

モルディブにおけるインド洋津波の特性

藤間 功司¹⁾

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日にスマトラ沖で起きたマグニチュード 9 の巨大地震は津波を発生させ、インド洋を伝播し多くの地域に惨事をもたらした。特に、震源に比較的近いインドネシアやタイだけでなく、波源から 1,500km 離れたスリランカ、2,000km 離れたモルディブ、そして 4,000km 離れたアフリカにまで被害を出した点において、1960 年チリ津波、1964 年アラスカ津波以来の大津波とってよいだろう。

さて、津波はインド洋を伝播しモルディブに至るが、その間は水深 3000-4000m ほどの比較的単調な海底地形であり、地形の影響によるエネルギーの集中などは起こらないと思われる。また、モルディブは環礁という独特の地形の連なりからなる。環礁の大きさは直径数十 km で、環礁内の水深は 50m 程度である。環礁の淵や内部に、直径数 km の小さな島が集まっている。環礁の外側は 10km 離れば水深 2000-3000m にも達する急勾配である。大量のローソクを立てたクリスマスケーキのような地形と考えればよい。そのような環礁 20 以上が、南北 800km にわたって並んでいる（東西方向に 2 列）。津波の波長が 300-400km という大きさだから、環礁や島のスケールは非常に小さい。したがって急斜面や環礁による散乱はあるものの、津波の高さに関しては地形によりそれほど大きな増幅をしないと思われる。

筆者らは、波源とアフリカの中間に位置し、しかも上述のように津波水位があまり局所地形の影響を受けないモルディブが、インド洋津波の全体像を把握する上で重要であると考

え、現地調査を実施した。ここでは現地調査に基づく被害の概要、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. 地震・津波の概要

スマトラ沖地震は、2004 年 12 月 26 日 00:58 (標準時) に発生した。モルディブ時間で 05:58 である。なお、聞き取り調査によると、南 Male' 環礁にあるリゾートの日本人スタッフは僅かに地震を感じたという。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 Male'、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 30-40 分程度である。津波の最高水位は Hanimaadhoo で 1.8 m 程度、Male' で 1.4 m 程度、Gan で 1 m 程度である。なお、津波来襲時の潮位はほぼ平均海面だった。津波の水位はその程度だが、モルディブの自然の地盤高は最高でも 1.8 m で、1 m 程度の島も多い。したがって、1 m を越える津波の影響は大きい。

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。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という。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 Atoll, Dhaalu Atoll, Thaa Atoll, Laamu Atoll といった、首都 Male' より南にある住民島で発生した。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はないのが普通で、津波の浸入を許した。護岸があったとしても珊瑚をモルタルで

¹⁾ 防衛大学校建設環境工学科

固めた簡単なものが標準である。特に住民島は家屋や壁の造りが強固でなく、被害が大きくなったと見られる。13 の島では住民が島外に避難する事態となった。

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。

3. Male' 島の被害

Male' 島はモルディブとしては珍しく（おそらく唯一の例外と思われる）島の全周を強固な護岸で守られている。これは、人口増加に対応するためリーフェッジまで埋立てしまったために高潮被害が発生し、それに対応するために建設されたものである。Male' 島では、①数隻の小型船舶が岸壁に打ちあげられた、②島のかなりの面積が浸水した、という被害があったが、死者はゼロであり、上述の被害の影響も比較的軽微だった。そのため、住民は余裕を持って津波という自然現象を受け止めたようである。モルディブ政府は被災後、被害の把握、救援活動、復旧計画立案と素早い対応を見せたが、これも Male' の被害が比較的小さかったからこそ可能になったことである。したがって、Male' の安全性の確認はモルディブにとって重要である。

Male' の海岸線の天端高は係船岸壁で約

1.5 m、それ以外では大抵 2 m 以上である。したがって、津波の最高水位と係船岸壁の高さがまったく同程度だったことになる。詳しく言えば、検潮記録は北側の環礁内で取られているから、北側の係船岸壁で津波水位と天端高が同程度で、南側は環礁と環礁に挟まれた水路になっているため、津波はそこに集中し増幅すると考えられるから、南側の係船岸壁では数十 cm の越流深があったと想像される。大谷氏（大成建設）の数値計算では、南岸での津波水位は 2 m 以上に達している。また、東岸では津波の上ののった風波成分が越波している様子が多数写真に取られている。

モルディブ調査団は、Male' の安全性の検討を行う際に必要となる浸水域を調査した。その結果を図 1 に示す。図中の線の外側が浸水域、線の内側は浸水を免れた地域である。図中の数値は地盤高を表す。図 1 から、浸水域は島の 60% に及んでいること、地盤高が 1.1 m のところまではほぼ浸水していることが分かる。おそらく、浸水した水量を水平にならした線が高さ 1.1 m 付近で、1.1 m を越えて浸水しているところは慣性力で一時的に浸水したものと思われる。

Male' 島も地盤高は他の住民島と大差ないが、護岸により越流量が抑えられたと言える。もし護岸天端高が低く、係船岸壁だけでなく島の全周から越流していたら、被害は非常に大きくなっていただはずである。また、今



図 1 Male' 島の浸水域と地盤高

回の津波では、護岸の天端高が津波最高水位と同程度だったが、もし津波来襲が満潮と重なっていたら、現在の護岸も大して役に立たなかったかもしれない。その意味で、Male' は決して十分に安全なわけではなく、今後、十分な危険度評価が必要である。

5. モルディブ広域での津波

5.1 Haa Dhaalu Atoll

Haa Dhaalu 環礁は Male' から北へ 200km 以上離れている。空港のある Hanimaadhoo, 中心地の Kulhudhuffushi はほぼ北緯 6° 40' 程度だから、スリランカ南端より北に位置する。

図 2 に痕跡高の調査結果を示す。Hanimaadhoo では建物が浸水するような大きな被害がなかったため痕跡がなく、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 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。東側には高いバームがあり、バームを越えると地盤高は急に低くなる。1.98m はバーム沿いの目撃情報によるものもある。0.93m は、「バームを越えた海水がここまで到達した」という地点の地盤高であり、津波の高さを表すものではない。信頼性の高いデータをもとに考えると、この地域の（西側の）津波浸水高は 1.6-2.0m 程度で、Hanimaadhoo の検潮記録と調和的である。

5.2 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。検潮記録では第 1 波が最大波だが、空港島での聞き込み調査によると、第 2 波による浸水が大きかったらしい。第 1 波の引きで護岸が破壊され、第 2 波以降の浸入を防げなかったのかもしれない。痕跡高を図 3 に示す。痕跡高は 2.0-3.4m だが、空港島のデータは構造物の影響を受けて大きくになっている可能性もある。

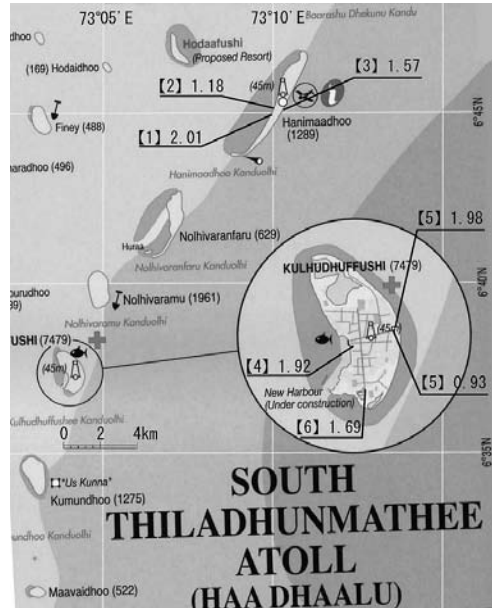


図 2 Haa Dhaalu 環礁の津波痕跡高

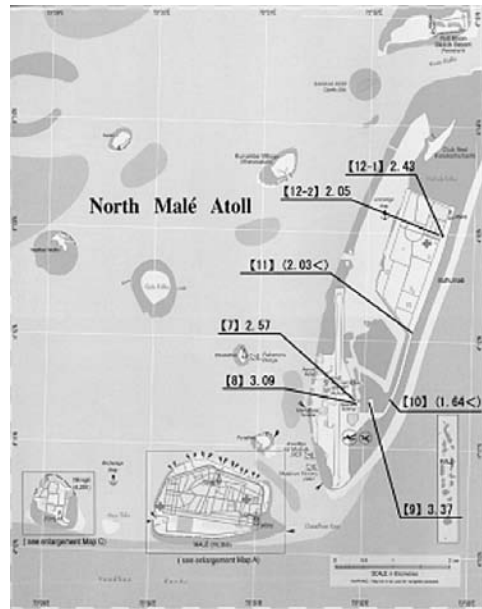


図 3 北 Male' 環礁の津波痕跡高

5.3 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 0.6-1.4m である。Vadhoo 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 Vadhoo

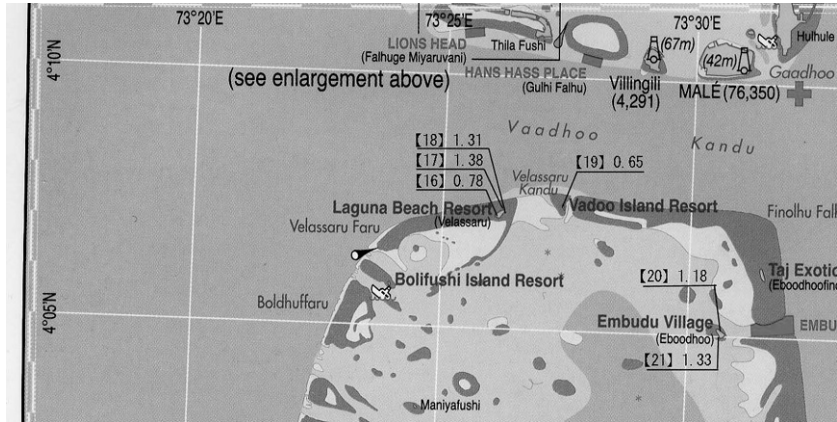


図 4 南 Male' 環礁の津波痕跡高

Channel (南北 Male' 環礁間の水路) から南 Male' 環礁に津波が侵入し始めるのを体験している。したがって、Vadhoo 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 Vadhoo 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。

5.4 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 5)。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はじめたという。

5.5 Meemu Atoll

Muli は Meemu 環礁の東に位置し、津波で 5 名の死者が出た島である。津波は東から来襲し、西に通り返けた。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 6)。

5.6 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 7)。

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。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。

5.7 Laamu Atoll

Laamu 環礁では、環礁の東側の Gan, Maandhoo, Kaddhoo, Fanadhoo 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、橋で結ばれている。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比較的被害が少なかった。Fonadhoo は大きなリーフが発達していて地盤高も低く、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 8)。

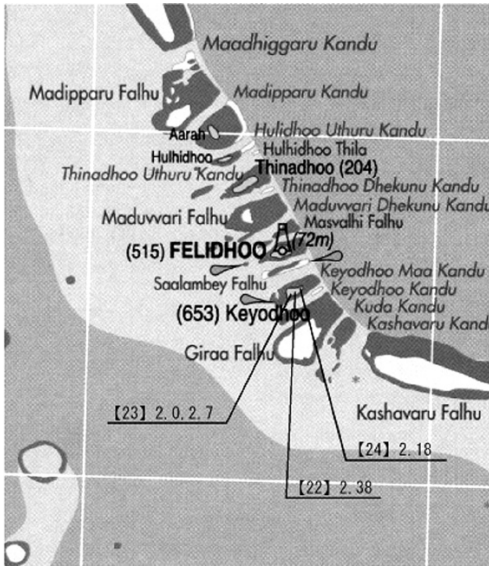


図5 Vaavu 環礁の津波痕跡高

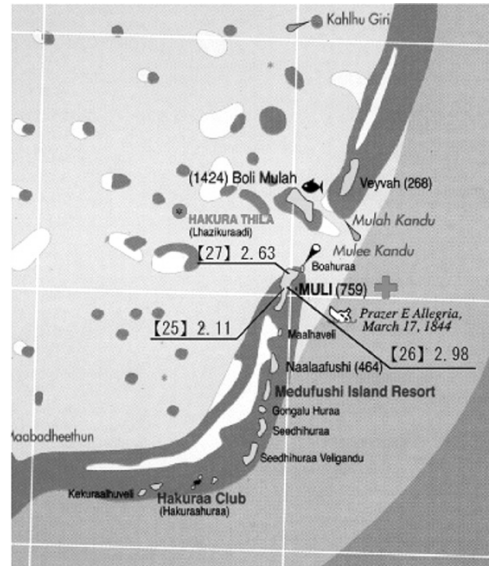


図6 Meemu 環礁の津波痕跡高

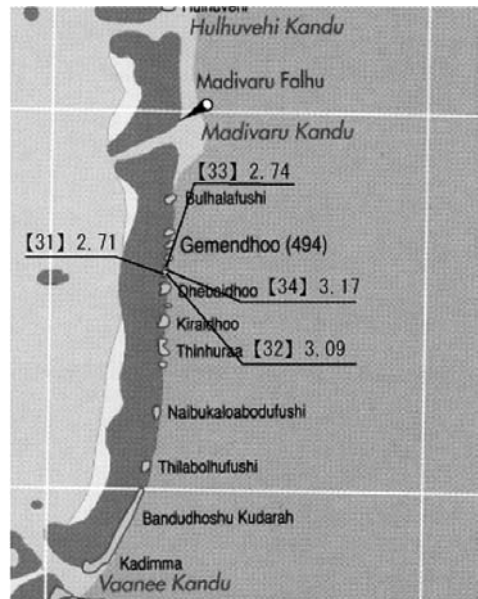
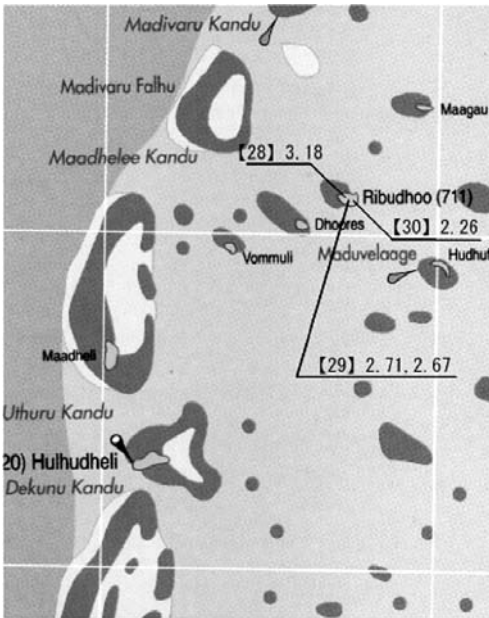


図7 Dhaalu 環礁の津波痕跡高 (左: Ribudhoo, 右: Gemendhoo)

5.8 Seenu Atoll

Seenu 環礁はモルディブの最も南で、南緯 0° 40' ほどにある。ここでは環礁の西側の Hithadhoo, Maradhoo, Maradhoo-Feydhoo, Feydhoo, Gan を調査した (橋で結ばれている)。興味深いことに、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 1.5-2.0m である (図9)。検潮記録は 1m 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

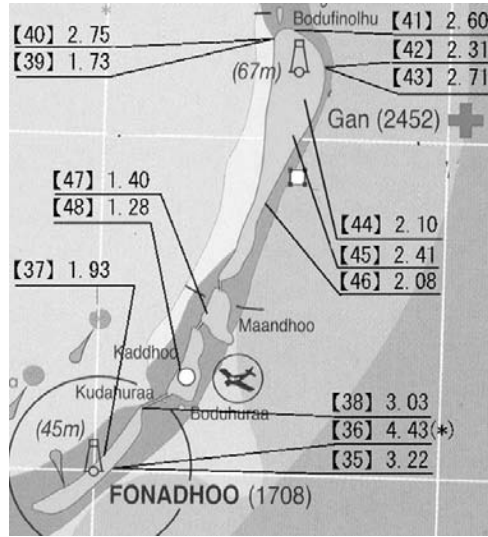


図 8 Laamu 環礁の津波痕跡高

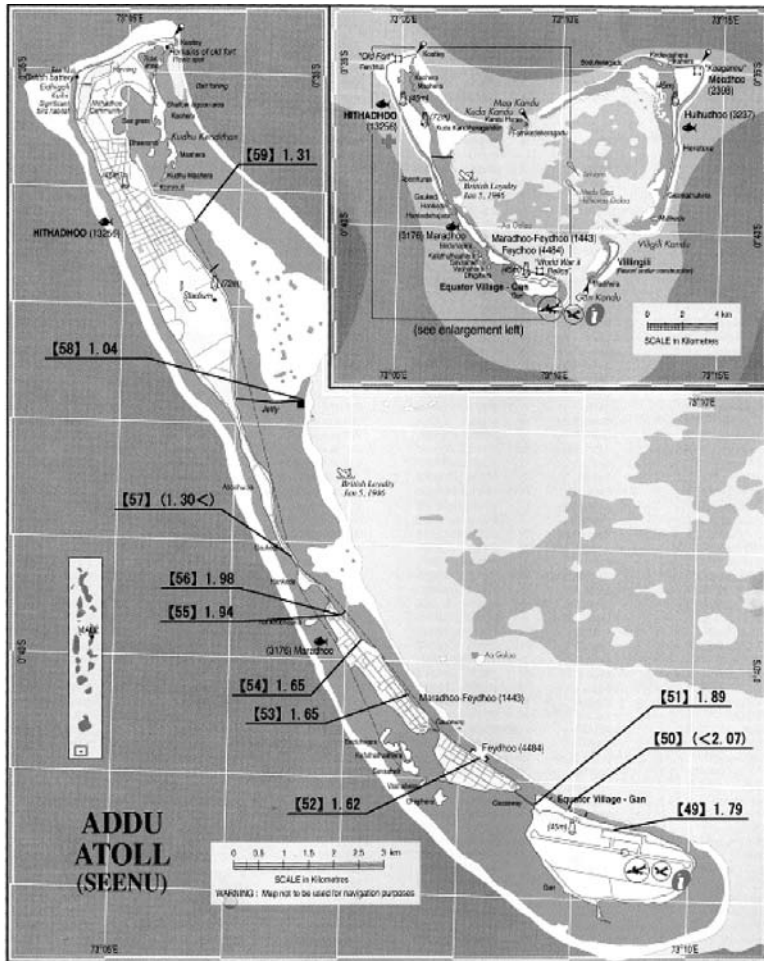


図 9 Seenu 環礁の津波痕跡高

あり、杉田氏が時々刻々の水位変化を計測している。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。

6. まとめ

モルディブの痕跡高をまとめた結果、いくつか興味深いことが分かった。

北部の Kludhuffushi では東側にリーフが発達しておらずバームができており、バームが津波を食い止めたために東側での被害はなかった。しかし、リーフが発達して地盤高が低い西側で大きな被害が発生した。Laamu 環礁でも、バームがあり地盤高の高い Gan で比較的被害が少なく、リーフが発達し地盤高の低い Fonadhoo で被害が大きかった。すなわち、(安全なはずの) リーフのあるところが大きな被害を受けていた。通常、リーフが発達しているところは波浪に対して安全であり、したがって重要な構造物はリーフが発達しているところに建造されていると思われる。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。したがって、リーフが発達し、元来地盤高が低い場所で大きな被害が発生したと見ることができる。リーフにより津波先端の勾配が急になり、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、津波に対して安全とは言えない。

また Dhaalu 環礁では環礁の東側と環礁内で津波の痕跡高に有意な差がないことも分かった。南 Male' 環礁での証言からもよく分かるように、環礁内への津波の流入は、狭

い開口部を通して起こるから、環礁内への流入量は多くないと予想していたが、あくまでケースバイケースであると言える。今後詳細な研究が必要である。

北部の Haa Dhaalu 環礁では痕跡高は検潮記録とほぼ同じだった (1.8 m)。Male' では検潮記録を取った環礁側でのデータはないが、Male' 島への浸水が北岸で大きくなく、北岸の岸壁の天端高が検潮記録と同程度の高さであることから、検潮記録の津波水位と浸水高はほぼ同程度と見られる (1.4 m)。一方、南の Seenu 環礁では検潮記録 (1 m) の 1.5-2 倍の痕跡高が得られた。これは、Seenu 環礁では津波が慣性力をもって陸上に上がったことを示しており、他の環礁と何が違うのか解明する必要がある。

このように、環礁内への津波の流入や環礁内での津波の挙動は意外に複雑であり、安全性を高めたモルディブの復興計画のためにも、詳細な地形データを使用した数値形跡を行うなどして、その特性を把握する必要がある。

謝辞

本調査は、以下のメンバーで行われたものである (団長：藤間功司)。

藤間功司、嶋原良典 (防衛大)、富田孝史、本多和彦 (港空研)、信岡尚道 (茨城大学)、半沢 稔 (テトラ)、藤井裕之 (アイ・エヌ・エー)、大谷英夫 (大成建設)、折下定夫 (PCI)、辰巳正弘 (若築建設)、越村俊一 (人と防災未来センター)

また、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。