

インド洋地震津波によるスリランカ南西部海岸の被害集中機構

鯉淵幸生*・本田隆英**・Thisara WELHENA***
Suminda RANASINGHE****・佐藤慎司*****

インド洋地震津波によるスリランカ南西部における被害実態とそのメカニズムを明らかにするため、現地調査を実施し、浸水遡上高分布や建物の被害状況を分析した。この際デジタルビデオと GPS を同期させることで、広範囲に及ぶ被害を短期間に収集した。南西部海岸は、数 km ごとに岬が連続する砂浜で構成され、海岸には漁港、海岸保全施設、観光ホテル群などが存在する複雑な海岸である。津波は、海底地形の影響とともに、これらの陸上地形・施設の影響も受けて氾濫するため、被害は陸上で津波の挙動と密接に関係していた。さらに数値シミュレーションにより、陸棚による津波の捕捉が、これらの地域に大きな被害を及ぼす一因であることを示した。

1. はじめに

2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震による被害はインドネシア国内にとどまらず、インド洋全域に未曾有の災害をもたらした。USGS (2005-05-11参照) によれば、本震のマグニチュードは9.0、震源深さはおよそ30 km で、すべり断層の全長は1,000 km 以上と報告されている。断層は北北西から南南東に延びており、東側が西側に乗り上げるようにずれた。これにより津波が発生し、東方には引き波から始まる津波、西方には押し波から始まる津波が伝播したといわれる。

震源地からスリランカまでの距離はおよそ1,400 km であり、地震発生からおよそ2時間半でスリランカ東部海岸に津波が到達した。スリランカにおける死者は3万5千人以上、浸水世帯数は20万棟に上る。スリランカでは人口の2/3が、また GDP の60%が沿岸域に集中しており、鉄道・道路などのインフラ施設や観光ホテル、漁港などの重要施設に対して、特に被害が深刻であった。

本研究ではきわめて広範囲にわたる被災地の中でも、特にスリランカにおいて調査を実施した。これはスリランカが震源から遠く津波被害のみが発生しており、被害原因の特定が行いやすい特徴があるためである。特に津波伝播特性ならびに被害集中機構を明らかにするため、浅海部での津波の変形が複雑に重合ったスリランカ南西部海岸(図-1 参照)を中心に2005年2月24日から2005年3月3日まで詳細な現地調査を実施し、分析を行った。

2. スリランカにおける津波伝播特性

(1) 津波高と津波到達時刻

当調査隊が現地調査を実施するまでに、すでに他調査団によりスリランカ南部において数地点で津波浸水高が計測されており(例えば細川ら, 2005)、当調査ではこれらの計測地点を補完するように、例えば Colombo 以北においても海岸付近での津波高を計測した。これはそのような地域において津波被害が小さく、他の機関による調査が実施されていなかったためである。その際、津波高の評価には津波浸水高を用いた。津波浸水高は、津波により建物壁面に付着した泥水などの痕跡位置を基準海面高から計測した。これは必ずしも津波の最大浸水高を示すとは限らないが、実際に現地で計測を行った際に最大浸水高の情報が限られていること、住民の証言から最大浸水高を計測した場合に、ばらつきが著しく大きかったことから、より客観的で、かつ沿岸域における被害状況と物理特性の因果関係を説明し得るものとして浸水高の計測を実施した。

スリランカ南岸から西岸について、津波浸水高を証言から得た津波到着時刻とともに図-1 に示す。南東部海岸の Yala 国立公園では、津波による樹枝の折傷が確認でき、これに基づく汀線からの津波浸水高は約11 m であることが分かった(写真-1)。また南部 Matara の津波浸水高は3.7 m 程度と比較的小さいことが分かる。さらに南西の Galle 付近の津波浸水高は5 m 程度と Matara より西部で再び増加する傾向にあり、Hikkaduwa 周辺では6 m を記録した地点があった。西部海岸の Negombo 北部では死者数が若干名であったものの、沿岸域で2 m 程度浸水し(写真-2)、建造物などに大きな被害が現れていた。

津波到着時刻については、第一波の到着時刻は、東部海岸で9:15 am、南部海岸で9:20 am であった(いずれもスリランカ現地時間)。およそ20分後に第二波が到達し、その後もいくつかの波が到達している。特に沿岸

* 正 会 員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究
科環境学専攻

** 正 会 員 東京大学助手 大学院工学系研究科社会基
盤学専攻

*** 東京大学修士課程 大学院新領域創成科学
研究科環境学専攻

**** 東京大学修士課程 大学院工学系研究科社
会基盤学専攻

***** フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科社
会基盤学専攻

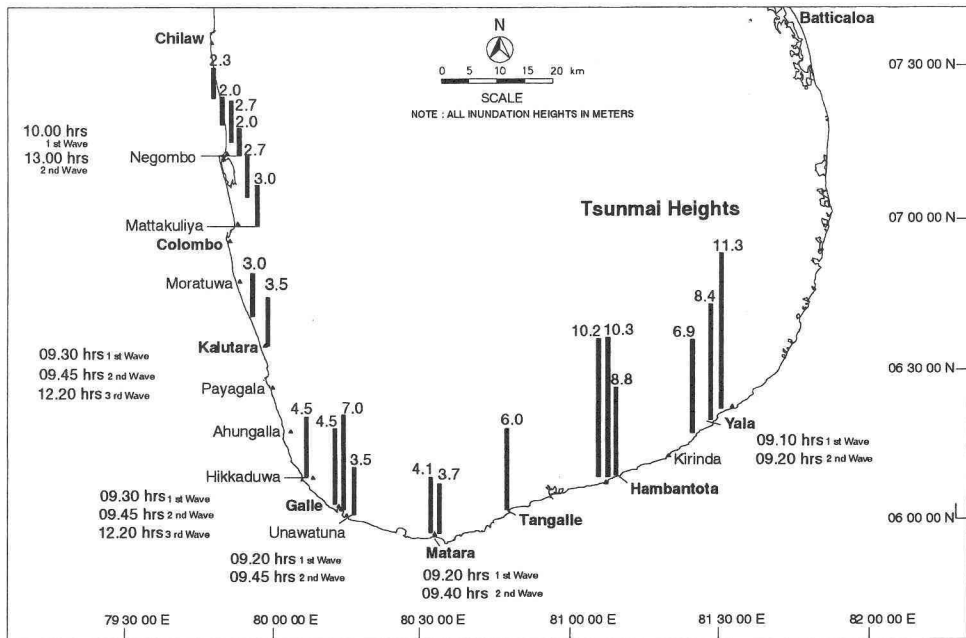


図-1 スリランカ南部における津波浸水高(m)と津波到達時刻

域低水地では、第一波により約2 m程度の浸水があったことが分かっている。一方、南西部に位置する Hikkaduwa では、9 時25分を示したまま壊れた時計が見つかり、他の証言でも9時半ごろ第一波が到達したとみられる。この地点における証言によると、主に第二波により各地で甚大な被害を被った。この際、津波の侵入方向は海から陸へと進むような東向きではなく、北から来襲したとする証言が多い。特に Hikkaduwa 以北の西部海岸では複雑な波の重合が発生し、屈折、回折した波が到達したとみられる。西岸の Negombo における到着時刻は、第一波が10:00、第二波が13:00であった。この際、西部海岸では海岸沿いの居住者でさえ、これらの波を感じることはなかった。到達波の岸向き時間が長く、「波」というよりは海面が全体的に上昇、低下したとの証言もある。しかし、西海岸では12:20から1:30にかけて再び大波が来襲し、これにより甚大な被害を被っている。

津波の高さと後続波を含めた到着時刻を合わせ見ると、スリランカ東部海岸では津波が直接来襲したため波高が大きく、南部海岸では主に沖側で西方に進行する津波の屈折波が到達しており、南西部海岸では屈折、回折、場合によってはエッジ波が複雑に重合した多重反射波が到達していることが想定される。

(2) 南西部海岸の被害状況

西海岸における被害は、南から順に、Galle, Hikkaduwa, Telwatte, Beruwala, Payagala など深刻であった。

そこで、Unawatuna から Ahungalla までの区間において、海岸に沿う道路を低速で走行しながら道路の両側をデジタルビデオカメラで撮影し、被害の程度と海岸地形の関係を明らかにすることにした。デジタルビデオカメラはGPSと同期し、後の解析に用いた。図-2に Unawatuna から Ahungalla までの調査結果を示す。Galle 北側では、間欠的に全壊家屋が分布している。このように深刻な被害はある間隔をおいて集中して現れる傾向があり、これは岬と岬の間に地盤高が低い地域が間欠的に存在すること、また岬全面の海底の効果により、波の集中が一定間隔で起こるためである。このように南西海岸における深刻な被害はある間隔をおいて集中して現れる傾向があり、

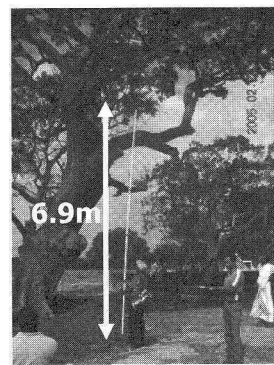


写真-1 津波による樹枝の折傷 (Yala)

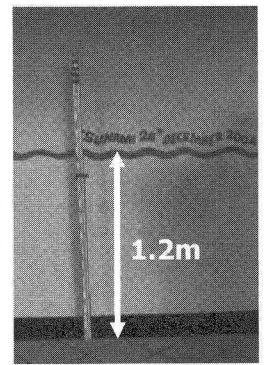


写真-2 観光ホテルに示された津波浸水高 (Negombo)

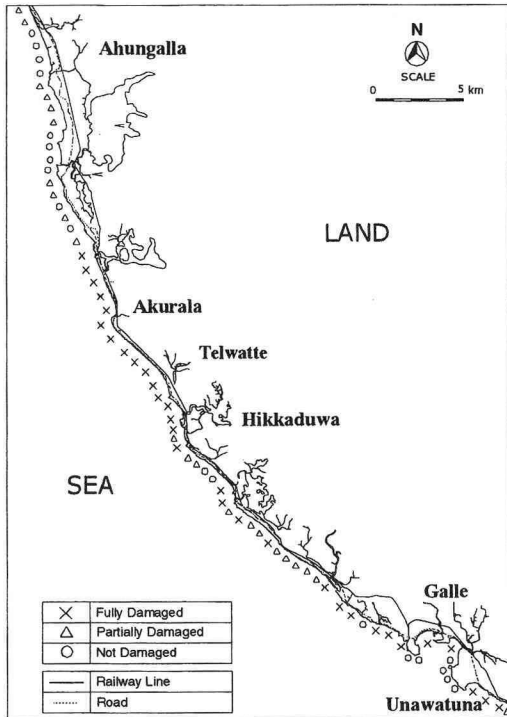


図-2 Unawatuna から Ahungalla までの被害状況

岬が連続する海岸地形との関係が示唆された。

一方 Hikkaduwa では特に多くの全壊家屋が確認された。Hikkaduwa は河口に位置することから地盤高が低く、このため他域に比べて被害が大きく現れたと考えられる。Hikkaduwa は南西部海岸でもっとも被害が深刻であった地域であり、漁港やそれに関連する離岸堤、比較的堅固なホテル、河川の河口や鉄道の線路などが狭い範囲に集中しており、さらに Hikkaduwa の北側には珊瑚礁が分布していることから、上記のような数 km スケールの地形影響とあわせて、局所的な影響因子についても検討を行った。

3. Hikkaduwa での現地調査結果

図-3 に Hikkaduwa 周辺の詳細な被災状況および線路沿いで計測した津波浸水高の分布を示す。証言によると、津波はこの地区の南西および北西から来襲したと言われている。写真-3 は Hikkaduwa 漁港において被害を受けた建物の一例である。写真右側がすぐ船着き場となっており、護岸に対して直角の向きにある北西側の壁が崩壊し、柱だけ残存している。また屋根の変形は北西からの津波の来襲によるものと考えられる。もちろん建物強度が不均一であったことも可能性として残されるが、このような被害状況は、津波が北西や南西から来襲したとする証言と一致している。同様の被害状況は写真-4 に示す漁

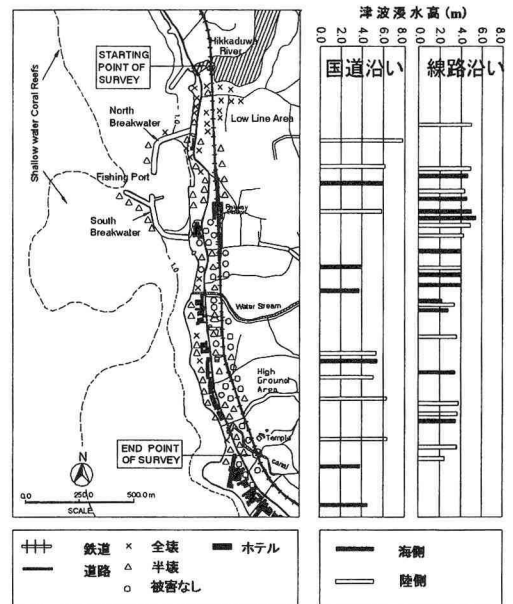


図-3 Hikkaduwa における詳細な被害調査結果と津波浸水高の分布



写真-3 Hikkaiduwa 漁港で一部破損した漁港施設



写真-4 Hikkaiduwa 漁港の防波堤



写真-5 Hikikaduwa の河口周辺での被害の様子

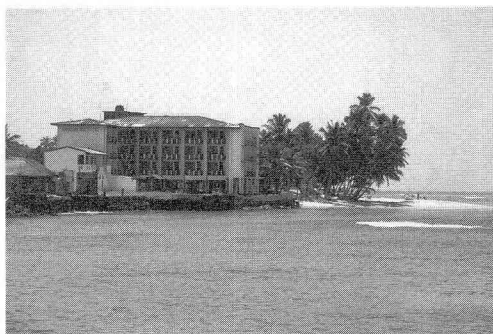


写真-6 Hikikaduwa 沿岸の様子

港の防波堤にも見られ、岸と直角方向に近い護岸の巨石(推定 1 t) だけに移動した形跡が確認され、岸と平行な護岸の損傷は軽微であった。また、河口付近の地域では地盤が低いことに加え、河川を津波が遡上したこともあり、海岸線から 100 m 以上内陸の地点においても建物の被害が見られた(写真-5)。さらに図-3 より漁港の北側の地域においては、海岸沿いに目立った建物が無いため全壊が目立つ。これはこの付近の地盤高が低く長年にわたる侵食により (Swan, 1982), 住居と海岸との距離が比較的近かったこと、ホテル等の堅固な構造物が海沿いにないことが被害を拡大した原因と考えられる。同様に内陸側においては、線路の背後で津波浸水高がほぼ一定となっているが、これは高さ 1 m ほどの敷石を超えた水が陸側に貯まったためと考えられる。一方、線路の海側では津波浸水高が不規則になっているが、海岸沿いに立ち並ぶ観光ホテルが一部被災したものの波を遮蔽し、背後での被害を大幅に軽減させたため、ホテルの有無により波高が大きく変化したためである。写真-6 は、Hikikaduwa 南岸から臨む風景の一例である。南岸はスリランカで唯一の珊瑚礁が生育する地域で、シュノーケリングやダイビングが盛んで、少し南に足を伸ばすとサーフィンが楽しめることから、海沿いにホテルが隣接する人気の観光スポットとなっている。津波によりこれらすべてのホテルは 1 F 部分に被害を受けたものの、建物自身の損傷は小さく、その後背地の住宅は津波の被害を免れた。さらに防波堤背後を北側から見ていくと、北西から入射した波に対して、津波浸水高は減衰し、これに追従するように被害程度も減少している。防波堤(天端高 3 m)を超える波が入射したにもかかわらず、防波堤が津波減殺効果を有していることが確認された。

以上のように Hikikaduwa 地域だけをみても、津波の被害は複雑であり、前述したような岬と岬の間隔で間欠的に被害が増加する現象に加えて、局所的な地形や構造物の影響など、様々なスケールの現象が同時に作用している。さらに岸に対して平行に近い向きで進入した津波

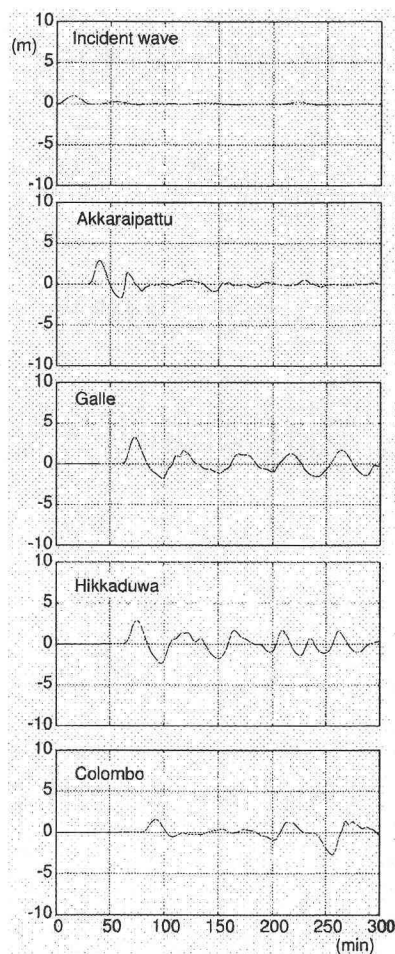


図-4 各地点における水位時系列

に対し、被害が甚大であることが明らかになった。

4. 数値シミュレーションによる津波伝播過程の検討

南西部海岸における現地観測で明らかとなった来襲波の複雑性に対し、来襲波の挙動や発生原因を解明するた

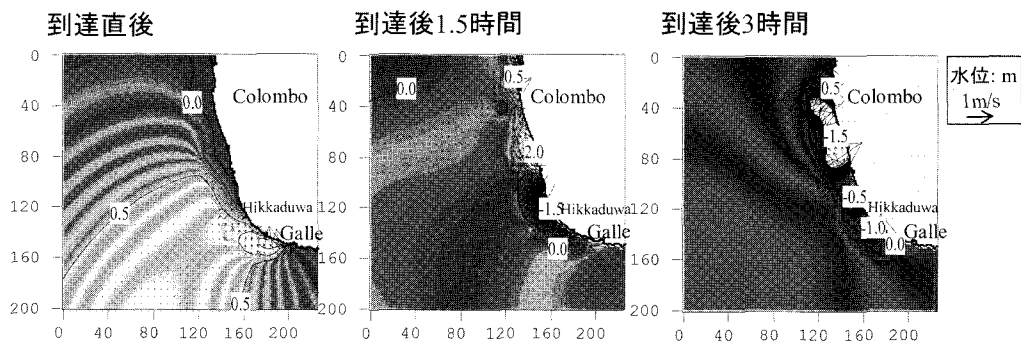


図-5 水位および流速の計算結果（左，到達直後；中央，第一波到達後1.5時間後；右，第一波到達後3時間）

め、津波の伝播過程について数値シミュレーションによる検討を行った。シミュレーションモデルは、Boussinesq 方程式に基づき、計算領域はスリランカ、インド、モルジブを含む広域で計算を実施した（計算の詳細については、佐藤ら（2005）を参照）。

図-4 は、東海岸の Akkaraipattu、南西海岸の Galle から北にかけて Hikkaduwa、Colombo の各地点における水面変動の時系列である。東経84度線と与えた入射波は波高1mの単一の押し波としたため、東海岸の Akkaraipattu では、ほぼ単一の波しか観測されていないが、Hikkaduwa などの西海岸では第一波到達後も複数の後続波が見られる。Colombo で計算開始から200分後に見られる波は、モルジブからの反射波である。さらに Galle および Hikkaduwa の後続波は減衰することなく数回にわたって来襲し、その波高はおよそ3mにも達している。これは屈折、回折によって重合した波が、さらにエッジ波として大陸棚に捕捉された結果と考えられる。また Galle と Hikkaduwa の第一波到達時刻はほぼ同時刻であり、造波開始150分まで両者の水面変動は酷似しているが、200分以降では捕捉された波が陸棚上で多重反射系を形成している様子が見られる。

図-5 は、Hikkaduwa に津波が来襲した直後から水位および流速の分布を時系列で示したものである。到達直後においては、屈折および回折によって南部から伝播した波が、西岸に回り込んでいる様子が見て取れる。到達後1.5時間の分布を見ると、沖合いは平穏になりつつあるものの、南西海岸付近では波高の大きな波が見られ、津波が陸棚上に捕捉されている様子が分かる。この際南部海岸よりも北側の Hikkaduwa 付近において、平均海面からの水位上昇が2mを超える波が確認できる。さらに流速ベクトルより北から南に向かう流れも見られ、モルジブ等から反射した波が、スリランカとインドの間に捕捉され、その一部は北から南の Hikkaduwa 付近に向かいこの付近で重合していると見られる。同様の傾向は、第一波到着からさらに3時間後においても顕著で、

西岸ではなおも水位が高い状態が維持され、他の地点ではほぼ0なのに対して、Hikkaduwa 付近では1.5mに達している。このように、スリランカ南西部海岸に回りこんだ津波は、陸棚斜面の影響を受けて集中するとともに陸棚上に捕捉され、多重反射系を形成することにより局所的に被害を集中させたと考えられる。

5. ま と め

スリランカ南西部海岸に回りこんだ津波は、陸棚斜面の影響を受けて集中するとともに陸棚上に捕捉され、多重反射系を形成することにより局所的に被害を集中させた。これにより通常の波では起こらないほぼ沿岸方向からの津波の来襲が被害を増大させた。また被害の集中箇所は、岬間の中央部付近の低平地に見られることが多く、数kmスケールの海岸地形に支配されるとともに、比較的局所的な防波堤や鉄道・ホテルなど海岸付近の構造物により津波被害が軽減されたことが確認された。

謝辞：本研究の一部は、科学技術振興調整費緊急調査研究および河川整備基金助成事業により実施したことを付記する。

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。
- 佐藤慎司・細見寛・細川恭史・福濱方哉(2005)：スマトラ沖地震津波のスリランカにおける被災実態，海岸工学論文集，第52巻，印刷中。
- USGS：Magnitude 9.0-SUMATRA-ANDAMAN ISLANDS EARTHQUAKE OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA（オンライン），<http://earthquake.usgs.gov/eqint-henews/2004/usslav/>，参照2005-05-11。
- Swan, B (1982)：The coastal geomorphology of Sri Lanka: an introductory survey, Research Series in Applied Geography, University of New England, 182p.