

モルディブにおけるインド洋津波の現地調査

藤間功司*・嶋原良典**・富田孝史***・本多和彦****・信岡尚道*****
越村俊一*****・藤井裕之*****・半沢 稔*****
辰巳正弘*****・折下定夫*****・大谷英夫*****

2004年12月26日に発生したインド洋津波は、震源から2,000 km 離れたモルディブでも人的・物的に大きな被害をもたらした。そこでモルディブで現地調査を行った結果、モルディブの痕跡高が0.6-3.4 m 程度であること、リーフが発達している場所でも必ずしも痕跡高が小さくなっているわけではないこと、また南マレ環礁で複雑な流れが観察されており、環礁内の津波の挙動が複雑であることなどが分かった。モルディブの津波に対する安全性を高めるには強固な構造物や人工地盤などの整備が必要である。

1. はじめに

スマトラ沖地震は、2004年12月26日05:58 (モルディブ時間)に発生した。スマトラ沖地震により発生したインド洋津波はインド洋全域に伝播し、多くの地域に甚大な被害をもたらした。

モルディブは震源から2,000 km 離れており、検潮記録によると、津波は約3時間後の9時過ぎにモルディブに到達している。北部の Hanimaadhoo, 中央部の Fulhule (首都 Male' の隣の空港島), 南部の Gan といずれも寄せから始まっており、第1波が最大で周期は30-45分程度である。津波による最大偏差は Hanimaadhoo で1.7 m 程度, Fulhule で1.5 m 程度, Gan で1 m 程度である。このように、インドネシアやタイなどに比べると津波の高さはモルディブでは決して大きくなかった。

しかしモルディブは最大標高がわずか1.8 m の環礁島で国土が構成されているため、インド洋津波がモルディブ社会に与えた影響は大きい。モルディブでの人的被害は死者82名, 行方不明26名である (2005年4月1日現在)。また被害を受けた建物は4,000箇所、12,000人以上が家を失った。12月26日に限れば、全人口29万人中3万人が避難していた。外国人観光客がいるリゾートも、

全87箇所のうち19箇所が大きな被害を受けた。ただし、外国人の死者は4名で、ほとんどの人的被害は Meemu 環礁, Dhaalu 環礁, Thaa 環礁, Laamu 環礁といった、首都 Male' より南にある住民島で発生した。1月10日の時点では、13の島で住民が島外に避難していたという。その他、26の島で停電し、188の島で一時的に通信不能になり、Male' 国際空港も約10時間閉鎖された。地下水が塩水になってしまったのも住民にとって大きな被害である。

しかも、モルディブでの津波来襲時の潮位は ± 10 cm 程度とほぼ平均海面であり、もし満潮時であればさらに甚大な被害となっていた危険性もある。生存者の中にも一旦海に流された人が多くいたことから、危険水準の限界近くであったと考えられる。

加えて、震源とアフリカの中央にあるモルディブはインド洋津波の全体像を把握する上で重要な位置にあるが、環礁での津波の挙動特性はよく分かっていない。そこで本論文ではモルディブで実施したインド洋津波の現地調査に基づき被害の概要、津波の特性、モルディブおよび我が国への教訓などをまとめる。

2. 調査の概要

現地調査は1月31日から2月4日にかけて行った (Fujima ら, 2005)。モルディブ全体の津波被害の状況を調べるため、首都 Male' から北に250 km の位置にある Haa Dhaalu 環礁の Hanimaadhoo, Male' から南に500 km の位置にある最南端 Seenu 環礁の Gan など8環礁21島で住民へのヒアリングや痕跡の測量を行い、津波痕跡高、被災状況、津波の状況などを調べた。モルディブ政府からの情報や検潮記録、数値計算結果などと併せ、(1)モルディブ全体での津波高分布、(2)環礁での津波の挙動、(3)環礁島での被災特性を議論した。また、モルディブでは防災構造物を作ること社会・自然・環境条件として大きな制約があり、避難システムを考えるにしても

* 正会員	工博	防衛大学校教授 建設環境工学科
** 正会員	博(工)	防衛大学校助手 建設環境工学科
*** 正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター
**** 正会員	修(工)	(独法)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター
***** 正会員	工博	茨城大学助手 工学部都市システム工学科
***** 正会員	工博	東北大学助教授 大学院工学研究科 災害制御研究センター
*****	修(工)	(株)アイ・エヌ・エー 海岸部
***** 正会員	工修	(株)テトラ ブロック事業本部
***** 正会員		若築建設㈱ 国際事業部
***** 正会員		パシフィックコンサルタンツインターナショナル 港湾開発部
***** 正会員	工修	大成建設(株) 土木技術研究所

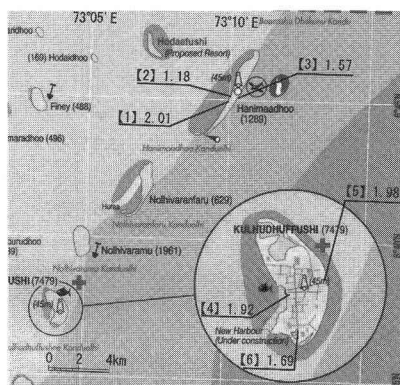


図-1 Hanimaadhoo と Kulhudhuffushi の痕跡高

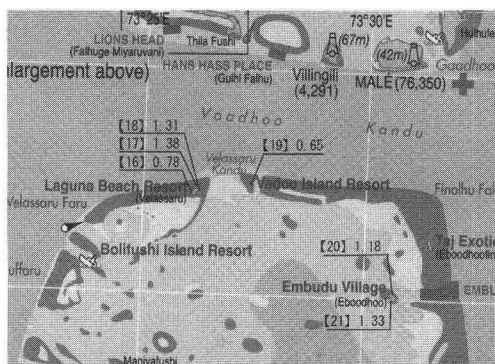


図-2 南 Male' 環礁の痕跡高

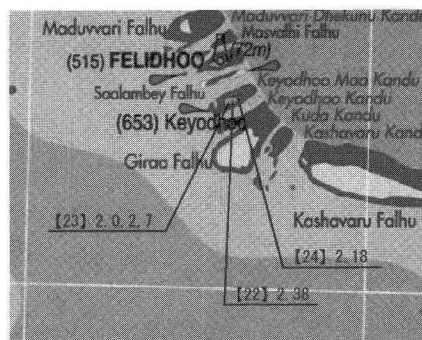


図-3 Keyodhoo の痕跡高

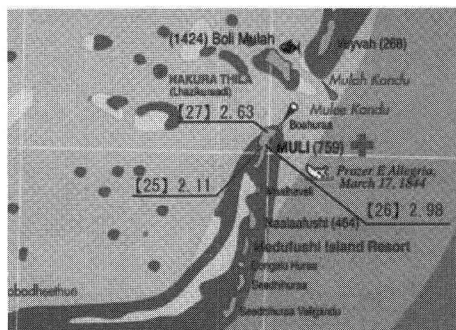


図-4 Muli の痕跡高

避難に適した土地が無い、といった問題点があることをふまえ、モルディブに適した津波防災システムを考察した。

3. 津波痕跡高分布

(1) Haa Dhaalu Atoll

Haa Dhaalu 環礁は Male' から北へ 200 km 以上離れている。空港のある Hanimaadhoo、中心地の Kulhudhuffushi はほぼ北緯 $6^{\circ}40'$ 程度だから、スリランカ南端より北に位置する。図-1 に痕跡高の調査結果を示す。Hanimaadhoo では東側（波源側）からの浸水はなく、西側（環礁側）からの浸水があったものの、建物が浸水するような大きな被害がなかった。そのため明瞭な痕跡がなく、3 点の調査点はいずれも目撃情報によるもので、精度はあまりよくない。一方、Kulhudhuffushi では建物の浸水、壁の倒壊など大きな被害が出ており、西側、南側の痕跡は非常に明瞭である。東側には高いパームがあり、津波本体はパームを越えていない。1.98 m はパーム沿いの目撃情報によるものもある。この地域の西側の津波浸水高は 1.6–2.0 m 程度で、Hanimaadhoo の検潮記録と調和的である。

(2) North Male' Atoll

北 Male' 環礁では、空港島 (Fulhule) とその北に位

置する人工島 (Fulhumale') で痕跡高を計測した。痕跡高は 2.0–3.4 m である (大谷ら, 2005)。

(3) South Male' Atoll

南 Male' 環礁では 3 つのリゾートで調査を行った。いずれのリゾートも大きな被害はなく、目撃証言による痕跡高は 0.6–1.4 m である (図-2)。Vadoo Island Resort では日本人のスキューバダイビングのインストラクターが 9 時 10 分に海に入り、1 分後に Vaadhoo Channel (南北 Male' 環礁間の水路) から南 Male' 環礁に侵入し始めた津波と遭遇している。したがって、Vaadhoo Channel では 9 時 11 分に津波が到達していたことになる。彼は猛烈な流れに巻き込まれマスクを飛ばされながらも無事生還したが、もし観光客が一緒だったら死者が出てもおかしくない状況だったと語った。

また別のダイバーは、水深の浅い所から発生した白濁した水が水深 15 m の辺りまで到達し、2 週間ほど視界が悪かったと語った。この人は 9:20 から 10:00 頃まで Vaadhoo Channel 中央で潜っていたが、流れが強くなったとは感じなかったそうである。また珊瑚が被害を受けた (折れたり砂をかぶったりした) こと、魚が津波直後にいなくなり、数日後に戻ってきたことなどを語ってくれた。

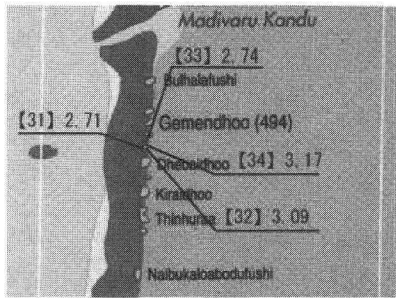


図-5 Gemendhoo の痕跡高

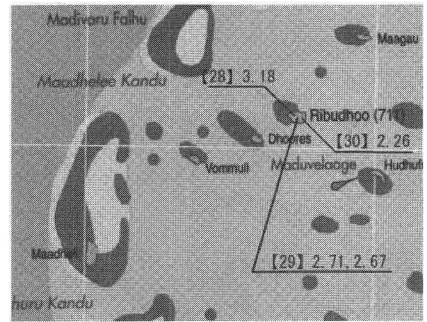


図-6 Ribudhoo の痕跡高

(4) Vaavu Atoll

Vaavu 環礁では環礁の東側に位置する Keyodhoo の痕跡高を調べた (図-3)。1 波目は東から西に向かって走り抜け (すなわち全島浸水)、2 波目は全方向から同時に浸水を始めたという。

(5) Meemu Atoll

Muli は Meemu 環礁の東に位置し、津波で死者 5 名、行方不明 1 名が出た島である。津波は東から来襲し、西に通り抜けた。したがって痕跡高は東側で高く約 3 m、西側で低く 2.1 m である (図-4)。

(6) Dhaalu Atoll

Dhaalu 環礁では Ribudhoo と Gemendhoo の 2 つの島を調べた。Gemendhoo は環礁の東側、Ribudhoo は環礁内の北西に位置する。どちらの島も全島浸水しており、Ribudhoo では死者 2 名、Gemendhoo では死者 5 名、行方不明 3 名が出ている。

環礁の東端の Gemendhoo では津波は東から浸水し、西に流れている。そのため、東側の痕跡高が高く、西側で低い。痕跡高は 2.7-3.2 m 程度である (図-5)。

Ribudhoo は環礁内に位置し、浸水は全方向から同時に始まったという。痕跡高は 2.3-3.2 m である (図-6)。環礁の東端の Gemendhoo と環礁内の Ribudhoo で、痕跡高に有意な差は認められない。

(7) Laamu Atoll

Laamu 環礁では、環礁の東側の Gan, Maandhoo, Kaddhoo, Fonadhoo の 4 つの島を調べた。これらの島は非常に短い距離で並んでおり、causeway で結ばれている。津波は東から浸入しており、被災した家屋はすべて島の東側のものである。ただし、Gan では東側にバームがあり、地盤高も比較的高いために被害が少なかった。Fonadhoo は大きなリーフが発達していて地盤高も低く、4 名の死者が出るなど、大きな被害が発生した。

東側の痕跡高は 2.1-3.2 m、西側の痕跡高は 1.3-2.0 m である (図-7)。

(8) Seenu Atoll

Seenu 環礁はモルディブの最も南で、南緯 0°40' ほど

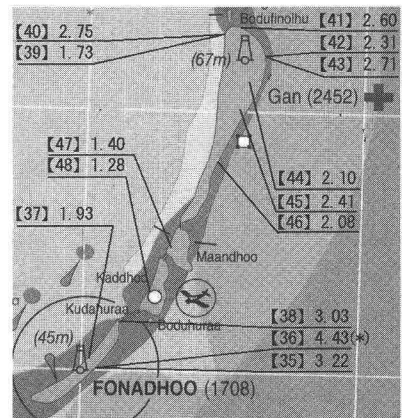


図-7 Laamu 環礁の痕跡高

にある。ここでは環礁の西側の Hithadhoo, Maradhoo, Maradhoo-Feydhoo, Feydhoo, Gan を調査した (causeway で結ばれている)。Seenu 環礁では津波は外洋に面した西側から出なく、環礁側 (東) から来襲している。痕跡高は 1.3-2.0 m である (図-8)。検潮記録は 1 m 程度だから、検潮記録に比べて痕跡高が高くなっていることが分かる。

なお、Hithadhoo に若築建設の工事現場があり、杉田氏が時々刻々の水位変化を計測していた。測定場所は栈橋の先端で、最高水位は検潮記録と同じ 1 m である。非常に貴重なデータであり、インド洋津波の研究に有効に使われることを期待したい。

(9) 数値計算結果との比較

今回の調査では、北 Male' 環礁と Laamu 環礁の間で大きな痕跡高が観測された。南北 800 km にわたる分布が得られたことは、インド洋津波の全体像を把握する上で重要である。図-9 に数値計算結果と痕跡高および検潮記録による津波最大偏差の比較を示す。数値計算では線形長波理論を使用し、格子間隔は 1 分 (約 1.8 km) とした。数値計算結果は、3 箇所の検潮記録の最大偏差とよく一致している。また、北 Male' 環礁と Seenu 環礁を除くと、痕跡高とも比較的よく一致している。北

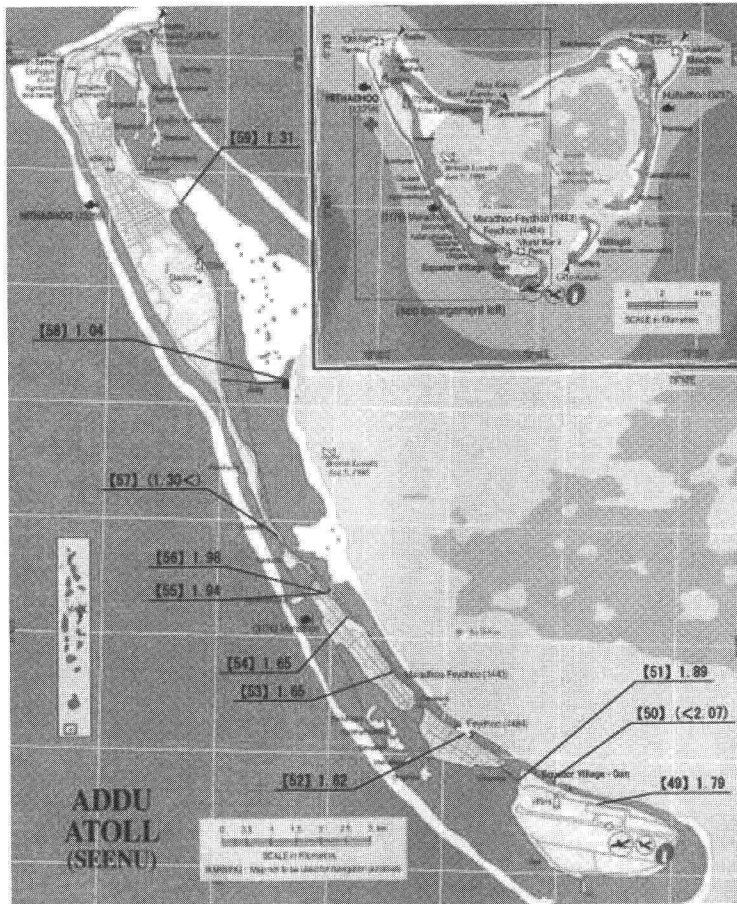


図-8 Seenu 環礁の痕跡高

Male' 環礁と Seenu 環礁の痕跡高を再現するには、より細かな格子を使った数値計算が必要と思われる。なお、Hanimaadhoo の検潮記録による最大偏差は、格子間隔 2 分の数値計算ではまったく再現できなかったが、1 分格子を使うことにより再現できるようになった。ただし、細かな成分までは再現できていないことを付記しておく。

4. 環礁での津波の挙動

(1) 環礁への津波の流入

環礁では急に水深が浅くなり、しかも島が障害物となるため津波の環礁の侵入に時間がかかる。Male' の検潮記録（環礁内）では津波到達は 9 時 12 分から 16 分の間だが、9 時 11 分には Vadhu Channel から南 Male' 環礁への強い流れが生じている。空港島で津波来襲直前に地下水が噴流したことから見ても、実態としては検潮記録より数分前に津波がこの海域に到達していたと言える。

(2) 環礁内の津波

Dhaalu 環礁では東端 (Gemendhoo) と環礁内 (Ribudhoo) で痕跡高を計測したが、両者に有意な痕跡

高の差は認められなかった。Ribudhoo の住民が「この島に津波は来なかった。ただ海面が上昇し、あらゆる方向から浸水した」と言っていたことから、環礁内の水位差はそれほど大きくなく、じわじわと水位が上昇したようである。Haa Dhaalu 環礁でも検潮記録と痕跡高がほぼ同じであり、大きな慣性力をもって遡上したとは考えにくい。一方、Seenu 環礁では検潮記録と痕跡高に差があり、環礁内で津波が慣性力をもち遡上したと考えられる。また、南 Male' 環礁では環礁内に循環流ができ、回転方向が目まぐるしく変わるのが目されている。このように、環礁内の津波の挙動は決して単純ではなく、今後、詳細な数値計算などで環礁内の津波の挙動特性を解明する必要がある。

5. 被害の特徴

Seenu 環礁では、リーフの発達した北側で痕跡高が小さく、リーフの発達していない南側で高かった。これは容易に納得できる結果だろう。

一方、Haa Dhaalu 環礁 Kulhudhuffushi は環礁の東側

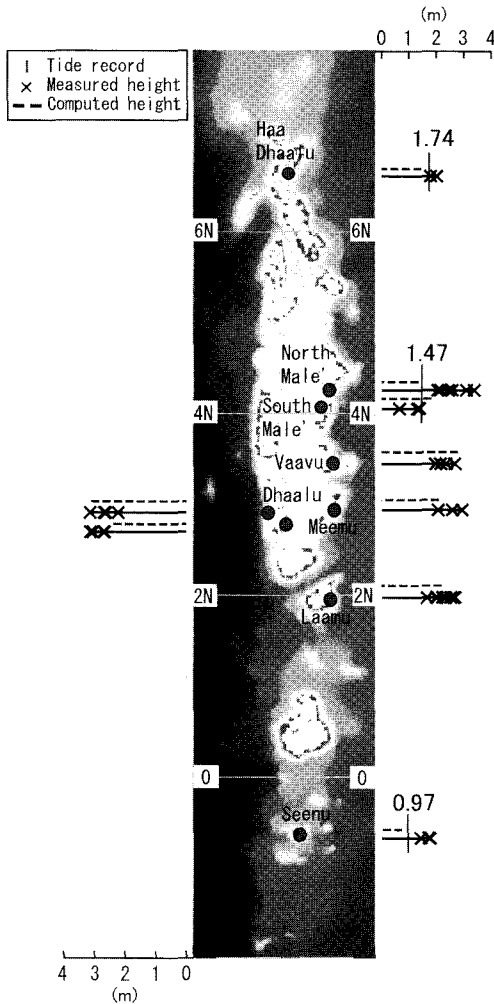


図-9 数値計算結果と検潮記録、痕跡高の比較

に位置し、リーフが発達していない東岸に高いバームがある。このバームが津波を食い止め、東岸からの浸水はなかった。しかし西側（環礁側）に回り込んだ津波が、リーフが発達しバームがない西岸で浸水し、被害を出した。Laamu 環礁でも、高いバームがある Gan では被災が少なく、リーフが発達しバームがない Fonadhoo での被災が多かった。すなわち、リーフがあり安全なはずの地域が大きな被害を受けていた。リーフは段波状になった津波先端部に関してはエネルギー減衰効果があるが、津波本体に対してはエネルギー減衰効果が期待できない。リーフにより津波先端の勾配が急になり、むしろ破壊力が増大した可能性もある。モルディブのように自然の地盤高のまま利用しているところでは、リーフが発達していても津波に対しては安全と言えない。これは我が国でも教訓になる。

6. 防災対策

(1) 構造物

モルディブの島々はリーフで守られているため、港などの一部を除けば護岸などの施設がないのが普通で、津波の浸入を防ぐことができなかった。護岸があったとしても珊瑚をモルタルで固めた簡単なものが標準であり、強度が不十分のため被害が大きくなったと見られる。すなわちモルディブ住民島の伝統的な家屋、壁、護岸などの構造物は津波のような外力に対し強度が不十分である。一方、強固に作られた Male' 島の海岸構造物には被害がなかった。また、周囲の家屋がすべて破壊される中、強固なモスクだけ破壊されずに残った島もあった。少なくとも海岸線付近の構造物は強固に設計する必要がある。

(2) 計画

上述の通り、最高地盤高1.8mという低地で国土が構成され、しかも護岸などの施設が整備されていないモルディブは津波に対して脆弱である。安全性を高めるためには強固な構造物や人工地盤などが欠かせない。

しかし、モルディブの島々は珊瑚礁でできているため、良質の建設資材が得られない（実際には、唯一得られる珊瑚塊も環境保全のため建設資材としての採取は禁止されている）。したがって、すべての住民島で対策をとることは現実的でない。

そこで、モルディブ政府は、比較的大きな面積を持つ特定の島に人口を集中させ強固な護岸と高い人工地盤で減災を目指す Safe Island Program を進める計画である。この計画は妥当なものと言えるだろう。日常生活の快適性の点からも狭い面積の島に高い護岸を建設するより面的な防災構造物が有効である。これは南太平洋の島々の防災対策としても有益である。また、住民に対する防災教育や専門育成なども重要である。

謝辞：本調査を実施するにあたり、文部科学省特別研究促進費（題目：2004年12月スマトラ島沖地震津波災害の全体像の解明、代表者：河田恵昭 京都大学教授）の補助を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 大谷英夫・藤間功司・嶋原良典・富田孝史・本多和彦・信岡尚道・越村俊一・折下定夫・辰巳正弘・半沢稔・藤井裕之（2005）：インド洋大津波によるモルディブ共和国マレ島・空港島の浸水特性とそれに及ぼす護岸・離岸堤の影響，海岸工学論文集，第52巻（印刷中）。
- K. Fujima, T. Tomita, K. Honda, Y. Shigihara, H. Nobuoka, M. Hanzawa, H. Fujii, H. Ohtani, S. Orishimo, M. Tatsumi and S. Koshimura (2005) : Preliminary Report on the Survey Results of 26/12/2004 Indian Ocean Tsunami in the Maldives, 89p.