

インド南東部におけるスマトラ沖地震津波の被災調査

原田賢治¹・沖村 孝²・鳥居宣之³

2004年に発生したスマトラ島沖地震津波により、インド洋沿岸国は津波により甚大な被害を受けている。これまでに、多くの調査団によりインドネシア、タイ、スリランカについて現地調査が行われそれぞれに有益な情報が得られている。インドについては、他の国に比べ情報が少なく、津波の来襲状況、被災状況は十分に把握されていない。本研究では、インドに來襲した津波の状況や被災状況について、現地研究者と協力し、現地調査を行った。これにより、地形変化や海岸植生による津波への効果などの事例について検討を行った。さらに、1分グリッドの海底地形を用いた数値シミュレーションにより津波の特徴について検討した。

1. はじめに

2004年スマトラ沖地震津波はインド洋を横断し、インド洋沿岸各国へ甚大な被害をもたらした。現在もその影響を被災社会に強く残している。インドネシア、タイ、スリランカについては、多くの研究者により精力的に現地調査が行われ多くの報告が日本国内外で得られている。しかしながら、インドにおいては、10mを超える津波が来襲し、甚大な被害を社会にもたらしているにもかかわらず、他の被災地域と比べ調査研究の情報が少ない状況にある。そこで本研究では、インドにおけるスマトラ沖地震津波の来襲状況・被害の状況を把握する事を目的としている。特に津波による被害が大きかったインド南東部について現地調査を実施している。インドでは、被災直後に現地研究者による調査が行われているので、情報協力を得ながら調査を行っている。この現地調査により、津波によるいくつかの影響について整理することでインド南東部における津波来襲・被害の実態を把握する。加えて、インド南東部を襲った津波の特徴をとらえるために、1分メッシュの海底水深データを用いてインド洋を横断する津波の来襲特性について検討を行った。特に、インド洋ベンガル湾から沿岸部へと続く陸棚による急激な水深変化により反射される津波の影響について検討を行う。

2. 現地調査

(1) 調査概要

現地調査は、2005年9月23日から25日(3日間)の期間で行った。調査地域は、インド共和国南東部のTamil Nadu州沿岸部を対象とし、北からPlicat, Ennore, Channai(Madras), Mahabalipuram, Pondicherry, Cuddalore, Pichchavaramを中心とした地域とした(図-1)。

現地調査と合わせて、Channai (Madras)にあるAnna大学とインド工科大学Madras校(IIT, Madras)からスマトラ沖地震津波来襲直後に行った現地調査に関する情報およびインドにおける津波研究に関する情報の提供を受けた。さらに、Anna大学からは、今回の現地調査に対する調査協力を得ている。

調査内容としては、現地住民に対するヒアリングと津波痕跡から、沿岸部への津波の来襲状況および被害状況について把握を行った。なお、調査地域における津波高、浸水範囲については、被災直後に行われた現地研究者らによる広範囲に渡る現地調査によりすでに報告がなされている(Lakshumananら, 2005)ため、必要に応じて浸水深、浸水距離を計測した。

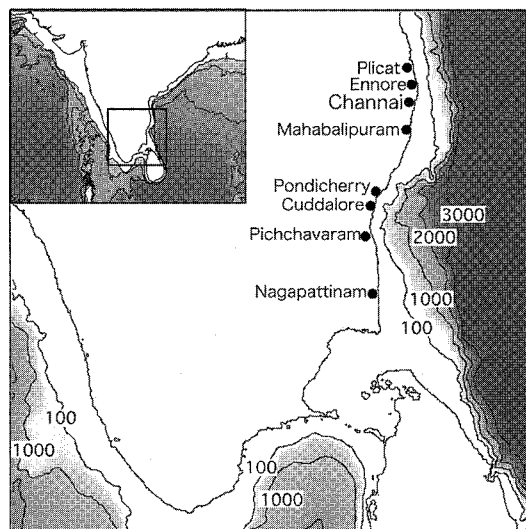


図-1 現地調査地点

(2) インドにおけるスマトラ沖地震津波の概要

a) Tamil Naduにおける遡上津波

Lakshumananら(2005)による津波来襲直後のTamil Nadu沿岸部津波痕跡調査の結果の一部を表-1に

1 正会員 博(工) 人と防災未来センター 専任研究員
2 正会員 理博 神戸大学教授 都市安全研究センター
3 正会員 修(工) 神戸大学助手 都市安全研究センター

示す。北部に位置する Channai 周辺では津波高は 2.23~4.51 m, Cuddalore 周辺では 7.55~11.25 m, Nagapattinam 周辺では 4~5 m, インド最南部に位置する Kanniyakumari では 5 m 程度となっており, Cuddalore 周辺でもっとも津波高が高くなっている。また, Cuddalore は Ponnaiyar 川の下流域デルタにあり, 河川を遡上した津波が内陸 1,000 m まで達している。同様に, Nagapattinam, Velanganni は Cauvery 川の下流域デルタ地帯にあり, 沿岸部は標高数 m の低平地となっているため, 内陸まで津波が進入している。

b) 津波による被害の概要

津波による死者は Pondicherry で 107 名, Cuddalore で 617 名, Nagapattinam で 6,065 名であり, インド全体では死者 8,607 名となっている (表-2)。Nagapattinam 地方は, インド洋に面して延長 150 km 以上の長い直線海岸線を持つ地方 (District) で, 海岸線から約 5km までは標高 5m 以下と非常に低い地域が続くという地形的条件であるため, 防潮施設が無い海岸に面した町では壊滅的な被害を受け, インドで最も甚大な被害を受けている。

表-1 Tamil Nadu に来襲した津波 (Lakshumanan ら, 2005)

場所	Tsunami run-up height (m)	Inundation distance (m)	Note
Nettukuppam	3.16	70	Tamil Nadu 電力の建物の痕跡
Channai	2.27	400	海岸の壁の痕跡
Covelong	5.71	75	建物への痕跡
Periyakalapettaikuppam	6.93	400	被災家屋の壁
Pondicherry	—	25	海岸
Cuddalore	9.08	1,000	家屋の痕跡
Devanampattinam fishing village	11.25	1,000	建物への痕跡
Porto Novo	2.23	1,500	壁の痕跡
Nagore	5.81	1,000	建物への痕跡
Nagapattinam port	4.59	500	被災した壁への痕跡
Velanganni	4.90	1,500	壁の痕跡
Kanniyakumari beach	—	700	家屋の痕跡

表-2 津波による被害 (Lakshumanan ら, 2005)

District	Affected population	Lives lost	Houses/huts damaged
Channai	73,000	206	17,805
Pondicherry (Pondicherry State)	26,000	107	3,901
Cuddalore	99,704	617	15,200
Nagapattinam	196,184	6,065	39,941
Kanniyakumari	187,650	828	31,175
Total in India	1,027,996		136,243

c) Channai で観測された津波

インド沿岸に来襲したスマトラ沖地震津波は, The Survey of India (SOI) の潮位計により観測されており (Nagarajan ら, 2006), 潮位補正されたデータは web 上で公開されている。観測された地点は, Paradip, Visakhapatnam, Channai, Tuticorin, Kochi Mormugao, Okha の 7 地点である。その他に, Car Nicobar と Nagapattinam にも潮位計があったが, 津波による被害を受けたため津波来襲時の計測はされていない。図-1 に Channai において観測された津波の時間波形を示す。Channai での津波の第一波は押し波で 0.64 m (3:40UTC, 8:40IST), 最大振幅は 1.90 m (8:25UTC, 13:25IST) である。Nagarajan ら (2006) のスペクトル解析によると, Channai での観測津波は 60~120 分の周期の津波が約 7 時間 (3:30~11:00UTC) の間, 繰り返し来襲していた。Channai での津波の遡上痕跡は表-1 から 2.27 m であり, 潮位計で観測された最大振幅の 1.90 m と比べて妥当な値である。

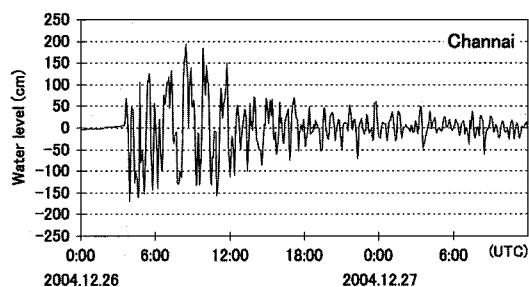


図-2 Channai で観測された津波の時間波形

(3) 調査結果

a) 海岸地形の影響

Tamil Nadu 州のベンガル湾に面する東側海岸部は, Ponnaiyar 川, Cauvery 川といったデルタによる大規模な低平地となっている。これらの河川の河口部ではラグーンや砂嘴, 砂州が多く見られ, その周辺では砂丘が発達している。Channai と Mahabalipuram の中間に位置する Vadanemmeli では, 砂丘が発達しており, 砂丘頂部は海岸線から約 500 m, 標高は 5~6 m であり, 幹線道路が整備されその周辺に集落がある。この砂丘により, 津波は海岸線から約 250~300 m の所までで止まっており, 集落や道路にまでは達しておらず被害が無かった (図-3, 写真-1)。また, Channai の北に位置する Ennore の漁村においては, 海岸線から約 150 m の周囲より 2~3 m 標高が高い砂丘上に人口 50 名程の漁村集落があるが, 来襲した津波が 1.5 m 程度であったため津波による被害・死者はなく, 約 90 m 離れた標高が低い土地に位置するブロック造の住宅では, 基礎部が約 50

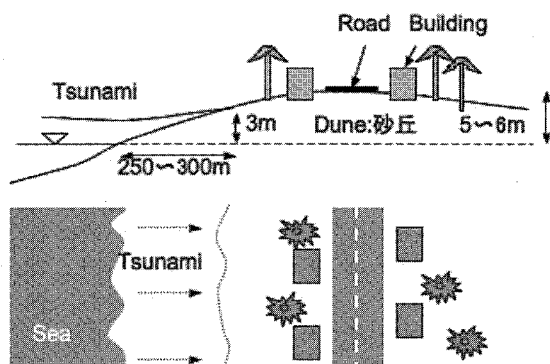


図-3 砂丘による津波への影響

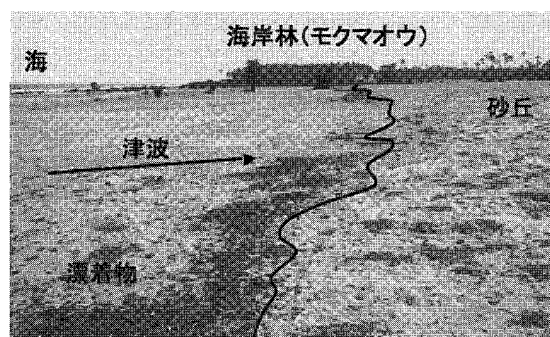


写真-1 Vadanemmeli での砂丘上における津波痕跡

cm 洗掘され傾いた状況にあった。また、津波によって海岸線が 20~30 m 削られたとの証言を得た。これらのような、わずかな自然地形の違いにより、遡上津波による被害の差異が確認された。

b) 津波による地形変化

海岸寺院で知られる Mahabalipuram の北部海岸の砂丘では、今回の津波により新たに発見された紀元 4 世紀ごろの寺院遺跡の発掘が行われていた (写真-2)。ここは、高さ 5~6 m の砂丘が沿岸方向に続く地域であり、津波はこの砂丘を越えるものではなかったが、海岸線から約 300 m の所まで浮遊物の痕跡が残っており、ここでの津波の最大遡上高として確認されている。また、砂に埋もれて存在が知られていなかった遺跡は、海岸線から約 50 m の場所で発見されている。津波により遺跡の発見された海岸線近くでは、土砂移動を引き起こすような流体力が働いたと考えられる。

さらに、すぐ近くの Pudiakaldakkam の漁村では、津波による浸水深は 1.1 m であったが、この地域では一般的なレンガ造り平屋住居建物の基礎部分を覆う土砂が、津波により約 0.4 m 洗掘されていた (写真-3)。特に、海に近い所の建物や海へ向かう通り沿いの建物の海側基礎の角部分周辺で多く見られた。津波による流れが建物



写真-2 Mahabalipuram 北部での津波によって発見された遺跡の状況 (上: 遺跡の発掘状況, 下: 発見された遺跡の外観)

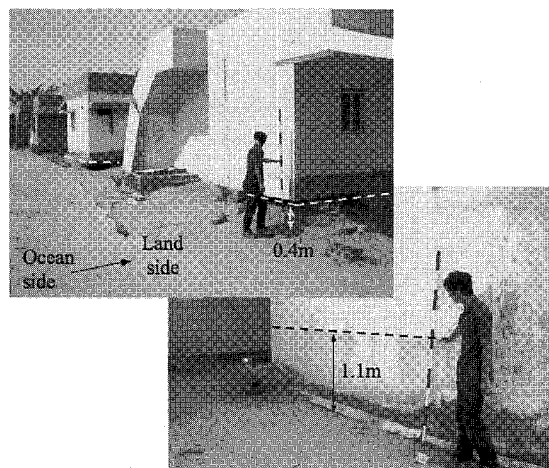


写真-3 Pudiakaldakkam の漁村における、津波による洗掘状況および浸水深の調査

の角部分で速くなり洗掘を起こしたものと考えられる。

c) 海岸樹林帯による影響

Cuddalore の南、Cauvery 川の河口部には、約 12km^2 (3,000 acre), 6 km の海岸線を持つ広大なマングローブ林の Pichchavaram がある。このマングローブ林内の Porto Novo では、津波高が 2.32 m であり、津波の遡上距離は 1,500 m と内陸まで津波が進入しているが、マングローブ林内に点在する集落では大きな被害はなかった。Pichchavaram の広大なマングローブ林には 4,446 の小河川 (クリーク) と 600 の河口があるとされており、この複雑に入り組んだ水路網や広大な低地とマングローブの独特の形状等により、マングローブ林を

通過する津波は、津波高は押さえられるが遡上距離は長くなるという結果をもたらしていると考えられる。また、Finn ら (2005) によると、Cuddalore のマングローブ林において、沿岸部のマングローブの背後の集落とマングローブの様な沿岸植生が無い地域の集落との被害の状況を比較から、津波に対する被害の軽減効果が報告がされており、Pichchavaram のマングローブにおいても同様の効果が発揮されたものと考えられる。また、Maha-balipuram 北部における直線海岸部の砂丘斜面には、樹高約 15 m のモクマオウ (*Casurina equisetifolia*) が幅 100 m 程に渡り生育しており、隣接する下草のみの砂丘部と比べ津波の遡上距離が異なっている事が確認できた。これらを定量的に評価するためには、詳細な検討が別途必要であるが、マングローブ等の海岸林帯により津波が軽減された事を示す事例を確認することができた。

3. 数値シミュレーションによるインド南東海岸へ来襲したスマトラ沖地震津波の特徴の検討

(1) 計算条件

次に、インド南東部へ来襲した津波の特徴を検討するため、地球座標系の線形長波理論を Leap-frog 差分スキームを用いた津波数値計算により数値的にといて解析を行った。数値計算に用いた地形データは、地球全球で整備されている 1 分のグリッドデータ (The General Bathymetric Chart of the Oceans : GEBCO) を用いた。計算領域は、スマトラ沖地震津波の波源を含む南北 4,500 km、東西 6,000 km の範囲とした。津波の初期波形は、越村ら (2005) による、長さ 900 km (500 km, 400 km)、幅 150 km の 2 つのセグメントからなる断層モデルを Mansinha・Smylie (1971) の方法により津波初期波形を求め計算を行った (図-4、表-3)。

(2) 来襲津波の特徴

インド洋津波の後、現地調査により津波痕跡より津波高の調査を行った Lakshumanan ら (2005)、Choi ら (2005) の報告によると、インド南東部では、Cuddalore 周辺で最も津波高が高く、10 m を越える津波高となっている。

津波来襲時の状況として、図-5 に計算開始後 (地震発生後) 2 時間 15 分のインド南東部周辺の津波空間波形のスナップショットを示す。これより、津波の特徴として、インド洋を越えて東側より直接到達する津波第一波成分と、先にスリランカに反射した第一波の反射波成分が、数値シミュレーションの結果より確認する事ができる。Nagapattinam, Cuddalore, Pondicherry へかけては、これらの成分波が同時に重なって沿岸部に来襲している様子が図-5 から確認できる。詳細な地形条件や津波痕跡データを用いた十分な検討が必要であるが、こ

表-3 波源モデル (越村ら, 2005)

	南セグメント	北セグメント
長さ/幅 (km)	500/150	400/150
走行/傾斜角/滑り角 (度)	329/15/90	358/15/90
深さ (km)	10	10
滑り量 (m)	11.0	11.0
基準点 (緯度/経度)	94.8 E/2.5 N	92.0 E/6.5 N

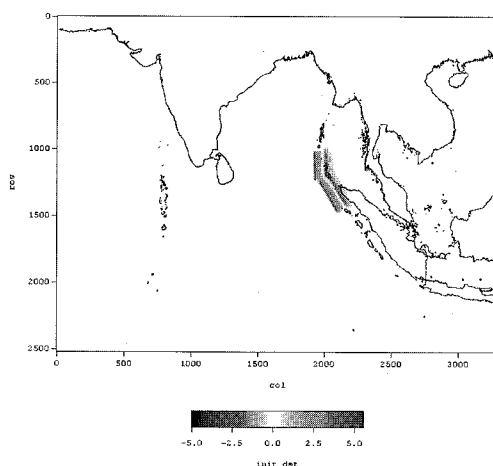


図-4 津波の初期波形

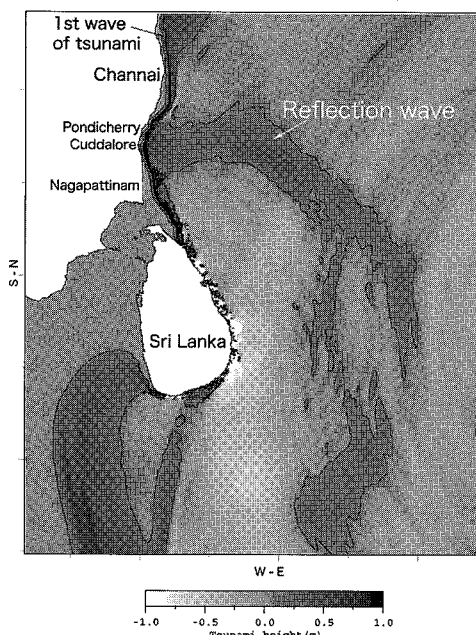


図-5 津波来襲のスナップショット

の第一波とスリランカからの反射波についても津波高が高くなった原因の一つと考えられる。

(3) 海底地形による津波の変化

次に、インド南東部周辺における、海底・陸上地形の

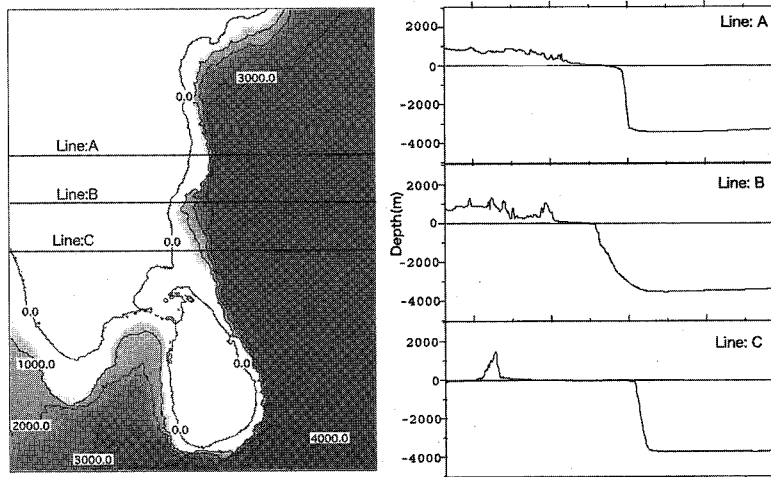


図-6 海底地形断面

東西方向の断面図を図-6に示す。Line:AはChennaiを通過する断面、Line:BはPondicherryを通過する断面の東西方向の水深を示している。Line:Bに見られるように、NagapattinamからPondicherryの沖合では、勾配が比較的緩やかに変化しており、Line:A,Cの様に水深が4,000m近くから数百mまで急激に変化する周囲の断面と異なることがわかる。この陸棚斜面での水深勾配の違いにより、インド洋を横断してきた津波の陸棚での反射率、伝達率が異なる(佐藤ら, 2005; Dean, 1964; Dingemans, 1997)。このことも、沖合の海底勾配が緩やかな領域であるNagapattinamからPondicherryにおいて、津波高が高くなった原因の一つと考えられる。

4. おわりに

本稿では、インド南東部を対象として、スマトラ沖地震津波の来襲状況の現地調査を現地研究者らと協力し調査した結果の報告を行った。海岸地形の影響、地形変化、植生の効果について整理し、インド南東部における被災状況の把握を行った。さらに、数値シミュレーションにより、来襲津波の特徴として、津波第一波とスリランカからの反射波の同時到達の影響とPondicherry周辺沖合の海底地形の影響を津波高が高くなる要因の一つとして挙げた。しかしながら、実際に沿岸部へ来襲した津波は浅海部地形の影響を受けた結果として、実測されている。これを考慮するためには、より詳細な地形条件を考慮した検討による評価が今後、必要であると考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、Anna大学のL. Elango教授、S. Sanjeevi教授、IIT MadrasのV. Sun-

der教授から、現地調査および現地資料についてご助言、ご協力を頂いた、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 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，pp. 1391-1395.
- 越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭(2005)：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1416-1420.
- Choi B. H., A. Siripong, V. Sundar, J. J. Wijetunge and D. Subandono (2005)：Post Runup Survey of the December 26, 2004 Earthquake Tsunami of the Indian Ocean, APAC2005, Sumatra Tsunami Session, pp. 1-20.
- Danielsen F., M. K. Sorensen, M. F. Olwing, V. Selvam, F. Parish, N. D. Burgess, T. Hiraishi, V. M. Karunakaran, M. S. Rasmussen, L. B. Hansen, A. Quarto and N. Suryadiputra (2005)：The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation, Science, Vol.310, pp. 643-645.
- Dean R. G.(1964)：Long wave modification by linear transitions, Journal of waterways and harbors division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.90 (WW1), pp. 1-29.
- Dingemans M. W.(1997)：2.6.7 Reflection of long waves, Water wave propagation over uneven bottoms, World Scientific, pp. 136-143.
- Lakshumanan C., B. H. Choi and M. M. Kumar (2005)：Tele Tsunami-December 26, 2004：Causes and Consequences in Tamil Nadu Coast, South India, APAC2005, Sumatra Tsunami Session, pp. 119-146.
- Mansinha L. and D. E. Smylie(1971)：The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp. 1433-1440.
- Nagarajan B., I. Suresh, D. Sundar, R. Sharma, A. K. Lai, S. Neetu, S. S. C. Shenoï, S. R. Shetye and D. Shankar(2006)：The Great Tsunami of 26 December 2004：A description based on tide gauge data from the Indian subcontinent and surrounding areas, Earth Planets Space, vol.58, p. 211-215.