開削されており、港口の再開塞の兆しが見られるものの大型の漁船も入港可能となっていた。

f) Yala (本地点のみ 2 月 28 日に調査)

南海岸では岬に挟まれた砂浜が連続し、南西から入射する卓越波に対して高さ 8～10 m のデューンが発達して

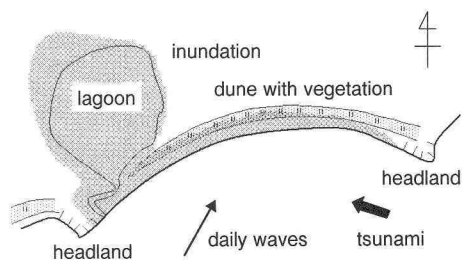


図-1 南海岸におけるデューンの発達と津波の氾濫

いる (Swan, 1982)。図-1 に示すように、それぞれの岬の直ぐ東側ではデューンが低くなり、ラグーンに接続する河川が低平地を形成していることが多い。先述の Hambantota でもこの低平地の部分に市街地が広がっており、大きな被害をもたらした。Yala でもこの低平地を中心として大規模な氾濫が見られ、観光施設はもとより樹林やラグーンにも大きな被害が生じた。津波の最高痕跡高は 11.3 m であり、樹木の倒壊方向はほぼ西向きであるが、東向きに倒壊しているものも見られ、複数の波向きからの津波が来襲していることが示唆された。

(2) 東海岸及び北海岸 (1 月 24 日～26 日)

スリランカ東部及び北部は、少数民族の独立運動が続いている地域であるため、西部・南部と比較して社会資本の整備は著しく遅れている。一方、地形的には北向きの沿岸漂砂が卓越し、海岸にはバリア砂州が発達している。そのため、砂州の上の低平地に住宅地が形成されている地域が多い。なお、北端部の Point Pedro より西側では、小規模な家屋の破壊など被害は限定的であった。

a) Pottuvil

Arugam 湾に架かる延長 170 m の 4 径間トラス橋が、写真-2 のように橋脚のひとつが洗掘を受けて傾き、トラスにねじれが発生するとともに、一方の橋台が亡失し、取り付け部の別の橋もアクセス道路の土台ごと流出した。

b) Kalmunai

津波により、海岸際の一つの集落が流出している。こ



写真-2 洗掘を受けた橋脚と流出した橋台



写真-3 集落の流出跡と残された井戸



写真-4 大きな波力により幹から折れた樹木

の地域では、砂地盤の上にあまり深くない基礎を設け、建築物が設けられている。写真-3 に井戸の周りの洗掘痕跡が残っているが、洗掘深さは概ね110 cm 程度である。そのため、津波により基礎の洗掘、地盤の土砂移動が生じた場合には洗掘深さより基礎が浅いと建築物は跡形もなく流出していると推測される。

c) Batticaloa

Batticaloa のバリア砂州では、大きな津波の波力を直接受けたものと思われ、Kalmunai と同様、一つの集落全体が津波により流失した。この程度まで津波の外力を受けると、その痕跡すら見つけるのが不可能である。破壊された構造物は、砂州の内陸側のラグーンに押し流され、ラグーンの底に沈んでいる状況である。そのため、ラグーンで漁業を営んでいた漁民は網を打てないため操業不能となっていた。ラグーンを乗り越えた津波は、さらに陸側の地域も直撃し、建築物に被害を与えている。

d) Trincomalee

港湾の背後地で浸水被害があり、関連施設が浸水したものの、岬に囲まれた湾内で波の力は弱かった模様で、港湾や漁港の土木構造物はほとんど被災していない。港湾の岸壁はほとんど浸水せず機能は正常であった。沖合いには海底谷が存在しており、後述の数値計算でも確認される様に波向きが発散する場所であることも被害を小さくした一因と考えられる。一方、近隣の Kinnyai 地区では、湾が津波の来襲した東に開いており、家屋の破壊が著しい。Kinnyai での津波の痕跡高さは概ね4 m 程度であった。

e) Mullaittivu

街が海岸線に沿って連続的に形成されていたことから、被災の範囲が海岸線に沿ってみられる。写真-4 のように海岸際の樹木が内陸側に向かって爪楊枝のように折れており、大きな波力が加わったことが推測される。約3000人が死亡するなど街そのものが壊滅的な打撃を受けており、行政機能そのものも停止している。もともと開発の遅れた地域であるので、海岸施設は存在していない。

以上のように、スリランカ全島規模の調査により、被害が局所集中する傾向にあったこと、東海岸バリア砂州上では広域洗掘が被害を大きくしたこと、西海岸では複数の波が波高を増しながら来襲したこと、一部を除いて海岸施設の被害は軽微であったことなどが被害の特徴であることが明らかとなった。

3. 津波の数値計算

(1) 計算の条件と方法

海底地形データとしては、NGDC (NOAA) の2分刻みの海底地形データおよびこれを補間して陸上データと結合した30秒刻みのデータ (University of Alaska, GINA) から東経70度から84度、北緯2度から12度までの領域を切り出して利用した。数値計算には、Bousinesq 方程式による Sato (1996) のモデルを用いた。摩擦項は Manning の粗度係数を用いて定式化し、粗度係数 n の値は $n = 0.026 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ とした。スリランカ島周辺の挙動を詳細に検討するため、直交直線座標系で30秒格子 ($dx = dy = 925 \text{ m}$) とし、陸上への遡上、碎波は考慮していない。入射津波は東経84度線から西向きに一律な波高で入射させ、側方境界以外は無反射境界とした。単純な入射波による津波の挙動を議論するため入射波は押し波一波とし、次式で与えた。

$$\eta_i = a \sin^2(\pi t/T), \quad (0 \leq t \leq T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

入射波高は波源域を含む線形理論による計算結果などを参考にして $a = 1.0 \text{ m}$ 、相当周期は $T = 30$ 分とした。計算時間は300分間である。

(2) スリランカ島周辺の海底地形と津波の変形

図-2 は、島周辺の海底地形と津波の集中・発散を、海岸における最高水位とともに示したものである。スリランカ島は、周辺を陸棚とそれに続く急勾配斜面で囲まれていることが特徴である。津波の集中・発散図は、押し波により水位が入射波高の30%を越えた時刻における流速の方向として波向を定義し、入射境界から出発して

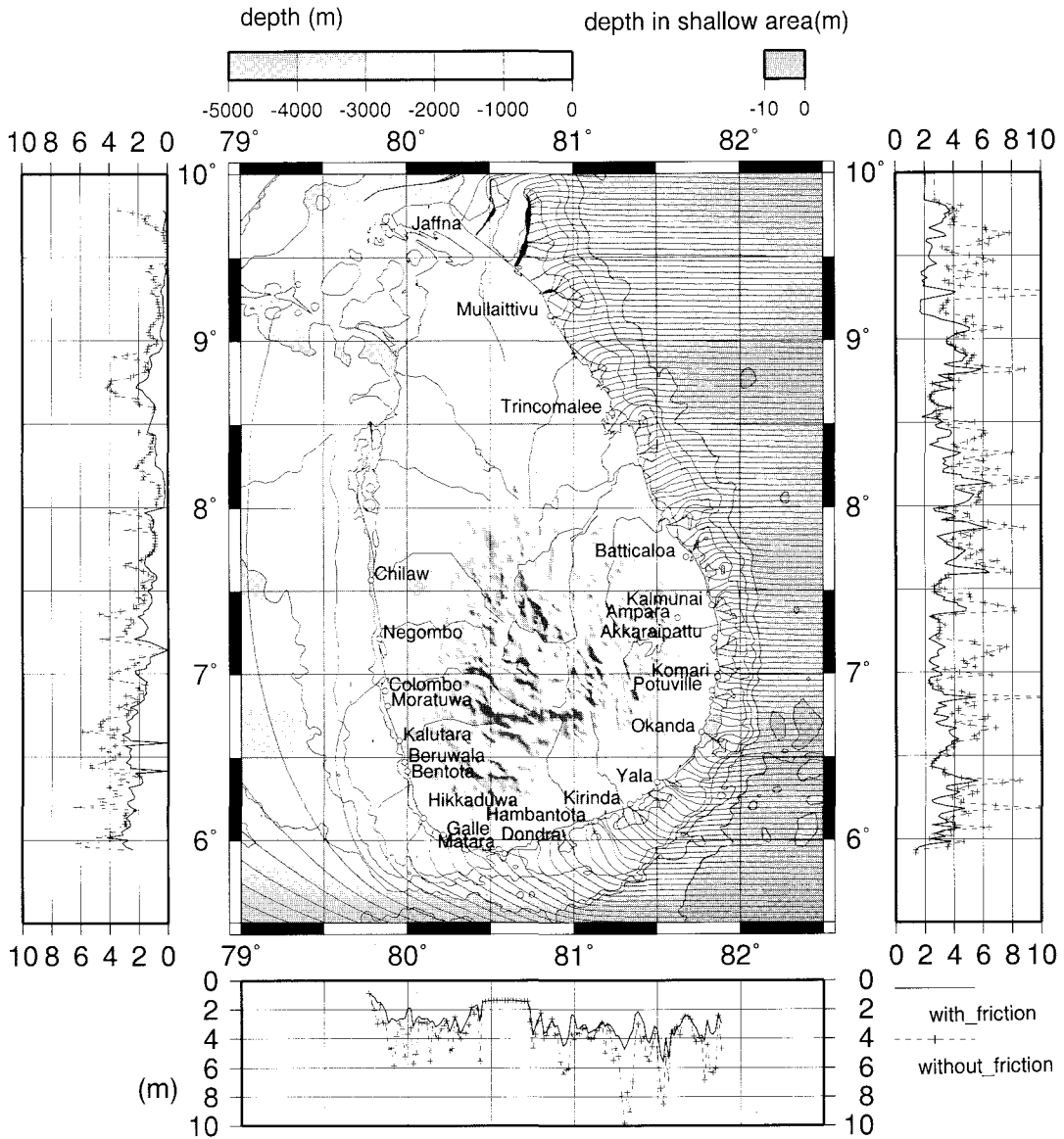


図-2 津波の集中・発散と海岸における最高水位の分布

それらを接続したものである。Mullaitivu, Batticaloa, Yala, Kirinda など波の集中が見られるうえ、島の西側にも回り込む波が確認できる。

最高水位は、波が集中する地域で高いことが確認できる一方、Ampara 周辺などでは水位が低い。Ampara 周辺は、海に向かって張り出している地形であるため、本来であれば波の集中が見られて水位が高くなるはずである。最高水位のこのような低下は、Trincomalee 周辺や Mullaitivu 北部でも見られる。このような領域に共通するのは、海底地形が特徴的で、水深10 m より浅い陸棚が沖合い数十 km まで張り出していること、および、

これらの浅海域の沖側は水深約4000 m までの急勾配斜面に接続していることである。このような地形では、沖側斜面で波が反射し、海岸側に入射する波のエネルギーが低減されること、および、数十 km におよぶ陸棚上において摩擦により波が減衰すること、の二つの機構により海岸に到達する津波波高が低くなることが予想される。図-2 に+印つきの点線で示したのは、海底摩擦項を無視した計算値である。最高水位の低下が見られた上述の地域では、海底摩擦を無視した計算では他の領域と同程度の水位となっており、陸棚における海底摩擦による波の減衰の影響が大きいことが確認できる。

急勾配斜面の存在による波の反射の影響を検討するため、仮想二次元水路における数値実験を実施した。最高水位の低下が見られた地域では、水深約10 m 付近から水深約4000 m まで接続する勾配1/10程度の急勾配斜面が見られる。そこで、海岸側水深 h_1 を10 m~200 m、海側水深を4000 m とし、その間を接続する斜面の勾配 s を変化させて、相当周期 $T=30$ 分の押し波に対して入射波 H_i 、反射波 H_r 、透過波 H_t の波高を評価した。斜面による反射や透過の影響を純粋に抽出するため、底面摩擦は考慮せずに計算した。計算結果を示した図-3によると、Ampara 前面の条件に相当する $h_1=10$ m、勾配1/10の条件では振幅比で定義した反射率が80%以上となり、かなりのエネルギーが反射されていることが確認できる。スリランカは全島規模で深刻な被害を受けたが、急勾配斜面と広い陸棚浅瀬という自然地形の存在が特に東部海岸における津波の減勢に大きな効果があったことがわかる。

このような波の反射と陸棚による増幅・減衰機構は、津波の周期にも影響を与える。今回の計算では、入射波は単純な押し波一波として与えているが、海岸周辺では屈折や反射・陸棚上の捕捉の影響を受けていくつかの波が観測されることになる。海岸前面に複雑な浅瀬地形が

広がっている Jaffna, Batticaloa, Yala, および西海岸では、入射波が押し波一波であるにも関わらず複数の波が見られ、複雑な地形が津波の周期にも大きな影響を与えていることが確認できた。

4. おわりに

本研究の結論は以下のように要約される。

(1) スリランカ全島規模の現地調査により、局所集中化した被害、東海岸バリア砂州上での広域洗掘、西海岸での複数の来襲波の存在など、スリランカにおける被害の特徴が明らかとなった。

(2) Boussinesq 方程式に基づく数値計算により、津波の変形には島周囲の陸棚と急勾配斜面の存在が大きく影響することが明らかとなった。これら特徴的な地形による波の反射、屈折、減衰、捕捉を考慮した津波予測が重要である。

スリランカでは南部を中心に砂浜海岸が多く、その地形形態や変形が津波被害と密接な関連があることが特徴的である。人工デューンの活用や海岸侵食対策など砂浜の保全対策の推進が津波対策としても有効であると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、科学技術振興調整費緊急調査研究により実施した。現地調査では、PCI の Jayaratne 博士、Moratuwa 大学の Saman 博士をはじめ多くの方々の協力を得た。また、波源域を含む計算結果は東京大学地震研究所行谷祐一氏より提供いただいた。合わせて謝意を表する。

参 考 文 献

- 細川恭史・福濱方哉(2005)：インド洋津波災害国際緊急援助隊派遣報告，土木技術資料，第47巻4号，pp. 4-9。
 Sato, S. (1996): Numerical simulation of 1993 Southwest Hokkaido earthquake tsunami around Okushiri island, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp. 209-215.
 Swan, B. (1982): The coastal geomorphology of Sri Lanka: an introductory survey, Research Series in Applied Geography, University of New England, 182p.

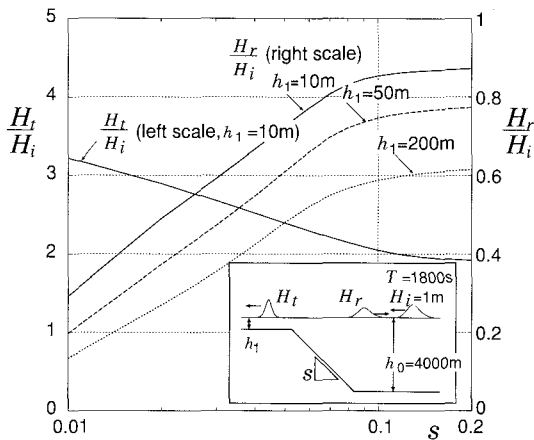


図-3 急勾配斜面による津波の透過と反射