2004年12月26日スマトラ島沖地震 報告会 梗概集

2005年4月4日

於 建築会館ホール

- 主催 日本地震工学会
- 共催 土木学会・日本地震学会
- 協賛 日本建築学会・地盤工学会・日本機械学会・ 震災予防協会

1. 2004スマトラ沖巨大地震の震源領域で何が発生したのか? ・・・・・・・・・・・ 1

(建築研究所) 八木 勇治

- - (気象庁) 石川 有三
- 3. 津波の特徴とスリランカの調査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11
 - (東北大学) 今村 文彦
- 4. インド洋大津波によるスリランカの建築物の被害について ・・・・・・・・・ 14
 - (建築研究所)奥田 泰雄
- 5. スマトラ島地震津波の最大被災地・Banda Aceh市での調査結果 ・・・・・・・・・・ 22
 - (東京大学)都司 嘉宣
- 6. ビデオ画像による津波氾濫流速と現地調査による推定値との比較 ・・・・・・・・・ 29
 - (電力中央研究所)榊山 勉、(秋田大学)松冨 英夫
 - (東京大学)都司 嘉宣、(関西電力)村上 嘉謙
- 7. スマトラ島バンダ・アチェ市地域での地盤工学的知見 ・・・・・・・・・・・・・・ 35

(東京大学) 東畑 郁生、本多 剛、Ruta Wicaksono

- (バンドン工科大学) Ilyas Suratman
- 8. タイのKhao LakとPhuket島における2004年スマトラ島沖津波とその被害 ······· 39
 - (秋田大学) 松富 英夫、高橋 智幸、(電力中央研究所) 松山 昌史
 - (京都大学)原田 賢治、(港湾空港技術研究所)平石 哲也
 - (Ransit University) Seree Supartid、(横浜国立大学)Sittichai Nakusakul
- 9. リモートセンシング画像とGPSを活用したタイ南部の津波被害調査 ・・・・・・・・ 46
 - (千葉大学)山崎 文雄、(防災科学技術研究所)松岡 昌志

10. スマトラ沖地震・津波によるタイ南部農業被害状況の現地調査 ・・・・・ 54

(農業工学研究所)中矢 哲郎、丹治 肇、(JICA)中村 義文

11. モルディブにおけるインド洋津波の特性 ・・・・・ 58

(防衛大学校)藤間 功司

- 12. 2004年12月26日スマトラ島沖地震・津波による構造物被害の概要 ・・・・・ 65
 - (OYOインターナショナル)田中 達吉、伊関 伸一、松尾 淳
 - (応用地質) 勝間 秀樹、長田 正樹
- 13. 2004スマトラ島沖地震津波の数値解析 ・・・・・ 71
 - (電力中央研究所)松山 昌史
- 14. 支援体制について ・・・・・ 77
 - (外務省)割澤 広一
- 15. インド洋大津波の被害分析に基づく今後の津波防災への一提言 ・・・・・ 79
 - (清水建設) 高梨 和光

2004年スマトラ沖巨大地震の震源領域で何が発生したのか?

八木勇治1)

1)独立行政法人建築研究所 研究員

1 はじめに

2004年は地震学を研究する人々にとって忘れる事ができない年となった.国内では、10月23日に地震の 規模を表すマグニチュード6.5の大地震が発生し、強い震動(強震動)や土砂崩れにより交通網が寸断され、 死者 40人 負傷者 4586人を出した.未だ、今まで住んできた家に戻ることができず、仮設住宅で生活してい る方が多くいる.一方で、12月26日には、スマトラ沖でマグニチュードが9の巨大地震が発生し、インド洋 周辺の国々に大きな津波被害をもたらした.この巨大地震による死者数は30万人を超え、150万人もの避難 民が発生している.

最近になって、このような人間活動に多大な被害を及ぼす地震が発生すると、全世界の地震計網と地域的 な強震動観測網により、地震動を正確に観測することができる様になってきた. その結果、このような地震 が、「どのように発生するのか?」また「地震発生源で何が起こったのか?」、明らかになりつつある.

このような知見は、理学的な探求心を満たすだけではなく、今後発生しうる地震の危険性を正しく認識し、 地震災害を軽減する上で非常に重要である.自然現象に対する無知は、いたずらに自然被害を増幅する.地 球上で人間活動を行う限り、地震という、危険極まりない自然現象を正確に理解し、上手に付き合っていく 必要がある.

2 研究の背景

最近,とくに阪神淡路大震災以降,日本では強震動観測網が整備され,準リアルタイムに強震動分布等が 発表されている.これらの情報は,初動体制・緊急対応を行うのに役立っている.しかしながら,地震被害 が発生するすべての国で,日本のような高密度な強震動観測網を運営するのは困難であり,他の方法により 強震動分布を推定する必要がある.

大地震が発生すると、全世界の地震計ネットワークにより、地震動を観測することができる. これらの地 震動は、地下構造の情報と、断層面での破壊伝搬過程の情報を有している. 適切に地下構造の影響を評価す ることにより、断層面で解放した力(CMT解)や断層面上の破壊伝搬過程(震源過程)の推定が可能とな ってきている.

現在, Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) により,全世界で準リアルタイムに地震波形 データが収録・公開されており,複数の研究機関によって,地震発生から数時間後には,半自動的に震源・ 規模・CMT解が決定されている.これらの情報は,震源過程を求める上で重要であり,より高精度で決定 する必要がある.一方で,これらの情報のみでは,断層近傍における強震動・被害分布を推定することはで きない.一般に,断層近傍の強震動は,震源過程(特に,断層の大きさ・すべり分布・破壊伝搬)の影響を 受けることが分かっている.現在,震源・規模・CMT解のみではなく,準リアルタイムに震源過程を決定 して,その結果を基に波動場計算を行い,強震動分布を推定するシステムを構築することが重要になりつつ ある.

今回発生した,2004年スマトラ沖巨大地震は,既存の解析手法で,概要のみならず,規模をつかむのも困難である地震であった.この巨大地震の余震は1000km以上に渡って分布していることが判明しており、仮にこの余震分布が断層のサイズを示すとすると,地震波を励起している領域を,点で近似する仮定(点震源 モデル)は事実上不可能である.しかしながら,地震の規模を表す実体波マグニチュード(mb),表面波 マグニチュード(Ms),気象庁マグニチュード(M_{JMA})は点震源を仮定して地震の規模を決定している.また,現在最も信用されている Harvard CMT 解で得られるモーメントマグニチュード (Mw)にしても,地震波を励 起している領域を点で仮定して,その点で全エネルギーが開放されたとして,地震の規模を求めている.こ れらの手法で得られた値から,今回の地震のような巨大地震の規模を議論するのは困難である.そもそも, 巨大地震の規模を点震源で推定するのではなく,有限断層を仮定して推定するべきである.

一般に、津波警報ネットワークは、地震の規模と深さを判断材料としている.ここで、信頼できる情報を 出すためには、巨大地震の規模を精度良く推定する手法の開発が急務である.巨大地震が発生した時に破綻 するシステムであってはならない.ここでは、有限断層を仮定した場合の、震源過程インバージョンの説明 をした後、今回発生した、2004年スマトラ沖地震の震源領域で何が発生したのかについて述べる.

3 解析手法

一般に、特殊な地震(例えば、火山性地震、核爆発、核実験、地滑り等)を除くと、地震は、断層面を破壊する現象 である.最近になって、大地震が発生する断層面は、強度が弱い領域と言う概念から、歪みが蓄積しやすい領域と言う 概念に移行しつつある.いずれにせよ、地震を発生する源である震源をモデル化するためには、断層面を仮定して、そ の面における破壊(断層滑り)が時間と空間に対して自由度を持たせる必要がある.

ここでは、まず断層面(走向、傾斜)を仮定して、その断層面を、Mノットの0次のスプライン関数(ボックスカー 関数)で展開する.次に、各ノットの断層滑りを、2個の滑りベクトル成分に分割する.次に、各滑りベクトルの時間 履歴をLノットの1次のスプライン関数で展開する.断層モデルの概略図を図1に示す.この結果、j 観測点で観測され る地震波形 W_i(t) は、下記のように書くことができる.

$$W_{j}(t) = \sum_{mnl} D_{mnl} G_{jmn}(t + \Delta t_{ml}) + e$$
⁽¹⁾

ここで、
m:空間的なノットの番号(m=1,...,M)
n:断層滑り方向の成分(n=1,2)
l:時間方向のノットの番号(l=1,...,L)
Dmnl:断層すべり量(m)
Gjmn(t):グリーン関数
である.ベクトル化すると、

$\mathbf{W} = \mathbf{G} \mathbf{d} + \mathbf{e}$

と書く事ができる. グリーン関数の計算には, Kikuchi and Kanamori (1991)のプログラムを使用した. この行列式を解 けば, 断層滑りの時空間分布を求める事ができるが,より詳細に求めようとすると,観測誤差,モデル化に伴う誤差の 影響をより受けやすくなり,数値的に不安定になってしまう. そこで,今回は,時間に対して滑らかになる様に,滑り 量の時間に対する2回微分が0に近くなるような条件式

$$\frac{\partial^2 D_{mnl}}{\partial t^2} = e_t \tag{3}$$

と、空間に対して滑らかになる様に、最終的なすべり量の空間の2回微分が0に近くなるような条件式

$$\Delta \sum_{l} D_{mnl} = e_s \tag{4}$$

を導入する.(3),(4) 式をベクトル化すると,

 $T d = e_t$

 $S d = e_s$

断層面 (WY) @ (A) @ (A)

(5)

(6)

(2)

と書ける.従って、最小にすべき目的関数は、

$$O(\mathbf{d}, \alpha, \beta) = \|\mathbf{W} - \mathbf{G}\mathbf{d}\|^2 + \alpha^2 \|\mathbf{T}\mathbf{d}\|^2 + \beta^2 \|\mathbf{S}\mathbf{d}\|^2$$

と書ける.ここで, α , β は条件式(5), (6) の強さを示す超パラメターである. α , β が与えられた場合,式(7) は, Jackson and Matsu'ura (1985) に従って解く事ができる.ここで解は, α , β の値によって変化し,ユニークな解を求める事は困難 である.本論文では,Fukahata et al., (2004) によって導入された複数の超パラメターが存在する場合の Akaike's Bayesian Information Criterion (ABIC) の定式化を導入して,最尤法に基づくユニークな解を求める.本研究の場合,ABIC は,

$ABIC(\alpha,\beta) = (N+N_0)\log O(\mathbf{d},\alpha,\beta) - \log |\alpha^2 \mathbf{T}'\mathbf{T} + \beta^2 \mathbf{S}'\mathbf{S}| + \log |\mathbf{G}'\mathbf{G} + \alpha^2 \mathbf{T}'\mathbf{T} + \beta^2 \mathbf{S}'\mathbf{S}|$ (8)

と書ける. ここで, ABIC が最小になる時の, $\alpha \ge \beta$ の値を求めればよい. 解析的に式 (8) が最小になる様な $\alpha \ge \beta$ の値 を求めるのは困難である. そこで, 数値的に, $\alpha \ge \beta$ の値を変えて練り返しインバージョンを行い, ABIC が最小となる ような $\alpha \ge \beta$ の値を求めた.

4 2004年スマトラ沖巨大地震

4.1 地震の概要

2004年12月26日に北スマトラ沖で M9クラスの巨大地震が発生した.この規模の地震は、広帯域地震計観測網が整備 されて以来、初めての地震である.同地域は、インドプレートとオーストラリアプレートがユーラシアプレートの下に

沈み込んでいる地域で、M8クラスの地震も過去数回発生 していることが確認されているが、今回のようなM9クラ スの地震が過去に発生したと言う定量的な報告は、まだ無 い.米国地質調査所が決定した余震分布は、長さ1200km にわたって分布しており、ハーバード大学が決定したモー メントマグニチュードは、9.0に達する(図2).一方で、 地震発生後、地球がゆっくりと揺れる自由振動の解析より、 モーメントマグニチュードが9.3に達していると指摘して いる研究者もいる(Stein and Okal, 2005).次節で述べる が、今回の地震は、400秒以上に渡って破壊が継続してお り、通常の手法では、解析するのが困難な地震であるため に、詳細な議論は、現時点でにおいても困難である.

4.2 データ

今回は, IRIS によって収録されている広帯域地震計 観測点の記録 12点を,解析に使用した.一般に,地 球の減衰構造の関係上, P 波は高周波の波を多く含 んでいる.ここで、今回の地震の破壊継続時間を見 積もるために、1Hz 近傍の周波数帯域のみを通すフ ィルターをかけた波形を図3に示す.比較のために、 今回の震源近傍で発生し、かつ、同じようなメカニ ズムを持つ地震波形も同時に示している.ここで、 高周波の波の継続時間は,破壊継続時間と P-sP 時間 に相当する.この場合, P-sP 時間は約20秒程度であ るので、地震波形からは、 少なくても400秒以上に 渡って破壊が継続していることが示唆される.また, 地震発生後100秒移行から超長周期の地震動が観測さ れている(図4).しかしながら、今回適用している 地震波解析スキームでは、まだ、200秒以上の震源過 程を求めるのは困難である.従って、今回は地震発 生後から約200秒間の震源過程モデルを提示する. 観 測波形には、0.002~0.5 Hz のバンドパスフィルター をかけ、1Hzサンプリングの変位波形に変換した.



図2 (a) 使用した観測点分布 (b) USGS が決定した本震の位置と余震分布

(7)



図3 観測点 MA2 で観測された短周期地震動(0.5~ 1.5Hz). 2002年スマトラ沖地震(Mw 7.3)と 2004年ス マトラ沖巨大地震(Mw 9.0)の比較.

超長周期の波



図4 観測された,広帯域地震動(地震計の特性は除い てある)

4.3 結果と考察

断層モデルは、ハーバード大学が決定した値を、地震波形を説明するように若干修正した値、(走向、傾斜、滑り角)= (329°,10°,110°)を使用した.求めるべきパラメターを減らすために、滑り角度は固定した.図5に本震時の地震時す べり量分布と地震モーメント開放履歴を示す.地震発生後約70秒間に渡って、マグニチュード8.2相当の破壊が進行した. この破壊後に、M9.1に相当する地震モーメントを開放している.この事実は、この地震は少なくとも、M9.1以上の規模 であった事を示す.ここで、今回の解析では、200秒以降の震源過程を求めることはできないため、全体の地震モーメン トを正確に把握するのには適していない.破壊が開始して200秒間は、破壊は北へ約2.5km/secの早さで伝搬し、約 500kmの範囲を破壊している.このモデルで観測波形は良く説明する事ができる(図6).ここで、地震波形からは、 200秒後も北に向かって進行している事が明らかになってきている.地震波形から推定される破壊継続時間は400秒以上 に及ぶので、破壊伝搬速度を2.5km/secと過程すると、震源より1000km以上北へ破壊が進行したことになる.これらの 事を考慮すると、非常に長周期の波を励起した領域は、今回得られたすべり量分布より北に位置する事が示唆される.





図6 観測波形(黒線)と理論波形(灰色線)との比 較,遠地実体波,観測点名の下に書いてある数字は最 大振幅(µm).

今後,津波と地震波解析から超長周期の波を多く励起したより北側で発生した現象の解明をする必要がある.

5 最後に

スマトラ沖地震は、従来のルーティン解析で行われてきた、点震源の仮定が崩れた地震である。今後、地 震の規模と深さの情報を使用して津波警報システムを構築するのに従来のルーティン解析手法をそのまま使 用すると、巨大地震には対応できない。巨大地震に対応するためには、有限断層を仮定したモデルで、地震 の規模を決定する必要がある。

6 参考文献

Fukahata, Y., A. Nishitani and M. Matsu'ura: Geodetic data inversion using ABIC to estimate slip history during one earthquake cycle with viscoelastic slip-response functions, Geophys. J. Int., 156, 140-153, 2004.

Jackson, D. D. and M. Matsu'ura: A Baysian approach to nonlinear inversion, J. Geophys. Res., 90, 581-591, 1985.

Kikuchi, M. and H. Kanamori: Inversion of complex body wave-III, Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2335-2350, 1991.

Stein, S. and Okal, E.: Ultra-long period seismic moment of the great December 26, 2004 Sumatra earthquake and implications for the slip process, http://www.earth.northwestern.edu/people/seth/research/sumatra.html, 2005.

スマトラ超巨大地震と地震空白域

石川有三

気象庁精密地震観測室、室長

1.はじめに

2004 年 12 月 26 日発生したスマトラ地震は、マグニチュード9.0という機械観測史上5番目に大きな 超巨大地震であった。これはプレート境界面でのスベリであったが、その場所が未破壊域であるという認識 は余り持たれていなかった。Nishenko & McCann(1981)は、マストラ島西方沖に地震空白域があるという指 摘はしていたが、彼らの指摘した地域は今回の震源域と完全に一致していたわけではない。今回の超巨大地 震の震源域は、彼らの指摘地域の北西半分とその北西隣の未評価地域の大半を占めていた。これはニコバル 諸島からアンダマン諸島にかけてのプレート間運動が未解明であったことも原因と考えられる。また、縁海 内で拡大運動が起きているアンダマン海の地震活動は活発であり、かつ沈み込み境界に近いところまで達し ていため、この地域の地震活動空白域に注目する研究は無かった。ここでは、事後になったが、その検討を 行った。

2.データ

震源データは、米国地質調査所のPDE(Preliminary Determination of Epicenters)の月報版を1964年から 2004年2月まで、週間版を同3月から2005年1月までを用い、その後はQED(Quick Epicenter Determinations)を用いて調べた。宇津カタログは、1964年以前の震源についてと、2002年までのM7.5以上 の震源について併せて用いた。

3. 震源域での地震活動の特徴



スマトラ超巨大地震の震源域を、地震活 動の面から調べてみた。1964 年以来で本 震発生直前までの震源分布と本震後の一ヶ 月間の活動を比べるといくつか特徴的なこ とが分かった。まず直前までの活動では、 アンダマン海嶺に沿った縁海拡大に伴う活 動が非常に活発であり、インド・オースト ラリアプレートとユーラシアプレートの境 界に近い部分でも活発であった。このため 広域の震源分布で見るとアンダマン海嶺の 活動をプレート境界の活動と見誤らせる状 況であった。また、アンダマン海嶺からス マトラ断層に続く活動も明瞭に見られた。 さらにスマトラ島のすぐ西側での活動も活 発で、特に今回の震源にすぐ南側では2002 年にM 7.6 の地震が起きている。そして逆 に北側でもアンダマン諸島付近でも活発な 地震活動が見られている。一方、余震域の



バル諸島の周辺では、東側に先に述べ 発なアンダマン海嶺の拡大に伴う活動

が見られているものの、プレート境界面が位置する西側海域では本震前にはほとんど震源が分布していなかった。PDEの震源カタログが1964年からしか無いため、この静穏な状態がいつ始まったか分からないが、 この場所では少なくとも40年間以上に渡って静穏であったことになる。これを震源の印の濃淡で示したの が図1で、非常に長期間静穏であった場所は、北緯3°~9°のプレート境界線に沿った所である。 一方、地震活動に時空間的変化が起きていなかったかについても調べた。データは同じくPDE震源カタ ログである。図2にM6以上の震源分布(左図)とその中でプレート境界に沿った地域を切り出して時空間 分布(右図)を示した。この右図の右端に震源マークが沢山記されているが、これが本震と余震である。こ の縦の長さが余震域に対応するので、両矢印を右側に付した。右図の横軸は時間を示すが、この縦矢印の部 分では本震の直前に震源のマークがプロットされていないことが注目される。これは本震発生の直前に地震 活動が静穏化しており、地震発生の前兆とされる第二種地震空白域と呼ばれる現象である(右図上部に水平 な両矢印で示した)。M6以上で見ると本震の発生前の約14年余りが前兆的静穏期であったと見られる。



図2:

さらにこの時空間分布で見られる活動で興味深いのは、静穏化が始まった 1990 年代初めから本震の震源 域近傍でやや地震活動が活発化したように見える点である。同時に、余震域の反対側の北隣でもそれまで震 源が一つもプロットされてなかったにもかかわらず、活動が見られるようになった点である。これは、震源 検知力の向上が原因かも知れないが、事実とすれば震源域の静穏化とともに、その両隣の活動が活発化して いた可能性を示しており、一種のドーナッツ現象(Mogi,1969)が起きていた可能性がある。

4.過去の大地震の履歴と繰り返し



図3: Natawidjaja(2004)の指摘している地震空白域

この地域で過去に発生した大地震の発生履歴 調査は多くない(Newcomb and McCann,1987, Natawidjaja & Sieh,2000, Natawidjaja et al,2004)。 しかし、それでもおおまかには200年程度の 繰り返し間隔で巨大地震が発生してきたと考え られている。その中でNatawidjaja(2004)は、1861 年の震源域が地震空白域だと指摘している(図 3)。これはプレート境界での未破壊域という 指摘で第一種地震空白域となる。

スマトラ西方沖の巨大地震の震源域を、1833 年、1861年、1907年、1914年、1935年、2000 年、と2004年にそれぞれ発生したものをそれ ぞれの震源域で塗りつぶして図4(震源域の推 定は、2000年、2002年、2004年の地震は余震 域により、1833年、1861年、1935年について は、Natawidjajaによる)に、宇津カタログでM 7.8以上の震源を抜き出し、その震源の位置 と時系列を同時に表示した。



図4:1800年以来のM7.8以上の巨大地震の繰り返し発生。右図は、それらの震源域と発生年を示した。

図4の 2002 年の地震は、右の震源域の図には示しているが、左の時系列には記されていない。それは、 この地震がM 7.6 とやや小さいからである。ただ、震源域は余震域から決められるため記している。この 2002 年 M7.6 と今回の超巨大地震とは破壊域は余り重なって居らず、2002 年 M7.6 が起きていたので、超巨大地 震の破壊の南限がここになった可能性がある。この図から、2000 年 M8.0 は 1914 年 M8.1 (Ms7.6)の再来と 考えられる。一方、2004 年 M9.0 は、1907 年 M7.8、1881 年?、と 1941 年 M8.1 を合わせたスベリの再来と 考えられるかも知れないが、過去にこれほどの規模の地震は知られておらず、単純な繰り返しとは異なる可 能性がある。

これら最近破壊した領域を除くと、1833 年 M8.7 の震源域から 1861 年 M8.4 の震源域の場所までの地域で は近年巨大地震が起きておらず、未破壊で残っていると考えられる。ただ、両地震の中間に位置する 1935 年 M8.1 の地域は前の地震発生から 70 年経過しているが、規模から考えてまだ次の前兆期に入っていると は考えにくく、既に破壊しているといて未破壊域から除くべきと考えられる。

5.プレート境界での活発化と前兆的静穏化=第二種地震活動空白域



図5: M7.5 以上の1900年以来の浅い震源分布と時系列図。左図を見るとジャワ島からインドにかけてのプレート境界周辺では1995年以降に集中的に起きており、活動期に入っていることが分かる。

これまでで未破壊域の存在が分かったが、将来の発生時期に関する検討を行う。

まず、インド・オーストラリアプレート境界の北部域では、1995 年頃から活動期に入っていたことが図5から分かる。この図では、1969 年に M7.7 が起きているものの、これを除けば全ての活動は 1951 年までの地震と 1995 年以降の地震に分けられ、この地域は活動期と静穏期の繰り返しが明瞭である。これに似た指摘を期間は短いものの茂木(1976)が既に行っていた。



次に地震活動について調べ た。図6にM4以上の浅い震源 分布を示した。同時に Natawidjaja らの推定した 1833 年 M8.7 と 1861 年 M8.4 の震源 域も記入した。これを見ると 1833 年 M8.7 の震源域では長期 に地震が起きていないことが分 かる。1861 年 M8.4 の推定震源 域では、少し活動があるが、も し、この推定震源域がやや沖側 へずれるなら 1833 年 M8.7 と 同様なほとんど震源が分布して いない所と重なる。これは両地 域が巨大地震の未破壊域として 残されているということと、地 震活動が長期に渡り低調な場所 になっていることと合わせると 将来の震源域である可能性を高 める。

図6: PDE による M4 以上の浅い震源と Natawidjaja らが推定した 1833 年 M8.7 と 1861 年 M8.4 の震源域。

次に最近の地震活動に注目してみる。この地域のプレート境界に沿って震源域を示し、それに対応する形で地震活動を図7に示した。これを見ると過去に起きた巨大地震の前には静穏期があり、前兆的地震活動の 静穏化=第二種地震空白域を形成していたことが分かる。そして、1861年 M8.4 の震源域でも見られるもの



震源域の静穏化は明 瞭で、1994年から 10年以上に渡って 静穏であることが分 かる。このような第 二種地震空白域を用 いた地震予知は、大 竹(1980)がメキシコ のオアハカ地方で地 震発生前に指摘し、 その後に地震が起き ている。従って、こ の地域ではそれほど 遠い将来ではない時 期に地震が発生する 可能性を考慮して災 害復興と対策を行う べきである。

の、1833 年 M8.7 の

図7: M6以上の浅い震源の時系列とプレート境界過去地震の震源域

一方、M9を越える超巨大地震は時間的に集中して起きる傾向があるのかも知れない。20世紀に起きた 4つの超巨大地震の発生は、1952年、1957年、1960年、1964年と約3年から5年おいて次々と13年間に 集中して発生している点にも注意する必要がある。この様子を図8に示した。



M 19001/1 0:0 -- 200412/3123:59 : M 7.5 <=> 9.9 : Dep 0.0 - 60.0km : NN= 347 /N= 347

以上をまとめると、スマトラ西方沖では、遠くない将来地震発生が懸念される場所がまだ存在している。 それらの地震のマグニチュードの予想は、地震活動の低調な地域の拡がりから前回並みと推定することも可 能である。また、インド・オーストラリアプレートの北部境界は現在活動期であり、他の境界地域も注意が 必要である。更に今回のスマトラ地震のようにM9を越える超巨大地震は時間的に集中して起きる傾向があ るのかも知れない。

参考文献

Mogi, K., 1969, Some features of recent seismic activity in and around Japan (2), Bull. Erthq. Res. Inst., 47, 395-417. 茂木清夫, 1976, 巨大地震論, 数理科学, No. 158, 46-52.

Nishenko, S.P. and W.R. McCann,1981, Seismic potential for the world's major plate boundaries:1981, Earthquake prediciton : Maurice Ewing Series 4 edited by D.W.Simpson and P.G. Richards,20-28.

Natawidjaja, D., and K. Sieh,2000, A continuous 400-year-long paleogeodetic record of aseismic and seismic subduction from a coral microatoll, West Sumatra, Indonesia. American Geophysical Union Fall Meeting, Oral presentation and abstract in EOS, Transactions, AGU,vol.81, no.48, F897

Natawidjaja, D.H., K. Sieh, S.N. Wars, H. Cheng, R.L. Edwards, J. Galetzka, and B.W. Suwargadi,2004, Paleogeodetic records os seismic and aseismic subduction from centrl Sumtra microatolls, Indonesia, JGR,109,B04306.

Newcomb, K.R., and W.R. McCann,1987, Seismic history and seismotectoics of the Sunda arc, J. Geophys. Res.,92,421-439.

大竹政和,1980,地震空白域にもとづく地震予知,国立防災科学技術センター研究報告,23,65-110.

図8:20世紀に世界で起きた M7.5 以上の浅い震源のマグニチュード時系列。

津波の特徴とスリランカの調査

今村文彦¹⁾

1)東北大学 工学研究科 附属災害制御研究センター

1 はじめに

平成16年12月26日午前8時頃(現地時間)に発生したスマトラ北西部沖地震(M9.0)は、ユーラシアプレートとインド・オーストラリアプレートの境界でのプレート間地震であり,余震観測から震源域は約千キロメートルにも達し,この地域でも最大級の規模となった.地震より生じた津波は,直後にインドネシア沿岸を襲い,その後,タイ,マレーシア,バングラディッシュ,さらにはインド東岸,スリランカ(波源から1,600km)にも達した.驚くべき事に,アフリカ(波源から約6,000km)および南極へも来襲した.このようなインド洋全域に影響した津波は初めてである.犠牲者は23万人を超え,感染症などの2次災害も懸念されている.記録に残っている津波災害の中でも最悪とあるであろう.低頻度広域巨大災害として最悪となった本事例をレビューしながら津波研究への課題を整理したい.

地震と津波発生状況

今回の津波は、プレート間での低角逆断層により海底地盤が変位し発生したものと推定される. 上盤側の ユーラシアプレートが跳ね返ったために、主に隆起された海底変動により、水面が上昇し、押し波の津波が 生じたと思われる. これは主にインド洋へ向かって伝幡することになる. この地域は震源からも遠いために、 地震の揺れも小さくまた突然の津波による水位上昇が沿岸地域を飲み込んでいった. 一方、波源の東側では、 プレートの跳ね返りに引っ張られるため海底の沈下が生じ、水位が低下したために、引き波の津波がタイ、 マレーシア側向かったと考えられる. この周辺では、水面の低下が始まりその後に続く津波の押し波で大き な被害が生じた. 地震の揺れや引き波という前兆があったにも関わらず、住民や観光客にとって津波来襲と いう認識がなく避難できなかったと思われる.

現在,地震発生後に,地震の規模や断層パラメータが推定されれば,海底の変位量や津波の初期波形が求められ,その後数値シミュレーションにより,逐次,津波の挙動を再現することが出来る.正の津波が西側へ,負の津波が東側へ伝幡してく様子が分かる.西側のインド洋は海底水深が約4,000m であり,そこでの 津波の伝幡速度は時速約700キロに達し,僅か2時間でインド東沿岸やスリランカに到達している.一方, アンダマン海では,平均水深が400m であり,伝幡速度は時速200キロ以下になる.このため,タイやマレー シアにも2時間程度の時間で津波が到達することになる.このような数値シミュレーションにより詳細な情 報が得られるが,実際の現地データと照らし合わせて,その再現性の確認はしなければならない.特に,今 回のような巨大地震による津波の発生メカニズムは従来の理論で説明できるかは学術的な検討の要点である.

被害などの特徴

M9による地震と津波による被害は甚大である.今現在でも正確な実態を把握することはできない.被害 が大きい地域ほど,連絡をとることが難しく,情報が得られないからである.ここでは,被害の概要のみを 紹介したい.まず,最も被害の大きかった地域は,インドネシア・スマトラ島であり,強震動と突然の大津 波の来襲により沿岸地域は壊滅に近い状態であったと推定される.現在も専門家による調査が進められてい るが32m にも及ぶ遡上高さが記録されている.これは我が国で心配される南海トラフ(海溝型であり直下型 に近い巨大地震・津波)と被害像は類似している.タイやマレーシアでは,観光地を中心に大きな被害を出 した.犠牲者の8割は外国人観光客であると報道されている.日本人も含んでいる.リゾート地での突然の 大災害となった.さらに,インド,スリランカでも多大な被害を出している.特に,スリランカでは東部、 南部の海岸沿いのほか、南西部のコロンボでも被害が出るなど、死者は3万人を超えるとみられている。海 岸沿いでは集落が丸ごとなぎ倒されたように破壊された。モルディブには26日午前9時(日本時間午後1 時)すぎ、津波が押し寄せ、首都マレではほとんどの道路が冠水した。モルディブは約1,200のサンゴ礁の 島でできており、海抜はわずか最高1.8m。ホテルはクリスマス休暇の観光客らで満室状態であり、津波は大 きな傷跡を残した。

現地からの膨大な映像がテレビを通じて報道されている.ビデオカメラなどが普及し,観光地などでは, 多くの方が手元に持っていたからであろう.これらの来襲する津波の映像は学術的に大変重要である.これ らを収集して、衛星画像や数値シミュレーションなどと併せて解析を実施する必要がある.1983年日本海中 部地震津波を除いて津波の映像はほとんど無い中で、大変基調な情報となった.

主な調査結果

津波来襲状況:津波の浸水高さについて調査した結果を図に示す.今回の調査では、浸水域が広大であったため、遡上点まで把握することが難しく、ほとんどの測定値は浸水高である.今回のコロンボからゴールまでの平均高さは、5m程度である事が示される.9-10mにも達した地点もあったが、建物や地形の影響を受けて、局所的な津波の増幅が見られた.この沿岸での地形は、平坦であり、2-3mの標高を持つ地域が多かった.そのために、遡上してくる津波が斜面を駆け上がって大きくなる様子は見られない.沖合からほぼ5m程度の津波が来襲し、海面が上昇し、陸域へ流れ込み、そのまま内陸へ流入していったものと思われる.カハワのような地形は、海岸域で標高が高く、内陸に行くにつて若干低下する傾斜がある.このような場合では、内陸へ浸水してからの勾配を下がるにつて重力効果で加速され、流速が増加するものと考えられる.流れが強くなると流体力も増加する.そのため、内陸奥深くとも大きな流れによる被害が生じていた原因の1つである.



建物破壊:力は,深水深に比例し,さらに流速の2乗に比例する.さらに,物体に作用する力を考えると, 流れの方向に対して前後で対象かどうかで関係する.対称であると前後で同じ力がかかるのでバランスがと れ,実質的な力はゼロとなる.従って,ココナッツの木など形状が一見倒れそうに見えるが,細い円柱であ るため前後で流況を大きく変化することがない.その結果,作用流体力は小さく,周辺の建物は破壊されて も,植生だけが立っているという光景が各地で見られた.従って,1階が柱で構成されているピロティー方 式の建物(高床式住居も含む)は,被害を免れることが多い.この地域での煉瓦造りの家が多く,強度的に はコンクリートに劣る.水圧を受けただけでも倒壊しており,さらに,流れが加わると煉瓦の壁などは粉々 に破壊された.

列車事故:交通関連のなど抵抗が少ないとさらに丈夫.今回,ゴール市北部のヒッカドア,カハワでは, 9両の列車が被災し千名以上の犠牲を出した.津波第一波が来襲した時に,この列車がたまたまこの付近を 通過しており,停止した.第一波は,陸上で僅かに浸水した程度で被害を出すことはなかった.この周辺の 住民も津波来襲の異変を見て,内陸側へ避難を開始している.その一部は,停車していた列車の内部へ逃げ 込んでいた.列車の車両は,車などと比較して強固であり,高さもあるために,住民にとっては安全に見え たに違いない.しかし,3-40分後(証言によっては15分程度)に来襲した第2波により飲み込まれてしまっ た.第2波の痕跡は浸水高で5m前後,局所的に10mに達する場所もあった.車両は大きな破壊を受けるこ とはなかったが,内部に浸水した海水により,ほとんどの乗客・住民は外にひげ出すことも出来ずに,水死 してしましった.一瞬に来襲した津波による悲劇である.第一波で避難行動を開始したが,場所が悪く被災 した.津波の場合,遠い場所よりも高い場所への避難が原則となる.

ゴールでの浸水:ゴール市は、旧市街(世界遺産にも指定されている城壁で囲まれた街)と新市街に分か

れる.この周辺でも津波の浸水高は5m程度であり、ほぼ同程度の高さで護られている旧市街と低い地盤で 防潮堤などもない新市街では、大きく被害状況を異にした.ゴール市では、大きな引き波(湾口付近まで海 面が後退し、そこでの水深は10mと言われる)の後、6m程度の押し波が来襲、新市街に浸入したものと考え られる.半島のような旧市街の左右に分かれた津波は、その背後にあるバスターミナルにも来襲した.西側 から浸入した津波の方が到達時間は早く、これを追いかけるように右側から津波が入ったと思われる.全く 違う方向からの津波来襲は、バスターミナルにいた多くの住民から証言を得ている.

港湾・漁港での被害:ベルワラ,ヒッカドアおよびでの漁港被害,ゴールでの港湾被害を視察した.前者 の漁港には石積みの防波堤(入り口の絞られた)があり,漁港の護岸もしっかりしている.そのために港内 と港外では,津波の浸水高さに差が生じ,内部での被害軽減に寄与したと思われる.ただし,防波堤そのも の破損し,港内の漁船が流出し座礁していた.石積みの護岸は高さが十分ではなく,津波の内陸部への浸入 低減の効果まではなかったと判断している.津波の流れが強い場所では,石積みが破壊・移動し,大きな岩 塊が何メートルも動いていた.これは危険な状況であった.ゴール港でも,津波浸水高は5m程度,護岸で の侵食,大型作業船の陸上への打ち上げ,港湾建物の1階部浸水が見られた.漁港も港湾も破壊的な被害を 受けていないが,機能は停止しており復旧復興のみならず地域社会への影響は大きい.

侵食:沿岸部,建物周り,橋脚や鉄塔周り,で大規模な侵食または堆積が見られた.上部構造は大丈夫で あっても,基礎部での侵食のために傾斜し機能低下が起こっていた.このような砂移動は,押し波だけでな く引き波でも生じ,衝撃的な力の作用より一方向の流れの継続時間が長いと大きな規模の侵食が生じていた. 沿岸部での植生基礎部の侵食である.恐らく,押し波での衝撃的な波力により砂が削り取られたと思われる. 狭い河口に浸入した津波が広い河道内に広がり,大きな渦を形成し,それが線路の基礎を大きく侵食させた. 深さ2m,長さ200m 以上,幅20m 位の規模であった.なお,アスファルトやコンクリートで被覆していると侵 食はない.

重要な課題

最後に,現在考えられる課題を以下にまとめたい.これは我が国の防災対策の向上にも貢献できるものを 期待する.

・巨大地震および津波の発生メカニズムの解明.

この地域でなぜこれだけ巨大な地震および津波が発生したのか、今後も発生する可能性があるのかを余震 データ観測や地震波解析で検討する必要がある.

・現地での災害実態の詳細な情報調査

来襲する津波の動画の収集と解析を実施する.1983年日本海中部地震津波を除いて津波の映像はほとんど 無い中で、今回各地で津波の動画が記録されている。これを収集し、津波の挙動に関して動的な解析し、実 態の解明に寄与させる.

・インド洋沿岸各国での防災対策の提言

現行の早期警報システムの適用と、さらには津波伝播のシミュレーションにより詳細な情報を提供できる. 我が国の防災技術(量的警報システム)が貢献でき、対象国で実施できる対策案を提言する必要がある.

・データベースの作成と長期的な教育啓蒙活動

今回の大災害の実態(映像,専門調査,メディア情報)や復旧・復興過程を後生に残す義務がある.また, 甚大な災害を経験しても,月日が経つにつれて記憶は忘れ去れる.継続的な啓蒙・教育活動が必要である. ・津波のメカニズム解明

- がれきなどの漂流物による破壊力増加(鉄道・車両の流出)
- 陸上や河川への遡上問題
- 土砂移動とのカップリング
- 建物との相互作用
- 防災施設(防波堤・防潮堤)の効果
- ●情報作成,伝達,住民への理解,避難行動

謝辞:本調査は,文科省・突発災害調査により実施された.ここに記して謝意を表す.

インド洋大津波によるスリランカの建築物の被害について

奥田泰雄

独立行政法人建築研究所、上席研究員

1 はじめに

2004年12月26日、インドネシア・スマトラ島沖で発生した M9.0の地震により、インド洋沿岸で大規模な 津波が発生した。スリランカでは地震発生後約1時間から1時間半で津波が東部海岸に到達し、その後に東南 部海岸に到達したとのことである。2005年2月現在、死者・行方不明者はインドネシアでは約23万6千人、ス リランカでは約3万5千人、インド洋周辺諸国全体で29万人を超えている。

日本は総額で5億ドルの無償援助を表明しており、その内スリランカには約80億円が供与される。JICA で は、2005年1月16日から29日までの日程で緊急援助隊・専門家チームをスリランカ・モルディブに派遣した。 目的は被災したスリランカ各県の代表者に直接面会し、緊急の援助および中長期的な復旧・復興のためのニ ーズ調査を行うことである。メンバーは JICA 専門家のほか国土交通省、内閣府等から5名の専門家が参加し た。本報告はスリランカ北部と東部の建築物の被害を中心に報告するものである。

2 スリランカについて

スリランカの面積は約65,000km²で北海道の約0.79倍の大きさがある。国土は先カンブリア期の地層に覆われており、その地形は中央高地、平原地帯、海岸地帯の3つに分かれる¹⁾。中央高地には2500mを超える山があるが、海抜30m以下の海岸の大部分は砂浜であり大小さまざまなラグーン(潟湖)を形成している。とくに東部と北部の海岸部に大きなラグーンが数多くある。全国の人口は約1900万人で首都コロンボの人口は約200万人である。

スリランカでは大きな地震は観測されず、またサイクロンも東部海岸に数10年に1度の割合で上陸する程度 である。したがって、建築物の設計では地震荷重は考慮されず、風荷重については英国建築基準をもとにオ ーストラリアの研究者が作成したもの(スリランカを3つの地域に分けそれぞれ基準風速を与えている)を 使用している。しかしながら、毎年雨季の集中豪雨では河川氾濫や土砂災害等が発生し、2003年5月にはス リランカ南部を中心に大規模な豪雨があり洪水や地滑りにより約300人が死亡した¹⁾。津波に関しては、コロ ンボでは約2000年前に大波が押し寄せたという言伝えや、1883年のクラカトア火山(インドネシア)の噴火 に伴う山体崩壊で津波が発生した際にスリランカでも1m程度の津波があったらしいという記録がある程度 である。

北部州のジャフナ県・キリノッチ県・ムライティブ県、東部州のトリンコマリー県・バチカロア県・アン パラ県は、反政府組織「タミル・イーラム解放の虎(LTTE)」の支配地域である。この地域は長期間にわ たる内戦により、インフラ等の投資が西部州・南部州に比べて非常に遅れている。

3 被害状況

スリランカ全体の被害状況²⁾は、表3.1のとおりである.2005年2月21日現在、死者31,147人、行方不明者 4,115人、負傷者23,059人、避難民546,509人、家屋全壊66,681棟、家屋半壊・一部損壊41,467棟である。

日 ケ	TT #4	在十十四半	丹梅 #	*** *** ***	*** *** ***	흐르스뱌	家屋半壊・	避難
県名	死 有	行力个明有	貝惕石	做灭世帝	微 災 看 剱	<u> 余 </u>	一部損壊	キャンプ
Jaffna	2,640	540	1,647	10,827	41,006	6,084	1,114	
Killinochchi	560	0	670	407	1,603	246	-	0
Mullaitivu	3,000	421	2,590	6,007	22,557	5,033	424	23
Trincomalee	1,078	45	1,328	30,545	74,061	4,830	3,835	34
Batticaloa	2,975	346	2,375	12,494	57,049	13,530	5,839	36
Ampara	10,436	161	6,581	38,866	99,501	18,889	8,641	55
Hambantota	4,500	1,341	434	3,334	46,998	2,303	1,744	11
Matara	1,342	608	6,652	2,235	9,278	2,362	5,659	22
Galle	4,248	564	313	23,278	121,934	7,032	7,680	27
Kalutara	279	69	401	7,059	34,947	2,683	3,835	12
Colombo	79	12	64	8,140	36,060	3,388	2,210	26
Gampaha	6	5	3	308	1,449	278	414	2
Puttlam	4	3	1	18	66	23	72	2
全体	31,147	4,115	23,059	143,518	546,509	66,681	41,467	262

表3.1 スリランカの被害統計²⁾

3.1 ジャフナ県

北部州のジャフナ県(図3.1.1 参照)では、スリランカ最北端 のポイントペドロを挟んで東西 の沿岸で被害が発生した。スリ ランカ軍の調べによると、ポイ ントペドロの東側で甚大な被害 が発生しており、沿岸から約 1km まで被害が及んでいるとの ことである。死者・行方不明者 は合わせて約2500人で約12600 以上の世帯が住家を失った。約



図3.1.1ジャフナ県詳細図



図3.1.2ポイントペドロ西側の海岸



図3.1.3 沿岸に建つ住家の被害



図3.1.4 建築中の住家



図3.1.5ポイントペドロ東側の海岸



図3.1.8樹木の被害(ポイントペドロ 東側)



図3.1.6ポイントペドロ東側の被害



ポイントペドロの西側では、沿岸部は海面より約1mの高さにあり、 沿岸から沖に約50m は水深が約0.5m の浅瀬になっている(図3.1.2参 照)。その先に岩を積んだ防潮提を築いていたが津波により破壊さ れてしまったとのことである。

また海岸に道路が近接し、海岸と道路の間の狭い土地にも住家が 建ち並んでいたが、大半の住家が全壊した(図3.1.3参照)。しかし ながら道路を挟んで内陸側の住家の被害は比較的軽微であった。国 立住宅開発局(NHDA)によるとスリランカの住宅の約80%はブロッ

ク造であるとのことであるが、この地区での住家の壁はレンガではなくセメントブロックを使用しているよ うである。被災後1ヶ月経たない時期であったが既に建築中の住宅が多数見られた(図3.1.4参照)。ポイン トペドロの灯台には目立った被害はなかった。

一方ポイントペドロの東側にはマナルカドゥ砂丘(図3.1.5参照)がひろがり、その砂丘上に沿岸近くまで 住家があった。住家はその被害は甚大であり内陸まで被害があった(図3.1.6参照)。住家に残る津波痕から この場所での津波の浸水高は地表面から約3.5m あったと考えられる(図3.1.7参照)。樹木の被害では、椰 子の木のように細長い幹をもつ樹木は倒木を免れていたが、図3.1.8のような樹木は倒れていた。



図3.2.1キリノッチ県・ムライティブ県詳細図

3.2 キリノッチ県

キリノッチ県は北部州の1つであるが、ジャフナ・ラグーンおよび東海岸にあたるポーク湾に面し、東部 海岸および北部海岸には面していないため、大きな被害は発生していないとのことである。ただし、隣県の ジャフナ県(主に南東部の被害の大きかったマルサンケニー地区)から被災民が避難してきており、仮設住 宅の提供等も含めて支援を要請している。

3.3 ムライティブ県

ムライティブ県はジャフナ県の南東側に位置し、被災1ヶ月後の2005年1月26日現在、死者・行方不明者は 合わせて約3300名で、死者数の大半はムライティブ地区で死亡したとのことである。被災者数は約25,000人 で75%は漁民である。漁業施設の95%が全壊したとのことである。被害は極めて甚大であり、ムライティブ 地区にあった県庁を含む25行政機関も浸水によって被災し行政機能が停止していた。図3.3.1に示すように沿 岸部にあった住家がほとんど流失していた。図の中央と左に RC 柱群(学校と思われる)が残っているが壁 は流されていた。沿岸から約100m のところにあった住家に残る津波痕から津波の浸水高は地表面から約3m あったとみられる(図3.3.2参照)。



図3.3.1ムライティブ地区での被害





図3.4.1トリンコマリー県詳細図



図3.4.4 RC 建築物の被害(キニヤ地 図3.4.5 住家の被害(キニヤ地 図3.4.6 被害を免れた住家 区)

3. 4 トリンコマリー県

トリンコマリーは古くから漁港として知られ、東部海岸の玄関でもある。トリンコマリー県での被害は、 コディヤール湾の奥に位置するキニヤ地区とムトゥール地区での被害が大きく、キニヤ地区の死者は約500 人とのことである。トリンコマリー県知事の話では「一旦100m くらい潮が引いてから波高が約15フィート (約4.5m)の津波が来た」とのことである。トリンコマリー県庁は湾の入り口の岬に作られた砦(フォー ト)上にあり被災を免れたとのことである。トリンコマリー県では沿岸部の約6500世帯が被災し、内陸側の 学校やテント村等の避難しているとのことである(図3.4.2参照)。図3.4.3は沿岸部にあった病院で海側の病 棟の壁が倒壊し、天井が落ちていた。室内に残る痕跡から津波は床面から約2m の高さまで来ていたとみら れる。右図はさらに内陸側の病室であるが外観上は大きな被害は見られなかった。図3.4.4は沿岸部に建つ RC 建築物の被害で、壁と屋根は流失し基礎と RC 柱のみ残っていた。図3.4.5は基礎のみ残った住家の跡である。 この地域では内陸側に数100m まで被害が及んでいた。一方、図3.4.6はキニヤ地区から少し南に離れた地区で 沿岸部数10m の場所に建つ住家でも目立った被害はなく、コディヤール湾内でも被害の軽重があった。

3.5 バチカロア県

バチカロア県は東部海岸の中央に位置し、津波の被害が最も甚大であったところである。ラグーンを挟ん で両岸にあった町が津波の被害を受けた(図3.5.1赤枠部参照)。とくに外海に面したラグーン外側の町は幅 数100mの砂州上にあったが(図3.5.2参照)、完全に流失し更地になってしまっていた(図3.5.3参照)。流失 した瓦礫はラグーン内に沈んでおり、ラグーン内での漁ができなくなってしまったとのことである。この砂 州では外海側に防風林が道路に沿って植林されていたが(図3.5.2参照)、大半は津波によって内陸側に傾斜 し一部は根元あるいは幹から折れていた(図3.5.4参照)。また、井戸の RC 管は洗掘により浮上っていた



図3.5.1 バチカロア詳細図



図3.5.2 ラグーン外側の砂州



図3.5.3ラグーン外側の被害



図3.5.4 防風林の状況



図3.5.5浮上った井戸



図3.5.6ラグーン外側の被害 図3.5.7 ラグーン外側の被害 図3.5.8 ラグーン内側の被害 (図3.5.5参照)。図3.5.3 (左側) と図3.5.5に示すように唯一ヒンズー教の神殿 (コービル) だけが残っていた。ラグーンの外側でも南側の地域では住家は倒壊したものの流失にまでは至っていたらず、井戸の RC 管 も残っていた (図3.5.6-7参照)。またラグーンの内側にまで被害は及んでいた (図3.5.8参照)。

3.6 アンパラ県

アンパラ県の県庁は内陸のアンパラ地区にあるが、大半の町は東部海岸沿いの幹線道路 A4沿いにある。 幹線道路と海岸の間の砂地に町が形成されており、幹線道路から内陸側は湿地帯や水田が広がっている。こ の沿岸地域(カルムナイからポツビルまでの全長約80km)で被害が発生し、死者・行方不明者は約11,000人、 住家は約29,000棟が倒壊した。約75,000人が82ヶ所の避難所(学校、テント村等)に避難している。

図3.6.2-4はカルムナイの被害の様子である。カルムナイは沿岸から内陸側約1km のところに幹線道路 A4が 走り、沿岸部から幹線道路周辺までの間に町が形成されている。沿岸部100m 以内にあった住家(大半は漁民 の住居)はほとんどが全壊し、ボート、漁網等が散乱していた。沿岸から約50m のところに学校が3棟あっ たが、2棟は流失し1棟は倒壊していた(図3.6.5)内陸側に行くにつれて徐々に被害は小さくなっているが、 住人は避難しているようであった。幹線道路沿いの住家の被害はほとんど無く人通りもあり住民はこれまで の生活を送っているようであった。

沿岸から100m(あるいは200m)以 内は建築規制地域とするスリランカ 政府案を受けて、アンパラ県知事は 沿岸で被災した漁民の住居を移築 (re-location) する計画を提案し、日 本の支援を要請した。知事の提案は、 1)沿岸から200m 以上の地域に3-4階 建ての集合住宅を建てる、2)沿岸部に は漁民のための漁具の倉庫等を建築 する、3)タミル人(ヒンズー教)とム ーア人 (イスラム教) のコミュニテ ィーを分ける、というものであるが、



図3.6.1アンパラ県詳細図

住民の合意形成等の問題があり十分にプランを練る必要があるだろう。 ティルコービルでは幹線道路が沿岸から僅か100m 程度のところを走 っており、その間に住家があったが、図3.6.6のように基礎を残して住 家が流失しているところがあった。右の構造物は貯水槽と見られるが、 基礎まわりの砂が洗掘により流失し傾斜してしまっている。

被災者の多くは図3.6.7のようなテント村に避難していた。大半のテ ントは各国から支給されたもので、中には枝木で支柱をつくりシート を被せた簡易のテントもあった。各テント村には給水タンクが常備さ れ、物資の配給も十分あるようであったが、テントでの長期間の生活 は不便も多く仮設住宅や恒久住宅供給の要望が多かった。





図3.6.2 沿岸部(100m 以内 カ ルムナイ地区)



図3.6.5 学校の被害(カルムナイ 地区)



図3.6.3 沿岸部 (100-400m カル ムナイ地区)



図3.6.6 住家の被害(ティルコー 図3.6.7テント村(ポツビル地区) ビル地区)





図3.6.4 幹線道路沿い(約1km カルムナイ地区)





図3.7.1 宗教施設の被害

図3.7.2 植生の効果



図4.1 国立住宅開発局 (NHDA) が販売する被災者用恒久住宅プラン³⁾

3.7 被害の特徴

スリランカ北部州と東部州は南部州・西部州に比べて開発が遅れており、住宅は平屋がほとんどである。 住宅の壁は1層の煉瓦を積んだものであり、津波の衝撃的な波力を受けたものは基礎を残して上部構造物が 破壊さていた。学校や病院の壁は2層の煉瓦造であり、住宅よりは強度があったと見られるが、多くの学校 や病院が被災していた。一方、宗教施設は3層(あるいはそれ以上)の煉瓦造のもの(図3.7.1参照)があり、 周辺の建築物が流失したバチカロアの砂州上でも残っていた(図3.5.3、図3.5.5参照)。また植生による被害 の低減効果は確認できた(図3.7.2参照)。

4 災害復旧について

今回の JICA の現地調査は被害状況の把握よりも現地のカウンターパートを直接訪問し、短期・中長期的 な復旧・復興に対する要望をヒヤリングすることに重点が置かれていた。この要望の中で最も多かったもの は仮設住宅や恒久住宅の供給であった。次いで学校・病院等の公共施設の再建と整備である。道路・橋梁と いったインフラの整備という要望は少なかった。これはこの調査が被災後約2-3週間で行われたためであろ う。当時現地は被災者の対応で非常に混乱しており、住宅供給といった要望が最初に出てくることは尤もな ことと考えられる。

仮設住宅の要望の主な理由は「学校を避難所として使用している被災者を早急に移動させて学校を再開す るため」とのことであった。恒久住宅は沿岸部に住んでいた被災者を移動させる目的もある。スリランカ政 府は被害発生直後に全国の沿岸部から100m(あるいは200m)の地域を建築規制区域に指定する施策を提案 した。しかしながら、既に沿岸部では住宅が修復されている地域もあり(図3.1.4参照)、どの程度この規制 が効果的に機能するかは疑問である。既に住民から強い不満の声が出ているとの報道もある⁴⁾。また、前述 のように移築にあたっての住民との合意形成、私有財産を直接援助すること等の問題があり、日本だけでな く各支援国とも住宅の供給に関しては消極的であった。一方、国立住宅開発局(NHDA)³⁾では被災直後か ら被災者用恒久住宅プランを発表し、19万ルピー~200万ルピーで販売している。

JICA はこのような要望調査を踏まえて以下のような地域復旧・復興計画事業を提案している。

1. インフラの再建計画

道路・橋梁・水道等のインフラの再建(電力に関しては復旧している)

住民移転計画の補助 住民との対話の機会を設ける
 インフラ計画との連携

移転後のコミュニティー再構築の支援

3. 公共施設再建計画

学校・・・避難キャンプの移転や住居移築計画等と連携する必要がある 病院・・・再建計画では数・配置等を十分検討する必要がある 警察署・・地域の治安を安定させるために必要

4. 漁業復興計画

漁港と付帯施設の修築、流通システムの整備、漁民の協同組織化、海中の瓦礫処分、漁業手法の改良等 5.防災教育の普及

津波慰霊塔の設立等

最初に触れたようにスリランカでの津波災害は極めて稀な事象であり、現地の専門家からもこのような稀 な被害に対してどのような効果的な対策をとることができるのか、という意見が出されている。このような 意見もあってか JICA が提案した事業計画では、復旧・復興に重点が置かれており、新たな津波対策につい てはどちらかといえば消極的である。

また、要望では低位にあったインフラの整備が事業計画の中に入れられているが、地域を再建するために は当然インフラの整備が必要不可欠である。またもともとスリランカ東部州・北部州の各県は LTTE との内 戦によりもともとインフラへの投資が停滞していた地域である。そこでこの事業計画の中でこの際インフラ の整備を重点的に行うことでこれらの地域の復興支援を行うという JICA の狙いがある。

また上記の事業計画を実施する際の配慮事項として、

- ・ 社会的弱者に対する配慮(被災者支援、トラウマケア)
- 公衆衛生に対する配慮(下水処理)
- 住居移転に対する配慮
- 雇用確保(臨時も含む)に関する配慮(就労支援)
- コミュニティー再構築に関する配慮

を挙げている。

5 さいごに

JICA 緊急援助隊専門家チームに参加し、スリランカ東部州・北部州での津波被害状況を調査した。バチカロア県では砂州上の建築物のほとんどが流失した地域があり本調査で最も甚大な被害であった。

スリランカにとっては極めて稀な津波災害により未曾有の被害を受けた。被災後約3ヶ月がたって漸く中 長期的な復旧・復興計画が段階であろう。その意味でスリランカの復旧・復興はこれからであり、どのよう な形で復旧・復興がなされるのか見守っていく必要がある。

謝辞

本報告を纏めるにあたり、外務省、国土交通省、JICAの関係各位に謝意を表する。とくに、スリランカ 現地大使館、JICAスリランカ事務所の関係各位には現地調査で様々な面でご協力を頂いた。また同行した 緊急援助隊隊員の各位に2週間にわたる現地調査で非常にお世話になった。あわせてここに謝意を表したい。

参考文献

- 1) http://donko.civil.tohoku.ac.jp/sl_rep/ch1.pdf, ch2.pdf
- 2) http://w3.whosea.org/en/Section23/Section1108/Section1835/Section1851/Section1865_8826.htm
- 3) http://www.nhda.lk/TSUNAME-basichouse.htm
- 4) http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20050319-00000060-mai-int

スマトラ島地震津波の最大被災地・Banda Aceh 市での調査結果 都司嘉宣

1. はじめに

スマトラ島地震による津波の最大被災地となったのは、インドネシア国スマ トラ島最北端に位置する Banda Aceh 市と、ここを起点として同島の西側に続く 海岸線であった。Banda Aceh 市では人口約25万人あまりの都会で、そこでの死 者数は約4万人であった。今回の津波の全世界の死者は30万人と推定されて いるから、その約7分の一はこの町で生じたのである。今回、筆者を団長とす る国際津波調査団が組織され、同市とそれに連なる西側海岸、および同市の東 約80km にある Sigli 市の調査をする機会を得た。団は日本から7人、米国から 2人、フランスから2人、それにインドネシア側から6人の17人の大所帯で あった。日本から参加した団のメンバーは筆者のほか、北海道大学の谷岡勇市 郎、西村祐一、秋田大学の松富英夫、つくば産総研の鎌滝孝信、電力中央研究 所の榊山 勉、関西電力の村上嘉謙の各氏である。米国の参加者は Kent State 大 の Andrew Moore 氏と、USGS の Guy Gelfenbaum 氏であった。

インドネシアはこれまでにも 1992 年のフローレス島地震津波、1994 年の東ジ ャワ地震津波、1995 年のイリアンジャヤ・ビアック島地震津波など、津波が頻 発しており、そのたびごとに筆者も調査に出かけたが、今回のように死者数の 多い津波災害は筆者にとっても全く未経験の出来事であった。

今回の調査には、これまでの津波調査にはない困難がいくつかあった。第一の困難は、Banda Aceh 市を州都とするナングロ・アチェ・ダルッサラム州には インドネシア軍と敵対関係にある独立運動組織(GAM)の勢力があって、頻繁 に局地的な銃撃戦が起きていると報道されており、Banda Aceh 市と Meolaboh 市 をのぞいては、外国人の立ち入りがきびしく制限されていた。われわれの調査 でも、市街地と西海岸の一部をのぞいては、ほとんど自由に立ち入ることはで きなかった。地元のレンタカーの運転手が恐れて市街地を少しでも離れた山の 迫った場所へは行けないのである。

困難はまだあった。津波によって中心街の6割が流失、浸水して市内のホテ ルのすべてが営業を停止していた。そのうえ、銀行もほとんどが閉鎖状態であ った。津波で被災した街区は、眼を覆いたくなるような惨状を呈していて、悪 臭が鼻を突き、不潔な泥水が地面を覆い、釘の突き出た材木が一面に散乱して いた。調査団員はみな連日、人間の死体を目撃した。

このような、様々な困難があったが、我々はレンタカー5台に分乗し、相互 に衛星携帯電話などで連絡を取りながら安全を確かめ、また日本とも毎日3回 ずつ連絡をとりあって安全確認とその日の成果報告の通信を行いながら調査を 進めた。日本側での通信の受け手は、地震研究所の行谷氏であった。同氏は受 信するごとに津波研究者のボードに載せ、また文部科学省に毎日の我々の行動 を通知し続けた。このように日本との安全確認を密に行った海外調査は今回が 初めてのことではないかと自負している。われわれが毎日日本に送った測定デ ータは、ハワイの津波情報センター(ITIC)のインターネット・ボードにも伝 えた。このデータに基づき、我々の調査が終わるとほぼ同時に、日本側では電 力中央研究所の松山昌史氏によって、図1のような総合成果図が完成していた のである。

Measured tsunami height(m)



2005/1/30

図1. スマトラ島沖地震の津波浸水高さ分布、松山氏作図による

2. Banda Aceh 市街の地震津波被害

地震による揺れの被害は、百貨店やホテルの高層ビルにやや見られたが、2 階建て以下の一般の家屋にはほとんど地震そのものの被害は見られなかった。 Banda Aceh市は、東西方向、南北方向ともに8kmほど住宅地・商業地の連なった大きな町で、その中心に大モスクが建っている。モスクの場所は海岸線から約4kmの内陸に位置するがここで津波が敷地から1mほど浸水している。 古い Banda Acehはこのモスクを中心として広がったが、近年、海岸線方向に町が拡大し、比較的裕福な人々が海に近い平野部に新しく住宅街をのばして、 大モスクの北西 Ulee Lheue と呼ばれる港地区までつらなった。そうして、今回の津波でもっとも重大は被害にあったのも、この海岸線に近い新興の街区だったのである。



図2. ほとんどすべての家が流された Banda Aceh 市の海岸にちかい住宅地区

今回の津波では、Banda Aceh 市の市街地では海岸線からやく2kmあたりま では、ほとんどすべての家が流されて、かろうじて原形をとどめて残っている 家がほんのわずかポツンと見える程度であった。海岸線から3kmあたりでは、 とにかく残った家と流された家が半々ぐらい。海岸線から4kmあたりでは、 家屋はほとんど流されず浸水にとどまった。ただし、浸水にとどまった家も、 屋内に厚さ10センチもの不潔な泥が堆積して悪臭が立ちこめ、住みとどまっ ているひとはほとんど1人もいなかった。浸水は海岸線からおおよろ5kmか ら6kmのところにまで浸入していた。

われわれは、港と大モスク付近を結ぶ Iskandar Muda 通りに A から G まで 7 点の基準標高点を定め、港を起点として反復測量することによってこれらの基 準標高点の平均海面を基準とした標高値を定めた。さらにも内陸側の基準標高 点 A から大モスクに測定線を延ばし、モスクの背後の Krueng Aceh 川の水面の 標高を測定し、その水位が海面上ちょうど 1.00mであることを確認した。これ によって、川の水面もまた、標高測定基準として使用できることとなり、Iskandar Muda 通り、Krueng Aceh 川に沿った家屋の多数の水位痕跡から、津波の浸水 標高の分布を面的に知ることができるようになったのである。その成果を図2



に示す。

図3. Banda Aceh 市市街地での津波浸水標高分布

港付近には港のモスクが海岸線のすぐそばにあったが、その建物は大きく壁 が破壊されながらもよく残っていた。図3の港付近の2個の星印のうち、下側 の星印がその位置である。海水は、このモスクの2階の「かもい」の上のアラ ビア文字でコーランを記した帯飾り看板の上まで来ており、この標高は12.2m であった。この場所の標高は約1m程であるので、津波が襲ったときこのあた りは厚さ11メートルの海水で覆われたことになる。その約1km南東方向に 中学校の校舎が残っており、ここでは2回の天井板の上方50cmに海水痕跡 があって、8.8m と測定された。図3には、この付近にはほとんど測定点がない が、ほとんど建物が残っておらず、津波水位を測定できたのはこの中学校ぐら いしかなかったのである。校舎の鉄筋柱の倒された方向から流れの方向を推定 したのが図3に書き入れた矢印である。津波は海岸線にほぼ直角方向から浸入 している。

3. 西海岸の津波浸水高さ

今回の地震の震源はスマトラ島北部の西側海岸沖にあり、ここを起点とし て北方にアンダマン諸島の北端にまで滑りが進行していったとされる。このこ とから、Banda Aceh市の市街地は、大きな津波が来たと言ってもスマトラ島北 端とその北側に連なる Breue 島、Weh 島などの陰に位置している。これに対し て、Banda Aceh市街地から南西に向かってわずか15キロにすぎないが、西海 岸にあって、震源に直接面している Lhoknga 村の海岸では、津波は想像を絶す る浸水高さを示していた。同村は、Banda Aceh 市の郊外住宅地として、海岸の 背後の標高10m前後の砂丘の上に居住地が広がっていて、裕福な居住者たち の豪勢な家屋が建ち並んだ場所であった。それが、土台と散乱したがれきを残 して文字通り跡形もなく集落全体が消滅していた。この標高約10mの砂丘の 上に立ってみると、かろうじて残った椰子などの木の、さらに見上げるほどの 高いところまで枝の折れた痕跡を観察することができる。また、付近の山の裾 には、津波によって一定の高さまで植物がきれいに洗い流されて、岩盤がむき 出しになっている。その高さ以上の津波がこなかった場所は、何事もなかった ように緑したたる植生を残しており、津波限界を示す境界がきわめて明瞭に観 察できる。図4にこれらの津波痕跡に基づいて測定した津波の浸水標高値を掲 げた。太線は海岸線、細線は衛星写真から読みとった津波浸水限界線である。



図4. Banda Aceh 市の西方、Lhoknga 村付近の海岸の津波浸水高さ R は斜面の浸水高さ、M は家屋・船腹などの水位痕跡標高、T は樹木の 枝折れや付着物による津波浸水高さの測定値

Lhokonga 村の背後には、津波によって運ばれてきた海水が滞留して一時的に

広大な「湖」が出現した。津波によって運ばれた海水には、泥や植物片、家屋 の材料、家具などが大量に混じっていて、これらが堆積して一種のダムとなっ て流出路をふさいだのである。

Lhokonga 村の南側には立派な道路鉄橋があったが、津波に流失した。その 橋の修復工事は我々の滞在中の1月26日に完成し、この日以後、車による南 下が可能になった。しかし、西海岸唯一の交通手段であるこの道路のほとんど すべての橋が津波に流失したことがヘリコプターなどによる視察で判明してお り、約200キロ南にある Meulaboh 市を含め、ほとんどが消滅状態の途中の数多 くの被災集落が車による交通手段を回復するまでまだまだ長い年月を要する事 となるであろう。

この道路橋から約2km南下したところに、この地方最大の産業であったセ メント工場がある。この工場も津波による重大な被災を受けて操業を停止して いた。このセメント工場の手前、山裾が少しくぼんで谷になっているところが あり、この谷筋にそって津波が上がった。筆者らはこの谷筋に沿って海水到達 点まで踏査してみた。その結果、海水はこの谷を標高 34.9mのところまで駆け 上がっていたことが判明し、これが、今回の調査の津波浸水高の最高値となっ た。この値は、1993年7月の北海道南西沖地震の奥尻島モナイでの 30.6m を越 えるものである。



図5. 津波浸水高さ34.9mを記録した谷



図6 Lhoknga 村のコンクリート工場南方約1kmの谷での津波浸水 のようす。図4の29.7mと書かれた地点。津波浸水の限界線が明 瞭に現れている。人物の身長と対比されたい。

図1、あるいは図4から分かるように、今回の津波では、この Banda Aceh 市の西海岸では、津波浸水高さが 30mを越える点がありふれて見られる。今回 の津波のとほうもない大きさに、改めて驚きを禁じ得ない。

ビデオ画像による津波氾濫流速と現地調査による推定値との比較

勉¹⁾、松富英夫²⁾、都司嘉宣³⁾、村上嘉謙⁴⁾ 榊山

1)(財)電力中央研究所 流体科学領域 2)秋田大学 工学部 3)正会員 東京大学 地震研究所 4) 関西電力(株) 土木建築室

1 はじめに

津波の氾濫流速は、家屋などに作用する流体力の評価(松富・首藤、1994)、また、避難計画の策定のため に重要な情報である.この津波の氾濫流速に関しては、これまで現地調査において家屋などに残された上流 側と下流側の津波の痕跡高さを調べ、これらの水位差による位置エネルギーが運動エネルギーと等しいとし て推定されていることが多い、今回のスマトラ沖地震による津波に関して、海岸に来襲する津波や陸上での 流れの様子が多くのビデオで撮影され報道された.バンダアチェでは、大河のように流れる津波の氾濫の様 子や通りに津波の先端が到達し始める段階から流れの様子がビデオで捉えられた.

著者らは,2005年1月中旬から末までインドネシアのバンダアチェを中心に津波被災調査を行った.この 調査ではこれまでの津波被災調査に加えて、ビデオ画像の流れの解析のために、報道されたビデオ映像の流 れの背景にある建物の大きさを測量した. ビデオ画像上の既知の距離を流れる漂流物の時間経過を解析して 流れの速さを算出できる。これまで水位差から推定してきた津波の氾濫流速に比較してより精度良く評価で きるものと考えられる.この結果を従来の津波の氾濫流速の推定値と比較する.

2 インドネシア津波調査の概要

日本からのインドネシアへの津波調査団(団長都 司嘉宣,東大地震研,他6名)は,2005年1月17日に 日本を発ち、現地でアメリカ人2名とインドネシア 気象庁職員5名他と合流し総勢15名で構成され、1月 20日から1月28日までバンダアチェを中心に津波に よる被災調査、津波の痕跡高さ、津波による堆積物 の調査を行い、2月1日に帰国した. 津波痕跡高さや 被災調査の結果は,毎日速報として東大地震研の website に掲載された.

図-1はバンダアチェ市内のグレートモスクから南 に約500mの位置にある ISKANDAR MUDA 通り(本 編では JL.を通りと訳す)沿いに設定した基準点 Point A から Point G を経て, Ulee Lheue 海岸に至る 経路を示したものである. Ulee Lheue 海岸では約 12m, Point G 近くの中学校で8.8m, Point A 近くで も約5mの痕跡高さを記録した.



津波の氾濫の様子が撮影された場所を示す. Putri 家は LHOKNGA 通り沿い近くにあり,海岸線から約2km, グレートモスクは MOHAMMAD JAM 通りに面し約3kmの内陸に位置する.

3 ビデオ画像の解析方法

撮影されたビデオは、家の住人や放送局のスタッフが撮影したもので、実験などで流れ場の画像解析のた めに撮影されたものとは当然大きく撮影環境が異なる。そのため、撮影された画像から流れの解析に適した 場面を抽出することにした、画像の歪みの補正は行えないが、痕跡高さの水位差から流速を推定する方法に 比べれば,直接的に算出できる方法である.解析方法を以下に示す.

1)ビデオ画面がほぼ固定され、津波による流れで小型の漂流物の移動が確認できる時間帯を抽出した.

2)漂流物が背景の家屋や壁などの近くを平行に近い状態で流れる時間帯を対象とした.

3)このような時間帯のビデオ画像を静止画像に変換した.

4)背景に写る空間スケールが分かる家屋などを通過するフレーム数をカウントし、所要時間を算出した.

5)通過する距離を所要時間で除して漂流物の速さとし、これを流れの速さとした. 6)家が流される速さも求めることができたが、漂流物が大きいため、流れの速さとは区別した. 7)それぞれのビデオ解析結果の精度について触れることにした.

4 ビデオ画像解析結果

対象としたビデオ画像は以下の2本である.

1) Putri家で撮影されたビデオ:配信時間約2分30秒

2) 市内のグレートモスクで撮影された MOHAMMAD JAM 通りの津波のビデオ:配信時間約2分20秒

4.1 Putri家で撮影されたビデオ

(a) 赤い屋根の家に沿う流れ

図-2に示す赤い屋根の家を通過する流れを対象に漂流物の移動を求めた.現地では図-2に示す赤い屋根の 右端にある白い三角形の鉛直線から左端までの距離を測定し,基準とする距離として6.9m を記録した.また,Putir家の地盤高さを基準とした下流側の痕跡高さは3.77mである.

図-4(a)にこの家を通過しはじめる漂流物の静止画像(フレーム no1258)を,図-4(b)に通過し終わった時の静止画像(フレーム no1295)を示す.1秒間に29.97フレームでビデオ画像を再生しているので,フレーム間の経過時間は0.0334s である.

19:19:02 frame 1258 3^{5} 6.9/{(1295-1258)* 0.0334}=6.9/(37*0.0334)=6.9/1.236=5.6m/s

以上の結果から, 流速5.6m/s を得た.

家の幅6.9mを通過する所要時間は1.267sである.通過したとする画面の選択が1コマずれたとすると, 6.9/(38*0.0334)=5.4m/s, 6.9/(36*0.0334)=5.7m/s となるので, -0.2m/s から0.1m/s 変化し, 5.6m/s に対して-10% から5%の誤差となる.

(b) 家が流される速度

同じビデオには、図-3に示す黄緑色の家の前を別の家が流されていく様子が冒頭に記録されていた.図-5 に流される家の屋根の前側の頂点が図-3の家の半幅を通過しはじめる画像と通過し終わった時の画像を示す. 同様に、図-6に流される家の後側の屋根の頂点が通過しはじめる画像と通過し終わる画像を示した.

図-5の結果(294frame から309frame) 3.2/{(309-294)*0.0334}=3.2/0.501=6.4m/s 図-6の結果(307frame から323frame) 3.2/{(323-307)*0.0334)=3.2/0.534=6.0m/s

上記の値の平均値として6.2m/s を採用する. この値は, (a)の赤い家の屋根の前の流速5.6m/s と近い値であ るが,実際には家のような大きな物体の流れる速さは周囲の流体の流速より遅くなる. 家が流されている背 後にある図-3の黄緑色の家と Putri 家の間の距離は約28m で,図-2の赤い屋根の家と Putri 家との距離は約 60m である. 空間的スケールから流速に大きな変化が生じることは考えられにくく,画像の大きさの違いに よる解像度の影響と考えられる.

(c)水位差から推定した流速との比較

図-2の赤い屋根の家では上流側の痕跡高さを確認しなかった.図-4のビデオ画像では上流側と下流側の有 意な水位差は認められない.一方,Putri家では図-7に示すように、上流側の痕跡高さは5.60m,下流側の痕 跡高さは3.9m であった.下流側の痕跡高さとして、赤い屋根の家の3.77m も使えるので、下流の痕跡は2個 のデータを得たことになる.それぞれの痕跡高さの差から、流速として5.8m/s, 6.0m/s を得る.前者の Putri 家の痕跡高さの水位差から推定した流速値である5.8m/s はビデオから求めた流速にほぼ一致している.

 $\Delta h = 5.61 \text{m} \cdot 3.9 \text{m} = 1.71 \text{m}, \quad u = \sqrt{2g} \Delta h = 5.8 \text{m/s}$ $\Delta h = 5.61 \text{m} \cdot 3.77 \text{m} = 1.84 \text{m}, \quad u = \sqrt{2g} \Delta h = 6.0 \text{m/s}$

赤い屋根の家の痕跡高さから浸水深(地盤から津波痕跡までの高さ)は、3.77m であるので、これらからフ ルード数を算出すると

 $F_r = u / \sqrt{gh} = 5.6 / \sqrt{9.8 \times 3.77} = 0.92$

を得る.流れは常流であり、ビデオで見られる流れの様子と一致する.



図-2 ビデオに撮影された家屋の寸法-その1-



図-3 ビデオに撮影された家屋の寸法-その2-



(a) 漂流物が通過し始める画像
 (b) 漂流物が通過し終わる画像
 図-4 流れの大きさを求める対象とした画面



(a) 家の基準点が通過し始める画像

(b) 家の基準点が通過し終わる画像









(b) 家の基準点が通過し終わる画像

図-6 家が流される速さを求める対象とした画面-2-



(a) 上流側の痕跡高さ

(b) 下流側の痕跡高さ

4.2 市内のグレートモスクから撮影された MOHAMMAD JAM 通りの津波のビデオ

図-8(a)に対象となる地点をグレートモスクの4階から撮影した写真を示す.写真の手前側がグレートモスクの敷地になる.津波の氾濫流は、最初交差点の右上の方向から到達し、その後、交差点の左上の方向からの流れが交差点で合流し、写真の左下の通りへと進んだ.この交差点に集まる通りの幅が異なるようにみえるのは、グレートモスクの反対側の建物(役所らしきものの部局)の柵が壊されたためである.

MOHAMMAD JAM 通りのビデオ画像から,流れを算出できる映像を選んだ結果,対象となる背景のスケールを図-8(b)に示す.赤字の看板 Nasional のある2階建ての商店(?)を背景にした流れの映像が約5秒間続いていた.そこで,3本の柱の間の距離6.6m を通過する3個の漂流物の移動をビデオ画像で確認した.それらの結果を図-9,-10,-11に示す.これらから漂流物の速さを求めると以下の値を得る.

漂流物1の結果(frame 2000 から2040)
 6.6/{(2040-2000}*0.0334}=6.6/1.336=4.9m/s
 漂流物2の結果(frame 2042 から2080)
 6.6/{(2080-2042}*0.0334}=6.6/1.269=5.2m/s
 漂流物3の結果(frame 2074 から2110)
 6.6/{(2110-2074}*0.0334}=6.6/1.202=5.5m/s

図-7 ビデオが撮影された Putri家の痕跡高さ



(a) グレートモスクから見た通りの状況

(b) 流れの背景の建物の寸法

図-8 グレートモスク前の通りの津波氾濫流速の算出

以上の平均値として,流速(4.9+5.2+5.5)/3=5.2m/s を採用する. 誤差は約15%である. 図-10(b)に示すように 1階の屋根から水面までの距離を画像より算出し,測定した地面から屋根までの高さから水深を逆算すると 浸水深として約1.6m を得る. したがって,この流れのフルード数は1.3となる. この流れは射流である. た だし,この交差点での流れは,単純ではない. 2方向から流れが合流する位置である. この流れの画面では, 左上の通りには車がみられ流れが遮断されているようにみられる. さらに,流れに抵抗して留まる障害物が あるようで,ドラム缶などの漂流物が停滞していることがみられた. 映像によると,この下流は射流にはみ えない.

流速を推定するための痕跡高さの組み合わせはこのような密集した地点では適用できないので,2.1のように現地調査に基づく流速の推定値との比較はできない.

5 最後に

最も単純な原理に基づく津波の氾濫流速の推定方法による流れの値と、ビデオ映像から得られた流れの値 は、ほぼ一致したといえる.この結果は、本調査を調査目的に挙げた第一著者の予想に反した結果であった. 比較できたデータが1点だけということもあり、この結果をもってこれまでの推定方法が妥当であると結論 付けるのは困難であると考える.編集されたビデオによると、少なくとも2004/12/26の地震発生現地時刻 07:58の約1時間後の08:50:18から09:18:38まで録画されている.この間に、09:04:30には引き波の様子が、 09:16:17には砕波する津波が撮影されている.オリジナルの映像を入手し、さらに解析を進めることでバン ダアチェ市内に来襲した津波の実態を解明することができるものと考えられる.

今回得られた流れの速さはともに、約5m/s で、時速18km/h に相当する.少し速い自転車の速さになり、 到底人間が逃げ切れる速さではない.大半の家屋が破壊された Putri 家の周辺には、この流れのなかで残っ ている家屋がある.破壊された家屋が約5m/sよりも速い津波の先端の流れによる衝撃的な流体力によるもの である可能性が考えられる.

現在日本では、津波避難ビルの設計法が検討されている(岡田ら,2004). この検討では、護岸に遡上した非 分裂波と分裂波による建物に作用する流体力に関する水理模型実験により測定された波圧分布(朝倉ら, 2000)が採用されている.現地調査結果から推定される流体力と実験結果の流体力との比較が今後の課題と 考える.

謝 辞

本調査は、都司東大地震研助教授を調査団長とし、インドネシア気象庁の協力のもとで実施されたもので ある.調査費用は、科学研究費補助金(特別研究促進費)「2004年12月スマトラ沖地震津波災害の全体像の 解明」(研究代表者:京都大学防災研究所河田惠昭,課題番号:16800055)から充てられた.ここに記して 謝意を表します.

参考文献

1) 松冨英夫, 首藤伸夫:津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, 1994, pp.246-250. 3)岡田恒男, 菅野 忠, 石川忠志, 扇 丈朗, 高井茂光, 浜辺千佐子, 津波に対する建築物の構造設計法に ついて , 一その2:設計法(案)一, ビルディングレター, 2004, 11月, pp.1-8. 2) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則:護岸を越流した津波による波力

に関する実験的研究,海岸工学論文集,第47巻, 2000, pp.911-915.


(a) 通過開始時の画面

(b) 通過終了時の画面





(a) 通過開始時の画面

(b) 通過終了時の画面

図-10 漂流物2の速さから流れの速さを算出



(a) 通過開始時の画面

(b) 通過終了時の画面

図-11 漂流物3の速さから流れの速さを算出

スマトラ島バンダ・アチェ市地域での地盤工学的知見

東畑郁生¹⁾、本多剛¹⁾、Ilyas Suratman²⁾、Ruta Wicaksono³⁾

1)正会員 東京大学工学系研究科社会基盤学専攻
2)バンドン工科大学、インドネシア
3)東京大学大学院

1 はじめに

2004年12月26日にスマトラ沖で発生した地震を承けて、文部科学省の振興調整費の支援を受け、 スマトラ島北端のバンダ・アチェ市および周辺で、被害状況に関する調査を行った。調査期間は2005年 3月18日2月25日から3月6日であった。筆者らの調査分野は地盤工学および関連する事項を割り当て られたので、斜面崩壊、液状化および、後述する広域地盤沈降現象を調査項目と想定し、それらの発生の有 無と、もし現象が確認できれば、その発生状況を中心に、調査を計画した。

2 広域地盤沈降現象とは

調査事前に入手した現地の衛星写真などから、バンダ・アチェ市や周辺地帯の海岸線が大幅に後退し、陸地が水没していることが、知られていた。このような現象が起こる理由としては、津波による浸食、強い震動にともなう軟弱地盤の締め固め(砂地盤の液状化)が考えられるが、過去の巨大地震の事例では、広域に地盤が沈降したことも報告されている。たとえば1946年の南海地震における高知市や須崎市の地盤の水没、1960年のチリ地震におけるヴァルディヴィア Valdivia 市の水没、1990年のフィリピン・ルソン地震に際してのリンガエン湾地域の水浸がそれである。また1999年のトルコ・コジャエリ地震でも、イズミット湾の南岸で断層運動に伴うらしい地盤沈降が発生した。

3 バンダ・アチェ市内の状況から



写真1 バンダ・アチェ市の津波襲来地域の例



写真2 バンダ・アチェ市南部の民家

津波の襲来した沿岸地域(市の北部)では、写真1のように、見渡す限り破壊の跡であった。地表面には 瓦礫や海砂が堆積し、液状化の証拠とされる噴砂口などは、発見不可能であった。津波警報が出されても、 これほど広大な地域から速やかに非難を行うことは、かなり困難ではないだろうか。一方、津波の襲来しな かった市の南部(内陸部)では、筆者らの滞在した民家(写真2)のように、まったく無被害の建物が大半 であった。体験をたずねても、給水器が一台倒れた以外は家具や食器の損害も無く、体感した震動も、継続 時間が長い意外は、さして強いものではなかった。それにもかかわらず震動で倒壊した建築物が存在するの は事実であるが、その比率は1%にも満たない程度であり、全般的に震動は弱いものであった、と考えてい る。なお、バンダ・アチェ地域では、地震動記録として満足なものは存在しない。

初めに斜面崩壊現象の有無について探索した。スマトラ島には火山が多く存在するが、当該地域にはそれ がなく、石灰岩と泥岩、砂岩などの堆積岩が、基盤を構成している。市の西部には植生の失われた斜面が見 られ、当初は地震に伴う斜面崩壊か、とも考えられたが、市内のシア・クアラ大学で確認したところ、土取 り場であることがわかった。結局、現地では、地震動に起因する斜面崩壊と呼べる現象は、発見できなかっ た。このことも、地震動が強烈ではなかったことを、意味している。

4 バンダ・アチェ市の臨海部の状況

市の臨海部には、ウレレー Ulelhee と呼ばれる港がある。その中でも西部に属する旧港地域では陸地の喪 失がはなはだしく、写真3のように護岸の一部を残して、裏の地盤が消滅した。また沖合い100m以上の ところに港湾の構造物が顔を出しており、津波による物質移動が確認できた。写真4はウレレー港にある橋 梁の基部である。この橋は津波にも破壊されなかった。写真には貝殻が付着している様子が示されている。 地震後もなお水面上にこのような状況が見られる、ということは、広域的な地盤沈降がウレレー港地域では 発生しなかったことを意味している。しかしこの地域の西方には、写真5のように、かって陸地であったと ころが水没した跡が、広がっている。

ウレレー新港は、砂洲に掘り込まれた港湾である。その内部では写真6のように、大きな被害は起きていない。しかし砂洲が消滅して外海と港がつながった。これら新港と旧港の内外で水深を測定した。これと潮 沙表および地震前の水深データに基づいて、地盤沈降の有無を今後確認する予定である。現在わかっている限りでは、新港内部の水深が2ないし3m しかなく、浅すぎるのではないか、と感じている。これは津波で 運搬されてきた瓦礫が港内に堆積しているからかもしれない。



写真3 ウレレー港護岸の跡



写真4 ウレレー港における橋梁基部の状況



写真5 ウレレー港西方の状況



5 西方、インド洋に面した地域の状況

外洋に面した地域はバンダ・アチェ市内より襲来した津波が高かった。ルプン村 Leupung はそのような地 域にあり、村落は全面的に破壊された(写真7)。村の裏手は急傾斜の山地になっており、津波の襲来が前も って知られていたとしても、そこへ逃げることは難しい。また海岸は100ないし200m 幅で消滅した (写真8)。この地域にはセメント工場があるが、その前面の砂浜で、ココナツ椰子が海中に没している状 況が見られた(写真9)。これは陸地の水没である。写真10は道路の跡である。舗装自体には変状が見られ ないので、道路の位置に限っては大規模な浸食が起きていないこと、液状化のように路面に凹凸や亀裂を生 じさせる現象も起こらなかったことが、わかる。村人に尋ねたところ、彼らは砂浜が縮小したことは認識し ているものの、周辺の島などが沈降した、とは考えていなかった。



写真7 ルプン村の被災状況



写真9 ルプン村で海中に没したココナツ椰子



写真8 ルプン村の海浜の状況



写真10 ルプン村の道路舗装の跡

バンダ・アチェ市東方の状況

市の東方では、浜堤裏の低地に養魚池が広がっている。おそらくここは元来、潟ないし沼沢地であったも のと思われる。この地域にも津波が襲来し、家屋などを破壊した。ここで海岸線に平行に走る道路沿いに、 写真11のような陥没?孔が多数見受けられた。当初は液状化による噴砂ロか、とも考えられたが、道路盛 土(高さ50センチ程度)の陸側に限って多く見られること、後述するスウェーデン式載荷試験で地盤の状 況を調査したところでは道路の両側で大きな差異が見受けられないこと、写真12のように建物跡の周辺に 深い陥没が起きていて、これが橋梁基礎に起きる洗掘と似ていること、最後に目撃者を発見し、地震直後に は陥没孔は見られず、津波が引いた後、初めてこれを見たとの証言を得たことから、津波襲来時に盛土裏で 洗掘が起きた、と判断した。なお、地震動と津波の襲来との間の時間間隔は、20分程度との証言を得てい る。



写真11 バンダ・アチェ市東方の道路沿い陥没?孔



写真12 建物基礎周辺の陥没?孔

6 東方のシグリ Sigli 市方面の状況

バンダ・アチェ市から140キロ東方のシグリ市周辺をも調査した。ここはマラッカ海峡に面して浜堤が 続き、その裏の潟を養魚池に利用していた。津波で養魚施設は破壊されたが、津波の高さが低く、津波にさ らわれながらも生還した人物から、いくつかの証言を得ることができた。

写真13は、砂と水が噴出した(液状化)地点である。ただし家屋基礎に変状が見られないので、軽微な液

状化であった、と考えられる。ここで前述のスウェーデン式載荷試験を実施した(写真14)。その結果(図 1)、N値に換算して5以下のゆる詰め砂層が確認された。軽微な液状化であることから、液状化抵抗率FL に、わずかに1を下回る値を想定すれば、地表の加速度が逆算できるもの、と考えている。写真15は、マ ラッカ海峡に面する砂浜で洗掘によって露出したトーチカである。村人は、地震前には銃眼も砂に埋まって いた、というが、表面の色合いから判断して、洗掘は銃眼より下に限られるのではないだろうか。洗掘の跡 は写真16の道路法肩にも見られたが、これも海側から襲来した津波によって裏面に生じた洗掘である。ま たさらに20キロ東方のサマランガでは、河口沖の砂洲が消滅したが、地盤沈降は起きていない。





写真13 家屋の裏で液状化発生 写真14 スウェーデン式載荷試験による地盤調査



図1 スウェーデン式載荷試験結果



写真16 浜堤裏の道路法肩の洗掘



写真15 海岸に残る施設と洗掘



写真17 サマランガの海岸

結論

調査の結果、現時点では、次のように考えている。

陸地の水没は、津波による洗掘が原因と考えられる。

液状化地点の地盤データから、現地の加速度強さを推定できそうである。

津波の来襲が警告されても、避難場所が欠如している地点が多い。

このたびの調査においては、振興調整費の補助、調査チームの家村浩和教授、後藤洋三氏のご支援を受けた。 また調査に先立ち、東京大学地震研究所の都司嘉信博士から貴重な情報をいただいた。感謝の意をささげま す。

タイの Khao Lak と Phuket 島における 2004 年スマトラ島沖津波とその被害

松富英夫¹⁾, 高橋智幸¹⁾, 松山昌史²⁾, 原田賢治³⁾, 平石哲也⁴⁾,

Seree Supartid⁵⁾, Sittichai Nakusakul⁶⁾

1)秋田大学 工学資源学部 土木環境工学科
2)電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域
3)京都大学 防災研究所 巨大災害研究センター
4)港湾空港技術研究所 海洋水工部 波浪研究室
5) Ransit University, College of Engineering
6)横浜国立大学大学院 博士後期課程

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日午前 7 時 58 分 53 秒 (日本時間同日午前 9 時 58 分 53 秒), 20 世紀以降で第 4 番目の規 模を持った M=9.0 の地震(USGS, 表 1) が北スマトラの西岸沖で発生した(図 1). インド洋での M≥9.0 の 地震は少なくともここ 200 年間は起こっていない. それに伴って発生した津波は, 20 世紀以降で第 3 番目の 規模で(表 2)¹⁾, 波源に近いインドネシアの Banda Aceh をはじめ, 波源から約 500km 離れたタイ南部の Khao Lak や Phuket 島の居住区・市街地などを襲い,大被害を与えた. この地震と津波による死者・行方不明者数 は 1 月 31 日現在で各々約 160,000 人と 142,100 人である. 国別の死者・行方不明者数を表 3 に示す. インド ネシア,インド領のアンダマンとニコバル諸島以外は津波のみによると考えられ,津波災害としてはもちろ ん,自然災害としても記録史上最大となった.

本研究は、津波被災後5日目の2004年12月30日から2005年1月3日まで現地調査を行ったタイ南部の Khao Lak と Phuket 島における津波とその被害の実態を報告する.

順位	年月日	場 所	地震規模(M)
1	1960. 5.22	チリ	9.5
2	1964. 3.27	アラスカ	9.2
3	1957. 3.9	アリューシャン	9.1
4	1952.11.4	カムチャッカ	9
4	2004.12.26	北スマトラ島沖	9

表1 20世紀以降の大地震

表 2 20 世紀以降の大津波(K. Abe¹⁾ による)

順位	年月日	場所	津波規模(M _t)
1	1960. 5.22	チリ	9.4
2	1946. 4. 1	アリューシャン	9.3
3	1964. 3.27	アラスカ	9.1
3	2004.12.26	北スマトラ島沖	9.1
5	1952.11.4	カムチャッカ	9
5	1957. 3.9	アリューシャン	9

表3 各国の死者数と行方不明者数(1月31日現在)

国名	死者数(人)	行方不明者数(人)
インドネシア	105,162	127,774
スリランカ	38,000	5,600
インド	11,000	5,600
タイ	5,400	3,100
東アフリカ沿岸	137	-
マレーシア	74	_
モルディブ	82	26
ミャンマー	59	_
バングラデシュ	2	-



図1本地震の震源(Harvard Univ.と USGS),既往地震の震源と海底地形

2. 現地調査

著者らは日本とタイからなる国際津波調査団(日本:6人,タイ:7 人)を組織し,2004年12月30日から2005年1月3日までの5日間, 現地調査を行った.12月30日は午後4時頃に現地到着したため,一 部被災地の視察のみで終わった.1月3日の午後にマスメディアなど に対する調査結果の速報会を開き,調査団としての提言を行った.よ って,実質の調査期間は3日間である.

津波調査の主目的は津波来襲状況,津波(遡上)高や津波浸水域な どを知り,地震や津波の実体解明に貢献することにある.この目的を 満たしながら,本調査では今後の津波被害想定に資する基礎資料の収 集,被害メカニズムの解明(流速,流体力の推定),減災対策のヒント を得ることも目的とした.具体的な調査項目は,①津波の来襲状況, ②海岸沿いの津波高分布,③鉄筋コンクリート造建物(3階建て以上) の浸水深と被害程度の関係,④被害メカニズムの解明に必要な浸水深 と流速(流体力)の関係,すなわち,被害建物などの前・背面での浸 水深²⁰、⑤植生の津波減勢効果である.



調査域を図2に示す. 北から Phangnga 県 Khao Lak, Phuket 島の西岸, 南岸と東岸, および Phi Phi 島の延 長約 140km の海岸域である.

3. 何故, Khao Lak と Phuket 島か?

これらの被災地は津波波源から 500km 程度離れており,建物などの被害は津波のみによると考えられる. また,津波が居住区や市街地を襲っている.現在,東海・東南海・南海地震津波の被害想定が行われている が,その基となる諸基準,例えば津波による建物の破壊基準は少数の現地資料から導かれており,本地域の 津波調査により基礎資料の充実が可能性となる.

4. Khao Lak, Phuket 島と Phi Phi 島における津波

証言によれば、Khao Lak や Phuket 島の西岸は引き波初動で、2 波目が大きかった. これらは Phuket 島南 端での検潮記録³⁾ と整合する(図3). また、津波は先ず Phuket 島南部に到達し、順次北の海岸へ到達して いった. 2 波目が大きかった理由として、南側断層(アスペリティB部分)と北側断層(アスペリティC部 分)の存在⁴⁾ や共振などが考えられる.



図3 Phuket 島南端での検潮記録



写真1 Khao Lak の津波(その1)



写真2 Khao Lak の津波(その2)

写真やビデオによれば、Khao Lak ではソリトン分裂が生じたようである. その証拠例を**写真 1**⁵⁰ と **2**⁶⁰ に示す. ともに短い距離間隔の2段砕波が認めら、特に**写真1**では砕波直後の2段砕波が映し出されている.

Khao Lak, Phuket 島と Phi Phi 島における津波(遡上) 高を**図4**に示す.これらは津波来襲時の海面からの 高さに補正済みで,来襲時は一律に午前10時(現地時間)としている.本結果は調査団のホームページでも 公開している(http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/).

津波高の平均像は Khao Lak で 6~10m, Phuket 島西岸で 3~6m, Phuket 島南岸から東岸にかけて 3~1m 程 度である. Phi Phi 島における津波高は波源側に口を開いた湾からの津波で 6m 程度, 波源反対側に口を開き, 南の小島に守られた湾からの津波で 4.5m 程度である.

Khao Lak と Phuket 島西岸における津波高の顕著な差の原因として、北側断層の存在や海底地形(図 5), 波源の不均一性などが考えられる. Phuket 島は波源の陰である東岸で津波高が小さく、スリランカは波源の 陰である南西岸でも津波高が大きかった⁷⁾. この現象差は津波の波長と島の大きさの比、島の海底勾配が主 因と考えられる.



図5 アンダマン海の海底地形

5. 市街地や居住区での津波

市街地の例として Phuket 島西岸の Patong ビーチ,居住区の例として Khao Lak 南部を取り上げる. Patong ビーチにおける津波高は 5~6m,浸水深は 2m 程度であった.痕跡浸水深から推定された氾濫流速 u^{s} は 3~4m/s,単位面積あたりの抗力(支配的な力⁹⁾) Fは 0.9~1.7tf/m² (0.9~1.7×10⁴ Pa) であった.ただし,Fは次式から評価している.

$$F = \frac{1}{2}\rho C_D u^2 a \cong \rho q u \tag{1}$$

ここで、 ρ は海水の密度、 C_D (≥ 2) は抗力係数、a は単位面積、q は単位面積あたりの流量である. 浸水深



写真3 壁が壊れた煉瓦造の家屋(Patong ビーチ)



写真4 廃墟と化した Khao Lak のホテル群(海側から望む)



写真53階部分まで浸水した Khao Lak のホテル (左端)



写真6 地盤が流され、大破に至った建物(Khao Lak)



図6 浸水深と建物の被害程度の関係

が 2m 程度だと日本の木造家屋では中破と大破が混在するが、煉瓦造の建物が多い本ビーチでは中破が目立 った(写真 3).

一方, Khao Lak 南部における津波高は 10m 程度, 浸水深は 4~7m に達した. 痕跡浸水深から推定された 氾濫流速は 6~8m/s, 単位面積あたりの抗力は 3.8~6.7tf/m² (3.7~6.6×10⁴ Pa) であった.

本地区はリゾート地で、コテッジやホテルが建ち並んでいたところである.しかし、海に近いコテッジや 床と柱が鉄筋コンクリート造の2階建ての建物群は津波で見る影もないほどに破壊され、浸水域中程の2階 建ての建物群も壁や一部の柱が飛ばされるなどして廃墟状態となった(写真4).ただし、2階建ての建物は 屋根に鉄筋コンクリートが用いられておらず、弱い構造である.

これまで,鉄筋コンクリート造の建物は5mまでの浸水深であれば小破で済み,20mで大破した1例が知られていただけであった(図6).しかし,本津波では,壁を筆頭に日本の鉄筋コンクリート造の建物に比べて強度が弱いにもかかわらず,図6に黒塗りで示すように浸水深が6.2m程度でも,3階建てのものは小破や



図7 浸水深と氾濫流速の関係



写真7 植生域と背後家屋の状況 (Khao Lak, 地盤高=3.7m, 浸水深=4.9m, 植生域厚=14m, 植生密度=0.27%)



写真8 植生域と背後家屋の状況(Khao Lak, 地盤高=3.5m, 浸水深=4.6m, 植生域厚=28m, 植生密度=0.42%)

中破で済んだ.

3 階部分が浸水した例もみられたが(写真5の左端の建物),床上わずかであった.本地区の津波は3 階以上に避難すれば助かる規模のものであったと言える.

建物自体は小破や中破で済んでも、地盤が浸食され、大破に至ったものもある. その例が**写真6**の中央の 建物である. 地盤浸食は今後の津波避難ビルの在り方などの議論において検討しなければならない項目であ ろう. 本調査で得られた浸水深(建物の前面 h_f と背面 h_r)と氾濫流速の関係を図7に示す. 図中の実線は次式である¹⁰⁾.

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}}$$
(2)

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = F_r \sqrt{\frac{h_r}{R}}$$
(3)

ここで、gは重力加速度、Rは近傍の津波高、 $C_v(\cong 0.9)$ は流速係数、 $F_r(=u/\sqrt{gh_r})$ は Froude 数である. 図から、両者の関係はこれまでと同傾向であることが判る.

浸水深が 4.9m から 4.6m と高々0.3m 程度の減少であるが, 植生の津波減勢効果が確認できた. そのときの 植生域と背後家屋の状況を写真7と8に示す. 植生域厚と植生密度の定義は各々岸沖方向の植生域距離と単 位土地面積あたりの胸高での植生断面積である. 植生は両刃の剣であるが, 日本においても減災の一手法(面 的防護)として考慮されてよかろう.

6. おわりに

実質3日間の現地調査結果を示した.建物被害については貴重な事例を見落としている可能性がある.津 波の来襲状況については精度よい資料(証言)が得られなかった.ビデオなどに津波来襲状況が多く撮られ ており、検潮記録の収集も並行して行って、その解析を進めていく予定である.

本津波はその規模から推して今後の津波の被害想定や減災対策に貴重な資料を提供し得るものである.非 常に大きな犠牲を払って得るものであるから、本津波の残したものを確実に受け止め、後世に役立てること が我々の責務である.

本地震がなかったものとして、地震調査研究推進本部のこれまでの地震活動長期評価手法で、評価資料が 少なければ少ないなりに、本地震の規模 M=9.0 が想定できるかどうか検討してみる必要があるように思われ る. もし、本地震規模が想定できないようであれば、これまでの長期評価に疑問を持たざるを得ない.

謝 辞:本調査にあたり,文部科学省特別研究促進費(代表:河田恵昭 京都大学教授)の補助を受けた. ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

- 1) Abe K.: 2005 年 1 月 27 日 tsunami-japan への投稿資料.
- 2) 松冨英夫:フローレス島東北部の津波とその被害,月刊海洋,海洋出版, Vol.25, No.12, 1993, pp.756-761.
- 3) Royal Thai Navy ホームページ(http://www.navy.mi.th/hydro/tsunami.htm).
- 4) 山中佳子:東京大学地震研究所ホームページ(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC161a. html)
- 5) BBC bbc.co.uk homepage Home of the BBC on the Internet (http://news.bbc.co.uk/)
- 6) Amateur Asian Tsunami Video Footage (http://www.asiantsunamivideos.com/)
- 7) 2005 年 1 月 14 日開催の土木学会速報会(http://www.jsce.or.jp/report/33/).
- 8) 松冨英夫·首藤伸夫:津波の浸水深,流速と家屋被害,海岸工学論文集,第41巻,1994,pp.246-250.
- 8) 松冨英夫・大向達也・今井健太郎:津波氾濫流の構造物への流体力,水工学論文集,第48巻,2004, pp.559-564.
- 10) 松冨英夫・飯塚秀則:津波の陸上流速とその簡易推定法,海岸工学論文集,第45巻,1998,pp.361-365.

リモートセンシング画像と GPS を活用したタイ南部の津波被害調査

山崎文雄¹⁾, 松岡昌志²⁾

1)正会員 千葉大学 工学部 都市環境システム学科,教授 2)正会員 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター,チームリーダー

1 はじめに

2004年12月26日00:58(UTC)にスマトラ島沖を震源とするマグニチュード Mw=9.0の地震が発生し、インド 洋の広範な地域において、史上最大といえる津波災害を引き起こした.アンダマン海に面したタイ南部では、 地震発生から約2時間後に高さ10m を越える津波が押し寄せ、パンガー県、プーケット県、クラビ県などの リゾート地や漁村が甚大な被害を被った.タイ政府が3月9日時点で確認した人的被害は、死者5,395人、行 方不明2,932人である.確認された死者の内訳はタイ人が1,926人、外国人が1,953人、身元不明が1,516人であ り、クリスマスから年末の休暇を過ごしに来た外国人が多数犠牲になったのが、この災害のタイにおける大 きな特色である.

津波災害の状況が明らかになるにつれ、国際的な枠組みでの調査が必要との認識で、筆者らは以前より災害リモートセンシングに関して、合同調査(Eguchi et al., 2000)や国際ワークショップを行ってきた米国多領域地震工学センター(MCEER)の研究者達と連絡を取るとともに、タイの地震工学研究者に合同調査を呼びかけた.その結果、日本から筆者2人、米国からはMCEERの費用で ImageCat 社の Shubharoop Ghosh 博士が、タイからはアジア工科大学院(AIT)の Pennung Warnitchai 助教授、タイ空間情報リモートセンシング局(GISTDA)の Supapis さんと Siam さんが参加、これに GISTDA に JICA シニアボランティアとして派遣されている本澤雅彦博士が加わった日米タイ3カ国の合同調査チームとなった(図1(a)).

本調査の大きな目的は、人工衛星画像から被災地域を判読するための、現地確認(グラウンド・トゥルース)データを収集することである.このために調査においては、複数の解像度の人工衛星画像を地図として利用するとともに、GPS と連動したデジタルカメラとデジタルビデオを持参し(図1(b))、位置付きの写真や動画を取得した.調査は、1月7日にバンコクで打ち合わせとデータ収集を行ったあと、8日から11日までの丸4日間、カオラック、プーケット島、ピピ島などの被災地域を調査した.以下に、人工衛星画像との対応をとりながら、この現地調査の結果について報告する.なお英文の速報は、すでにMCEER の Web ページに掲載されている(Ghosh et al., 2005).



(a) 現地調査チームメンバー



(b)ビデオによるパノラマ VIEWS 撮影の様子

図1 現地調査チームと調査風景

2 調査地域と調査概要

本調査チームによるタイ南部の現地調査地域の広域衛星画像と GPS 連動写真の撮影位置を図2に示す. 調 査初日の1月7日には、パンガー(Phang-Nga)県のカオラック(Khao Lak)周辺を車で回り調査した. 翌日はプー ケット島から高速船をチャーターしてクラビ(Krabi)県のピピ島(Ko Phi Phi Don)と Ko Khai Nai および Ko Khai Nok という小島を調査した. 3日目は再びパンガー県に向かい、初日に行くことのできなかった中部の Ban Nam Khen や Ban Bang Sak などの地区を見るとともに、津波で壊滅した北部の Ko Phra Thong の漁村に 小舟で渡り調査した. 4日目はプーケット島内の Kamala, Patong, Karon, Kata などの西岸のビーチを調査した. タイ南部の津波の遡上高さに関しては、科学研究費補助金による調査(松富, 2005)によれば、平均的に はカオラックで6-10m、プーケット島西岸で3-6m、ピピ島の波源側に開いた湾で6m 程度と報告されている. 本調査チームも津波遡上高さの測定を当初考えていたが、水準測量機器を持たなかったため、遡上や滞留の 痕跡を位置つき写真に記録するにとどめ、広域の被災状況を衛星画像と対応しながら、地上からの動画と静 止画に残すことに専念した. なお、山崎は2月中旬に、松岡は3月中旬に再びプッケット島とカオラックを訪 れ、追加調査を行っている.





(b) タイ南部の Landsat 画像と津波被災地域

Landsat 7: 2004/4/8

(c) GPS 連動カメラの撮影位置と方向

図2 タイ南部の現地調査地域の広域衛星画像と GPS 連動写真の撮影位置

3 パンガー県北部・中部

パンガー県の北部は、中部や南部と異なり、漁村や農村が点在する地域である.図3はパンガー県北部から中部にかけての ASTER 衛星画像と津波被災状況を示している.ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)は、可視領域から熱赤外領域までに14バンドを有する日本の高性能光学センサで、米国の TERRA 衛星に搭載されている.その解像度は、Bands 1~3 (0.52 - 0.86 μ m)の可視・近赤外領域が15m、Bands 4~9 (1.60 - 2.43 μ m)の短波長赤外領域が30m、Bands 10~14 (8.125 - 11.65 μ m)の熱赤外領域が90m である.図3(a)は ERSDAC のホームページ(http://www.ersdac.or.jp/todayData/EDS/00.1/pict_j.html)に掲載された津波から6日後のフォールスカラー画像である.赤く見えるのが植生の濃い地域であり、津波に襲われた沿岸域は、津波前のものに比べて赤い領域が大幅に後退している.

図3(b),(c)に示す Ban Nam Khen は、津波が港や集落を襲い、多数の住民の死者が出たところである.

図3(d),(e)に示すバンガー県の中部の Ban Bang Sak では、津波が海から約300m 離れた幹線道路を越えた丘まで遡上している.ここでは、遡上の限界が植物の状態や、津波により運ばれた浮遊物により明瞭に識別することができた.図3(f)は図3(g)に示す Princess Resort の海岸である.調査時点ではまだ瓦礫の撤去が行われておらず、津波直後の状況が残っていた. Princess Resort の一帯はホテルの2階屋根にまで津波襲撃の痕跡が残っており、最も大きな被害を受けた場所の1つである.



図3 パンガー県北部・中部の ASTER 衛星画像と津波被災状況. (a) ASTER 画像 (2004/12/31), (b)Ban Nam Khem の港, (c) Ban Nam Khem の村, (d)破壊された建設中のホテル, (e) 津波の遡上限界. 黄色い線で示している, (f)瓦礫で埋まる海岸, (g) Princess Resort.

4 パンガー県カオラック

パンガー県中部のカオラックはタイ南部有数の高級リゾート地であり、とくにヨーロッパからの観光客が 多い地域である.図4にカオラック周辺のIKONOS衛星画像(2004/12/29)と被災状況を示す.IKONOSは1999 年に打ち上げられた世界最初の商業用高解像度衛星で、可視領域(B,G,R)と近赤外(NIR)の4つのバンドが解像 度4m、パンクロマティック・バンドが解像度1mである.これらをパンシャープンという方法で組み合わせ ると、この図に示すような解像度1mのカラー画像を作ることができる.シンガポール大学のCRISP (http://www.crisp.nus.edu.sg/tsunami/tsunami.html)やドイツ航空宇宙センターDLR (http://www.zki.caf.dlr.de/ applications/ 2004/indian_ocean/indian_ocean_2004_en.html)などのホームページから、カオラック周辺の詳細な IKONOS 画像が公開されている.

図4(a)は Phakarang 岬周辺の IKONOS 画像であり,(b)に示す岬の先端部の Bamboo Orchid Resort は2方向からの津波に襲われ壊滅した.岬の先端の津波高さは局所的に15m にも上ると報告されている(http://www.drs. dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/thailand/phuket_survey.html). (c)は屋根に打ち上げられた乗用車であるが IKONOS 画像を拡大すると,この車と思われる黒い数ピクセルを確認することができる.

(d)は Khao Lak 中部の気象局周辺である. (e) 津波で流された橋や, (f) 破壊されたコテージなど, 津波の 破壊力を示す被害の跡が一面に広がっている.

(g)は Khao Lak 南部の Nang Thong beach 周辺である. (h) & (i) に示す Similana Resort やその北部の一帯の リゾートや商業施設は、1階の屋根までの高さの津波に襲われ、壊滅的な被害を受けている.



図4 パンガー県カオラック周辺の IKONOS 衛星画像 (2004/12/29)と被災状況. 青い点は位置つき写真の撮 影位置, ☆は図に示す写真撮影位置である. (a) Phakarang 岬, (b) 壊滅した Bamboo Orchid Resort, (c) 屋根に打ち上げられた車, (d) Khao Lak 中部の気象局周辺, (e) 津波で流された橋, (f) 破壊され たコテージ, (g) Khao Lak 南部の Nang Thong beach 周辺, (h) & (i) 津波で壊滅的な被害を受けた Similana Resort.

5 プーケット島

プーケット島では、地震発生の約2時間後にところにより5mを越える津波が、海岸線のビーチを次々に襲った.この津波襲来の様子は、観光客が撮影した幾つかのビデオ映像により、鮮明に記録されている.

プーケット島の津波高さは,西岸中部の Kamala ビーチと Patong ビーチで最も高く平均5m 前後,西岸南部の Karon ビーチや西岸北部の Bang Thao ビーチなどで平均4m 前後と報告されている.

図5は プーケット島の Kamala ビーチと Patong ビーチ周辺の Landsat 衛星画像(2004/12/3)と被災状況を示している. (b),(d),(f)は Kamala ビーチの住民が,津波襲来時に鉄筋コンクリート建物の3階から撮影した写真であり,津波が来襲し家の屋根まで覆うようになるところまでが,数枚の写真で写されている. これらの写真は,1月の調査でこの住民から本調査団に提供された.

(c),(e),(g)は2005/2/20に再度,この場所を訪問したときに,この建物の中に入れてもらい,ほぼ同じと思われる場所から撮影した写真である.津波前後の写真を比較すると,津波で流されて海側の家がなくなっていることが分かる.一方,山側の住宅は,鉄筋コンクリート造であるとともに,この3階建て建物の後にあるため津波の流速が小さくなったと思われ,軒近くまで浸水した割にはそのまま使用されていた.

プーケット島で一番の賑わいのある Patong ビーチは,海岸沿いの通りは大きな被害を受けていたが,山 側へ行くと徐々に高度が高くなり,海から200m ほど内陸に入ると,浸水はしたが被害は殆ど受けていない.

プーケット島は雲がないことが少ないせいか、質の良い高解像度衛星画像は少ない. パンクロマティック バンドで0.6mと解像度が最も高い QuickBird 衛星は、2005/1/2に Patong ビーチを含む地域を撮影したが、画 質はあまり良好ではなかった. 2005/1/5には再度撮影が行われ、Patong, Karon, Kata Yai のビーチを含む地 域がほぼ雲がなく撮影された. また、事前画像としては、2002/3/23に Patong と Karon を含む質の良い画像 が得られている. 筆者らの日米チームではこれらの画像を共同購入したので、今後、これらの画像の比較解 析により、津波浸水域の検証を行いたいと考えている.



図5 プーケット島の Kamala Beach と Patong Beach 周辺の Landsat 衛星画像 (2004/12/3) と被災状況. (b), (d), (f)は Kamala Beach の住民が津波襲来時に鉄筋コンクリート建物の3階から撮影した写真である. (c), (e), (g)は2005/2/20に同じ場所から撮影したもの.

6 ピピ島

クラビ県のピピ島(Ko Phi Phi Don)はアンダマン海に浮かぶリゾートの島である. 津波の波源域から見て, 丁度, プーケット島の影を外れる位置にあるため,最高で6m 程度の津波に襲われた.図6 ピピ島周辺の Landsat 衛星画像(2003/1/27)と被災状況写真を示す.ピピ島の中心である Ton Sai 地区は,南北2つの山岳島の 間を砂州が結ぶような位置に広がっている.標高2-3m 程度の南北の幅が約150mの平地であるため,津波に 襲われたら逃げ場がない.津波は最初に北の湾から襲ってきて,その後,より高い津波が南の湾から Ton Sai 地区を襲った.この地区では鉄筋コンクリートのホテルが数棟残ったのみで,他の建物は木造の平屋な いし2階建てであるため,津波により大破している.中心にある Cabana ホテルの3階からは,観光客により 津波襲来の様子がビデオで撮影されており,1階の天井まで津波が浸水していることが分かる.

(b) & (c)は島北部の Laem Tong 地区の様子である. この地区も建物の床上まで浸水し、木造のバンガロー などは大破しているが、被害は Ton Sai 地区に比べると小さい.

(d) から (g)は, Ton Sai 地区の写真である. ピピ島はほぼ壊滅的な被害を受けたため,入島が規制されて いたが,津波から10日経った頃にやっと入れるようになった. 災害対策本部が調査時点で集計した犠牲者は, この島だけで死者691人,行方不明者951人と極めて大きな数字であった.

ピピ島を調査した後, Ko Khai Nai および Ko Khai Nok という夜は無人となる小島を調査した. これらの島 は、津波の波源域から見てプーケット島の影に入るように位置するため、津波の影響をあまり受けなかった. 調査時点においても、既に欧米からのリゾート客が多数、ビーチで日光浴をしていた.



図6 ピピ島周辺の Landsat 衛星画像(2003/1/27)と被災状況. (a) Ko Phi Phi Don の調査地点と写真撮 影位置, (b) & (c) Laem Tong 地区の様子. 木造建物は大破している, (d) 南から見た Ton Sai Bay, (e) 瓦礫の野焼きの様子, (f)津波による瓦礫で埋まる Ton Sai 地区の繁華街, (g) 商店の壁に残る津波によ る湛水を示す水位跡.

7 GPS と連動したビデオ映像:パノラマ VIEWS

ImageCat 社では、MCEER の研究プロジェクトとして VIEWS (<u>V</u>isualizing the <u>I</u>mpacts of <u>E</u>arthquakes <u>W</u>ith <u>S</u>atellites)と名付けられた衛星画像に基づく災害把握システムの開発を行っている.これは図7に示すように、衛星画像を緯度・経度のついたベースマップとして PC 上に登録し、現地調査で移動しながらビデオを撮影 する際には、その位置を GPS で取得する.このように取得されたビデオを衛星画像上で位置をリンクする ことにより、VRS (virtual reconnaissance systems)として可視化することができる(Ghosh et al., 2005). これまで に、2003年イラン Bam 地震(Adams et al., 2004)をはじめとして、2004年のハリケーン Charley と Ivan、それに 2004年新潟県中越地震などの被害調査でこのシステムが使われてきた.

今回の調査では、米国側の持ち込んだビデオに加え、筆者らもそれぞれビデオカメラを持参したので、 図1(b)に示すように、3台のビデオカメラにより同時に前方と左右方向を撮影した.この新しい広角の VIEWS を Panorama-VIEWS と名づけた.図7の3つビデオ画面が示すように、Panorama-VIEWS ではより広い 視野での可視化が可能になった.車からの撮影の場合には、助手席と後部座席の左右に1台ずつの計3台のビ デオにより、ビデオ取得を行った.災害現場の生々しい様子は、災害発生から時間が経つと失われていく. 今後の教訓として災害の記録を残すためにも、また衛星画像などの現地確認データとしても、このような位 置つきの映像は貴重なデータベースとなることが期待される.



図7 IKONOS 衛星画像(2004/12/29)に重ねたビデオ撮影時の GPS 位置と3台のビデオによる動画の同時スナ ップショット. 今回の調査ではこのように3台のビデオで同時に広角撮影を行い, パノラマ VIEWS と名づ けた位置つきの動画データベースを構築した(Ghosh et al., 2005).

8 津波被災地域の地表物質の分光反射特性

人工衛星の光学センサは、Landsat や ASTER などの中解像度のものも、IKONOS や QuickBird などの高解 像度のものも、いずれも可視領域と近赤外領域の波長帯のセンサを有している.図8には、分光放射計を用 いてプーケット島 Kata ビーチで2005/2/20に観測した植物の分光反射率を、QuickBird の4つのセンサの波長 帯域と比較して示している.写真に示す緑色の芝生は津波後に植えられた新しいもので、可視赤色(R)から 近赤外(NIR)の間で急激に反射率が上がるという植生の特徴をよく表している.一方、津波を被り黄色く変 色した植物はこの特徴が弱まり、枯れた芝生はまったくこの特徴が失われている.このような観測データか ら見ても、津波を被った地域の植物は、分光反射特性が変わった可能性が高く、今後、人工衛星データによ る浸水域の判定に利用できるものと思われる.



図8 プーケット島 Kata ビーチで観測した植物の分光反射率. 緑色の芝生は津波後に植えられたもの, 黄色い植物は津波を被り変色したもの, 枯れた芝生は津波を被って枯れたもの.

8 おわりに

タイおよび米国の研究者と合同で、2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震・津波によるタイ南部の 被害状況の現地調査を行った.とくに高解像度および中解像度の人工衛星画像をベースマップとして、カオ ラック、プーケット島、ピピ島などの被災地域について、GPS と連動したデジタル写真やデジタルビデオの 撮影を行った.また3つのビデオ映像を用いたパノラマ VIEWS システムを開発した.さらに、津波浸水域の 人工衛星データによる推定のための確認用データとして、分光放射計による植生等の分光反射率の観測も行 った.今後、タイ・米国の研究者と協力して、広域の津波被害マップ構築を進めていきたいと考えている.

参考文献

- Adams, B.J., Huyck, C.K., Mansouri, B.: Streamlining Post-Earthquake Data Collection and Damage Assessment in Bam, Using VIEWS (Visualizing the Impacts of Earthquakes with Satellite Images), MCEER Earthquake Reconnaissance Investigation, 2004. http://mceer.buffalo.edu/research/bam/page1.asp
- Eguchi, R.T., Huyck, C.K. Houshmand, B., Mansouri, B., Shinozuka, M., Yamazaki, F., Matsuoka, M.: The Marmara Earthquake: A View from Space, The Marmara, Turkey Earthquake of August 17, 1999: Reconnaissance Report, Technical Report MCEER-00-0001, 2000.3, pp. 151-169
- Ghosh, S., Huyck, C.K., Adams, B.J., Eguchi, R.T., Yamazaki, F., Matsuoka, M.: Preliminary Field Report: Post-Tsunami Urban Damage Survey in Thailand, Using the VIEWS Reconnaissance System, 2005.1, http://mceer.buffalo.edu/
- 松冨英夫:タイの Khao Lak と Phuket 島における2004年北スマトラ島沖地震津波の速報,土木学会誌,90巻, 3号,2005.3, pp. 48-50.

スマトラ沖地震・津波によるタイ南部農業被害状況の現地調査

中矢哲郎¹⁾、丹治肇²⁾、中村義文³⁾

1)独立行政法人農業工学研究所、研究員 2)独立行政法人農業工学研究所、室長 3)JICA 専門家

1 はじめに

2004年12月26日午前6時58分にスマトラ島西方沖で発生した地震に伴う津波はインド洋周辺国において、 死者行方不明者30万人を越える大被害をもたらした。タイ国においても、南部パンガー県沿岸を中心に死者 5000人、行方不明者3000人を越える大惨事となった。現在、観光地や社会インフラに対する災害復興は進め られている一方、農地に関しては被害状況の把握や復旧対策はほとんどなされていない。人的被害に対し対 象が農作物であるため人々の関心は乏しいが、現地の住民は農業によって生計を立てている者が多いため、 農地、農村の被災状況の把握と復旧対策が早急に必要である。

よって本調査はスマトラ島沖地震・津波によるタイ南部地域の沿岸、農村の津波の被災状況、農地の塩害 状況を把握し、被害実態を踏まえた農村、農地の復旧のあり方について検討を行うことを目的とした。

2 調査の概要

調査は2005年1月18日から23日(第1回調査)、2005年2月23日から26日(第2回調査)の2回にわたり行った。主な調査対象地域は、図1に示すプーケット県農地(Pa Lai 地区)、同県西部沿岸、パンガー県西部 沿岸、農地(Lam Kaen 地区(混合果樹園)、Bang Niang 地区(混合果樹園)、Nam Khem 地区(ゴム園)、 Leam Pakarang 地区(ココヤシ園))である。津波による農地被害の主たるものとして塩害に着目しそれぞ れの農地において30cm 又は60cm 深さまで不撹乱試料の採取を行い塩害状況の場所別、深さ方向の実態の調 査を行った。塩害の調査には、塩分濃度の一つの指標である土壌電気伝導度の測定を行った。測定には小型 電気伝導度計 HORIBA Twin Cond CONDUCTIVITY METER B-173、TOA CONDUCTIVITY METER CM-210P を用い、計測方法は1:5水浸出法に準拠した。不撹乱試料の採取は Soil Sampler (DIK-110B)を用いて行い、得 られた試料の深さ方向2cm 毎にサンプルを切断し土壌電気伝導度の測定を行った。分析結果を基に、塩害か らの農地復旧案について考察を行った。



タイ南部における被災地域の概要

パンガー県調査地点と採土地点 プーケット県調査地点と採土地点

図1 調査地点の概要



図2 パンガー県における農地被災状況 (データ提供:LDDパンガー事務所)

3 調査結果

3.1 タイ国の農地被害状況の概要

タイ全体での農地の被災面積は約40,000ライ (1ライ=1600m²、約6400ha)であった。ほとん どの被害はパンガー県西部沿岸農地であり、プー ケットにおける農地被害は図1に示す Pa Lai 地区 のみであった。土地開発局(LDD)パンガー事務 所の把握している被害面積を GIS を用いてプロッ トしたのが図2である。調査地点、サンプリング 地点も併せて記述した。

3.2 プーケット県 Pa Lai 地区農地の被害状況

この地区は野菜、トウモロコシ、ウコン、イモ、 などの畑作物が中心である。津波の影響は海岸よ り500m~800m内陸まで及び、大きな被害を受け ていることがわかった。津波による被災の痕跡を 写真1、2に示す。周辺は粘土質の土砂に覆われ、 津波が及んだ様子が確認できた。漂流物の痕から 推測すると地面から1m程度の波が及んだことが 推定された。畑地の堆積土砂を採取したところ、 表土1cm程度は粘土質の微細な土砂が堆積して おり以深は砂質の土砂が堆積していた。土壌電気 伝導度は表層で5.5dS/m、下層約5cm付近で 1.08dS/mであり、トウモロコシの収量に影響する 電気伝導度の上限である4dS/mを超えており、作 物は既に枯死していることがわかった。

3.3 パンガー県農地の被害状況

3.3.1 Bang Niang 地区(混合果樹園)における農地被害状況

この農地はランブータン、マンゴスティン、バナナなどの混合果樹園地であり、海岸から約2km 離れてい るが河川を遡上した津波の氾濫により被災した場所である。漂流物から判断すると2m 程度の氾濫水塊が来 襲したことがわかった。果樹の塩害は進行しており、ほとんどの樹木は立ち枯れを生じていた。樹園地内で は完全に枯れている樹木と、生長障害を起こしている樹木が散在していた。この原因を把握するために完全 に枯れている樹木と生長障害を起こしている樹木の根本付近の表層1cm 程度の土壌を採取し、電気伝導度を 調査した結果、枯れている樹木で、21.2dS/m,生長障害を起こしている樹木で12.15dS/m であり、場所によ り塩分濃度の差が大きいことがわかった。樹園内における塩分濃度に差が生じた原因としては津波氾濫時の 樹園内の複雑な流れによることが予想される。



写真1 Pa Lai 地区農地の被害状況1



写真2 Pa Lai 地区農地の被害状況2 (農地表面は粘質土に覆われる)

3.3.2 Leam Pakarang 地区における農地(ココヤシ園) 被害状況

ココヤシは塩害には強い作物であるが、立ち枯れが生じていることがわかった。津波により輸送された土 砂が農地一面に堆積していることがわかった。1月の調査においては葉がまだ緑がかっていたが根本の部分 より枯れが進行していた。津波経由の土砂は約10cm 堆積しており、本調査において最も堆積厚が大きかっ た。表面に塩が集積している状況を写真5に示す。この表面の土壌塩分濃度は30.8dS/m であり、他の地区よ り堆積土砂量、塩分濃度ともに大きいことが明らかになった。

3.3.3 Nam Khem 地区における農地 (ゴム園) 被害状況

1月の調査においてはゴムの木は完全に枯れているように見えたが、2月の調査では緑の葉が生えており、 完全に枯死していないことがわかった。しかし樹液を採取している形跡はなく、被災したゴムの木の生育の 今後は追跡調査により明らかにする必要がある。津波由来の土砂は約4cm 堆積しており表層の土壌電気伝導 度は10.2dS/mであった。

3.3.4 Lam Kaen 地区における農地(混合果樹園園)被害状況

ランブータンのほとんどは立ち枯れが生じており、土壌塩分濃度は9.2dS/m であった。不撹乱試料を採取 したところ、約4cm の土砂の堆積があった。海岸に最も近い地区であるが、標高が高いために他の地区に比 較すると、塩害被害はやや小さいことがわかった。

3.4 被災農地の土砂堆積状況と土壌電気伝導の分析結果

土砂堆積状況、深さ方向の塩分濃度の把握のために行った不撹乱試料採取の状況を写真6に示す。灰褐色 系の砂質土から褐色系のシルト質に変化する境界を津波由来の堆積土砂と農地土壌の境界とした。津波由来 の土砂の堆積は Leam Pakarang の10cm で最も大きいことがわかった。その他の農地では4~5 cm 程度の堆



(塩害により樹液が出ない状態)



写真3 Nam Khem 地区(ゴム園)における被災状況 写真4 Leam Pakarang 地区(ココヤシ園)の被災状況 (白く見える部分は集積した塩)



写真5 河川を遡上した津波の氾濫による被災状況 (Bang Niang 地区果樹園付近)



写真6 土壤採取状況 (Bang Niang 地区果樹園内)





Electric conductivity of soil(dS/m)

写真7 Leam Pakarang (ココヤシ園内)の土壌 (灰白の部分が津波による堆積土砂)

(Leam Pakarang 地区ココヤシ園内)

積がほとんどであった。海岸から最も近いのは Lam Kean 地区であるが4cm 程度と小さく、堆積厚の量は海 からの距離より標高の高低に大きく左右されることが明らかになった。傾向としては堆積量が大きいほど表 層塩分濃度が高く、立ち枯れの進行が顕著に進むことが明らかになった。

1月と2月の調査における表層及び下層約5cmにおける土壤電気伝導度の比較を行うと、どちらの調査に おいても表層で土壌電気伝導度が高く、下層で1~2dS/m前後と急激に低くなる傾向にあることがわかった。 調査時期別の比較を行うと、2月の方の土壌電気伝導度が全体的に上昇していることがわかった。下層にお いてもやや上昇している傾向にあった。この理由としては現在タイでは乾期のため降雨量が少なく表層に塩 分が上昇し集積していることが予想される。このことを明らかにするために、各調査地点における深さ方向 2cm毎,及び表層1cmの土壌電気伝導度の分析を行った。分析結果の一例を図4に示す。表層1,2cmで著し く塩分濃度が高く以深は急激に減少していることがわかる。作物の生長障害の一般的な基準値である4dS/m を基準とすると、5cm以深では4dS/m以下であることがわかる。しかし塩分濃度は20cm~30cmまで通常の 塩分濃度の0.5~0.8dS/mより大きく、海水の浸透による塩分の集積を量的には少ないながら受けていること がわかる。この傾向は全ての採土地点で共通している傾向であった。表層以深の低濃度塩分は乾期の継続に より上層部に補給されていることが予想された。

4 今後の塩害対策について

今回行われた農地の塩害調査結果をまとめると以下のようになる。

①表層の土壌塩分濃度は作物の一般的な生長限界である土壌塩分濃度(4dS/m)を大きく超えており、被災 したほとんどの農地で塩害は進行している。

②塩分濃度は表層1~2cmで高く以下急激に減少している。

③低濃度ではあるが20cm~30cm深程度まで海水の塩分の影響は達している。

④同じ農地内においても場所により塩分濃度が大きく異なり、塩害の進行に大きく影響する。

これらの結果より塩害対策案を考察する。まず年間雨量-年間蒸発散量を計算し+であれば土壌塩分はリ ーチングされ、-であれば集積する。更に地下水位を測定し、高水位であれば上方への水移動とともに塩類 が集積し、低ければ下方へ浸透する。これらの場合分けを行い、塩類が集積傾向にあるか否かを判定する。 今回のケースのように表層にかなりの高濃度の塩分が集積している場合は、土壌が集積傾向にない場合でも、 全ての塩分がリーチングされるのにかなりの時間が必要となる恐れがある。この場合は高濃度に集積した表 層約3cmの土壌をはぎとることが有効である。それ以深の土壌電気伝導度は4dS/m以下であるため塩害の被 害は少なく、上記の場合分けの条件によっては残留した塩分は雨季の降雨によりリーチングされることが期 待される。これらの対策をマニュアル化し、塩害対策として有効なものになるように、今後も現地での地下 水位測定、雨季後の土壌電気伝導度計測が必要である。

謝辞

今回の調査は、(独)農業工学研究所 所内特別経費にて実施した。現地調査に際し、タイ農業協同組合 省、LDD(土地開発局)、王室灌漑局スタッフには多大なる御協力をいただきました。ここに記し、関係各 位に感謝申しあげます。

モルディブにおけるインド洋津波の特性

藤間功司1)

1)防衛大学校建設環境工学科、教授

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いってよいだろう。

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+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1.8m 程度、Male'で1.4m 程度、Gan で1m 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1.8m で、1m 程度の島も多い。したがって、1m 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箇所で、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 Meenu 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エ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1.5m、それ以外では大抵2m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2m 以上に達している。また、東岸で は津波の上に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1.1m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1.1m付近で、1.1m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はずである。ま た、今回の津波では、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 なく、今後、十分な危険度評価が必要である。



図1 Male'島の浸水域と地盤高

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



図4 南 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 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15m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始めたという。

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、西に通り抜けた。したがって痕跡高は東側で高く約3m、西側で低く2.1m である(図6)。



図5 Vaavu 環礁の津波痕跡高

図6 Meemu 環礁の津波痕跡高

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2.7-3.2m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2.3-3.2m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、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2.1-3.2m、西側の痕跡高は1.3-2.0mである(図8)。

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、Gan を調査した(causeway 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1.3-2.0m 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 は桟橋の先端で、最高水位は検潮記録と同じ1m 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。



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



図8 Laamu 環礁の津波痕跡高



図9 Seenu 環礁の津波痕跡高

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、リーフの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の発達し 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(1.8m)。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(1.4m)。一方、南の Seenu 環礁 では検潮記録(1m)の1.3-2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、鴫原良典(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。

2004年12月26日スマトラ島沖地震・津波による構造物被害の概要

田中達吉¹⁾,勝間秀樹²⁾,伊関伸一¹⁾,松尾淳¹⁾,長田正樹²⁾

1) OYOインターナショナル株式会社

2)応用地質株式会社

1. はじめに

2004年12月26日現地時間7時58分にスマトラ島西方海域で発生した地震(以下、「スマトラ島沖地震」と呼ぶ) は、震源域が約1000kmにも亘って破壊しマグニチュード9.0を記録する巨大な地震であったが、それと同時にこ の地震によって引き起こされた津波はインド洋周辺諸国に大きな被害をもたらした。この地震・津波による人的 被害は約30万人にものぼるといわれており、記録でさかのぼれる限り史上最悪の被害となった。さらに多くの沿 岸住民は住居が流亡、損壊するなどにより、未だ避難生活を強いられているほか、生活の基盤ともなる多くの施 設・構造物にも多大な被害が発生しており、復旧および復興は今後の大きな課題となっている。我々は、このよ うな災害について、防災技術に関わるものとしての立場から、以後の災害抑制のための教訓を得ることを目的と して、被害の現地調査を行った。

本稿では、スマトラ沖地震による津波被害に焦点をしぼり、その中で特に住宅、道路、鉄道、港湾施設等々の構造物の被害について、被害の状況や特徴などを簡単にまとめる。

2.現地調査

現地調査は、図-1に示すように、インドネシア、タイ、スリラン カ、インド、およびマレーシアの5カ国を対象とした。調査の期間は、 2005年1月13日から20日(第1次)、および1月29日から2月10日(第2次) である。第2次調査ではインドネシア・アチェ州についての調査とし、 他の4カ国については第1次の調査である。各国について、2名もしく は3名の調査班を構成し、それぞれ3日ないし5日間の期間で被害状 況を観察した。調査に当たっては、民間の調査団として調査活動が 可能であることを現地の情勢等を含めて判断した。

3.被害状況と特徴

・建物 今回の津波により沿岸の住宅、観光施設および観光目的の 建物などが、流亡・全半壊などの被害を受けている。一般家屋の被 害は、写真1~4に示すようなものであり、とくに自然海岸に面した

低平地では、沿岸の家屋のほとんどが流亡し、集落・市街がほぼ全滅しているケースもインドネシア・アチェ州 の西海岸に多く見られた(写真-5 インドネシア アチェ州チェラン市:南東方より望む)。この様な被害に共通す る特徴のひとつは、家屋は床面以下基礎部を残しながらも、その上部構造が損壊していることである(写真-6)。膝 上程度の浸水高であっても倒壊する塀(レンガ積み)などもあった(写真-7)。これら家屋等の壁・塀はレンガを積み 上げて作られており、一般家屋ではモルタル材が少ない(もしくはまったく用いられていない(写真-8))ため横方向 から作用する流体力に対する抵抗力が低かった可能性が高い。被害が家屋の基礎部に及んでいるケースは、地盤 (砂)が吸い出された結果、床が陥没するなどの場合が多く、この被害は極く海岸に近い範囲で見られた(写真-9)。

これに対し、相対的に損害が小さかったと考えられるのは、寺院、ホテルなどである。被害のすくなかった寺 院では、壁が少ない(ほとんどない)柱構造をしていることが多く、かつ一般に宗教施設はレンガ積であっても モルタル材を十分に使用していることが多いということであったので、構造的・強度的に優れていた可能性があ る(写真-10)。タイのリゾート地では、海岸に面するホテル等の1階および2階部に顕著な被害が発生しているも のの、これらの建物の陸側では、海岸から離れるにつれ急速に被害の様相が破壊から浸水へと変化しているケー スがまま認められた(写真-11)。いわば、海岸沿いの建物が消波物としての役割を果たしたような効果である。



図-1 スマトラ島沖地震の震央(星印)お よび現地調査地点(丸印)

もうひとつの被害の特徴は、津波による漂流物が遡上する水流に乗り、相当の速度をもって家屋などの建築物 に衝突し、損壊させる事例が見られたことである。漂流物としては植物や海岸にあった雑多な人工物などである が、特に今回の場合、小型漁船(写真-12)をはじめ大型の産業船(写真-13:発電専用船)・軍艦までもが上陸・漂流 し、漂流中および着陸時に多くの家屋等を巻き込んで被害を発生させている。これまで船舶については漂流によ る港湾施設への影響が強く懸念されていたが、今回の津波ではその規模の大きさのためか、内陸市街地への影響 が各地で認められた。

なお、沿岸の植生が密なところでは建物被害が少ない傾向にあるのではないかと議論されているが、我々の観察ではそのような傾向は明らかではなかった。ただし、場所によっては構造的に弱いであろうと考えられる家屋が、残存しているケースは認められている(写真-14)。

・道路・橋梁 津波襲来時には、市街地の道路等が水路のような役割を果たしたことが報道記録などから知ら れているが、海水が引いた直後は多くの漂着物で埋め尽くされ、車両の通行が困難であったようである(写真-15)。 インドネシアを除く地域では、一部の橋梁に被害があったほかは、津波漂着物を除去することで基幹路線の機能 は比較的早期に回復していたとのことである。

河川の河口部もしくはラグーン開口部にかかる橋梁では、橋げたが流される、橋脚が傾く、アバット部の盛土 が流出する、などの被害が発生している(写真-16~19)。とくにインドネシア アチェ州の西海岸では被害が大き い(写真-16)。ただし、海浜部の橋梁であっても欄干の破損程度の軽微な被害で済んだところもあり、津波の強さ、 築造年代、施工法などにより被害に差異が出ている可能性があるので、さらには詳細な調査が必要であろう。

・港湾・護岸 今回の調査の範囲ではバンダアチェの港湾施設が最も壊滅的被害を受けているが、施設内への立ち入りができなかったため被害状況は詳細は不明であった。バンダアチェ西方のロンガ地区にある港湾では、船舶が転覆・流出する被害のほか、コンクリート製の防波堤のうち数基が海側へ転倒する被害が発生している(写真-20)。防波堤ブロック間の接合強度が不足し、波力が最大になる部分で破断した可能性がある。その他、コンクリート製護岸では、基部および背部から砂が吸い出され、その結果、転倒・破壊するケースが見られた。その一方で、石積み護岸やテトラポットなどでは材料の移動・流出などは少なく、被害は比較的軽微なものに止まる傾向が見られた(写真-21)。

・鉄道 スリランカでの鉄道被害がもっとも顕著であり、路盤の流出等の被害が南部の中心都市であるゴール市 を中心とする区間で広く認められた(写真-22)。

・産業施設 今回津波に襲われたインド洋沿岸諸国では、リゾートホテルなど観光施設および魚介類の養 殖施設が大きな被害が起きているが、ここでは、インドネシア アチェ州で観察されたその他一般産業施設への 被害の状況についてまとめる。

通信設備: 一般市民の通信手段として携帯電話が普及しているが、携帯電話中継用アンテナ塔に被害が出ていた。写真-23は、アンテナ下部が非常に強い回転力により塔が飴のようにひねられた結果、基礎部で破断し、流出した状況を示している。このようなアンテナ塔の倒壊は、バンダアチェ市およびその周辺の複数の地点で認められており、鉄骨構造物の強度についても改めて検討が必要なことが示されている。

プラント: バンダアチェ市西方のロンガ地区臨海部にあるセメント工場では、貯蔵施設、配管、その他に被害 があり、当面の操業ができない状態にあった(写真-24)。

石油貯蔵: バンダアチェ東方には、この周辺で唯一確認できた貯蔵施設が立地している。貯蔵タンクは全部で 9基であり、タンクの下部約1/3までが浸水した形跡が認められた。このうち3基は数百mほど漂流し、隣接す る集落内に停止した状態であった(写真-25)。漂流したタンク周辺では、石油臭や油の漂流した痕跡は認められな かったことから、タンクからの石油漏出は幸いにも無かったものと判断された。タンク漂流の原因は不明である が、貯蔵量がぼぼ空で、浸水海水の浮力により基礎あるいは繋留装置から離脱したためではないかと推測される。

4.まとめ

2004年スマトラ島沖地震についての現地調査をもとに、建物等の構造物への被害の状況と特徴という観点で、 その概要をまとめた。構造物の被害の現れ方はかなり場所により異なるものの、全般的には強度が不足している と言うことができそうである。一般家屋等においては、被災軽減および被災後の生活再建を速やかに図るという 観点から、十分な強度を持つ住宅が強く望まれるが、そのためには柱を作る、柱間隔を細かくする、筋交い・ア ングルなどで壁の強度を補強するなどといったことが、できるだけ安価にできるようになる必要があろう。

被災地全般に言えることは、遠浅の自然海岸で、海岸に張り付くように展開している集落・都市で大きな被害

が発生していることであり、このような場所は、日本などで考えると高潮その他であっても相当の被害が発生す る可能性のあるところである。津波ばかりではなく高潮などによる災害についてもほとんど経験が無い、と言う 地域が多いことから、今後の防災対策においては、海象現象一般についての理解を高めることも重要な観点であ ろうかと思われる。

本報では津波の遡上特性については特に取り上げなかったが、海岸からの津波遡上のほかに河川、ラグーンな どの低地へ流入した津波が遡上し、内陸側で越流・氾濫する様子も多くの地点で認められた。日本の1級河川の下 流部では堤防・護岸等が整備されているものの、中小河川についてはこのような災害リスクが懸念され、今後点 検などを通して対策が図るのが妥当ではないかと考えられる。

[謝辞] 今回の現地調査に当たっては、各国において多くの方々にお世話をいただきました。個別の名称等は割愛 させていただきますが、ここに記して感謝いたします。



写真-1インドネシア バンダアチェ



写真-3タイ カオラック バンニャンビーチ



写真-5インドネシア チャラン



写真-2インドネシア バンダアチェ



写真-4 スリランカ カルタラ



写真-6インドネシア バンダアチェ



写真-7インドネシア バンダアチェ



写真-9 スリランカ クダワラ



写真-11 タイ プーケット島 パトンビーチ



写真-13 インドネシア バンダアチェ



写真-8 スリランカ ハンバントタ



写真-10インドネア ランバダペウカン



写真-12 インド エム・グルティテウ



写真-15 インドネシア バンダアチェ (12月28日撮影:T. Boen 氏提供)



写真-14 インド テバナンパティ



写真-16インドネシア モンマタ



写真-17 インド カライカル (12月 27日撮影: Mohapatra 氏提供)



写真-18 スリランカ プトビル


写真-19 スリランカ プトビル



写真-21 スリランカ ヒッカドウワ



写真-23 インドネシア ロンガ



写真-25 インドネシア クケルエンラーヤ



写真-20 インドネシア ロンガ



写真-22 スリランカ パイヤガラ



写真-24 インドネシア ロンガ



写真-26 インドネシア バンダアチェ

2004スマトラ沖地震津波の数値解析

松山昌史¹⁾

1)正会員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域

1 はじめに

2004年12月26日7時58分(日本時間9時58分)に、スマトラ西方沖でマグネチュード(以下、M)9.0の巨大地震 が発生、それに伴う津波がインドネシア、タイ、インド、スリランカをはじめインド洋沿岸に甚大な被害を 及ぼした。この津波は5000km 以上離れたアフリカ沿岸にも被害を及ぼし、南極の昭和基地でも水位変動が 観測された。その後に、現地被災調査が実施され、津波の全容が少しずつ明らかにされつつある。

この津波はその高さ、被害範囲の点で、世界的にも過去最大級のものである。この津波を数値計算におい てどの程度再現できるかは、今後の日本をはじめ世界の津波防災においてどの程度の断層を波源モデルとし て設定すべきか、また断層における不均一性をどの程度考慮べきかといった課題に対して貴重な資料となる。 本研究では、本津波を対象に数値解析を試み、その挙動及び被災調査結果と比較した。

2 津波の実測結果概要

津波発生後から国際的な津波被災調査団が結成され、各被災地で津波痕跡高が測量されている。これらの 結果は集約されてインターネット上で公開されている(河田ら、2005)。図1にインド洋周辺の海底地形と津波 高の調査結果概略を示す。本震に近いスマトラ島北部では、西岸で最大約30m、北岸で最大約10m、タイ沿 岸ではプーケット島で最大約6m、その北50kmに位置するカオラック沿岸で最大約10m、スリランカ沿岸 で最大約6m、インドで最大約5m程度の津波の痕跡高(津波来襲時の海面からの高さ)が記録された。



3 数値計算方法

3.1 基礎方程式と計算手法

数値計算は地球座標系の線形長波理論に基づく計算モデルを用い、海岸線では鉛直無限壁の完全反射境界 条件を設定している。基礎方程式は以下の通り(今村ら、1986)。

$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R\cos\theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial (N\cos\theta)}{\partial \theta} \right] = \frac{\partial \xi}{\partial t}$	(1)
$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gh}{R\cos\theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = fN$	(2)
$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = -fM$	(3)

λは経度、θは緯度、ηは水位変動、hは静水位、gは重力加速度、(M、N)はそれぞれ(λ ,θ)方向 の流量フラックス、Rは地球の半径、ζは海底地盤の変動量、fはコリオリ係数で $f = 2\omega \sin\theta$ (ω :角 速度)ある。式(1)が連続式、式(2)、(3)がそれぞれ、経度・緯度方向の運動方程式である。摩擦項は考慮せず に最小水深を10m としている。数値計算には水位計算点と流速計算点が1/2メッシュ分、空間方向にも時間 方向にもずれるスタッガードリープフロッグ法を用いている。計算領域は図2に示すように東経70~105度、 南緯5度~北緯23度で、全体領域 a を格子幅3分、スリランカ周辺領域 b、スマトラ島北端周辺領域 c、タイ 南部周辺領域 d を、それぞれ格子幅1分、さらに、スマトラ島北端周辺に領域 e、タイ南部周辺に領域 f 設定 し、格子幅を20秒とした。領域の接続計算については、後藤・小川(1982)の方法に準じた。



図2 計算領域とネスティングした各領域

領域	格子幅	経	度	緯度			
а	3分	70E	105E	5S	23N		
b	1分	77E	85E	5N	12N		
с	1分	90E	100E	0	15		
d	20秒	79.5E	82E	5.75N	10N		
e	20秒	94.5E	97E	4N	6.5N		
f	20秒	97.5E	100E	7.5N	10N		

表1 ネスティングした各領域範囲

3.2 波源モデル

波源モデルは、ハーバード大学の CMT メカニズム解の断層パラメター及び余震分布を参考に設定した(表 2)。断層は余震分布を覆うように500km×200km を2枚設定、地盤の剛性率は 4×10^{-4} dyne/cm²を用いた。 この断層パラメターを基に、Mansinha and Smylie(1971)の方法により計算した海底地盤の変動を図3に示す。 これが津波の入力条件となる。数値計算では、波源は本震位置(東経94.26度、北緯3.09度)から円弧状に広がるものとし、その時の破壊伝播速度は2.5km/秒、立ち上がり時間は0.01秒とした。断層全体の長さが約1000kmあるので、断層の破壊開始から終了までの時間は約400秒となる。

表2 断層パラメター

-				
	south	north		
L(km)	500	500		
W(km)	200	200		
depth(km)	28.6	28.6		
Strike	329	360		
Dip	8	8		
Slip	10	10		
Dislocation(m)	5.0	5.0		
Mo(dyne cm)	4.0	4.0E29		



図3 津波の初期条件となる海底地形変動 コンターラインは0.5m間隔、点線は負(沈降域)

5 数値計算結果

5.1 タイ沿岸

図4(a)、(b)にタイ沿岸の津波高さについて、実測結果(河田ら、2005)と数値計算結果をぞれぞれ示す。プ ーケット島西岸については、最大高さは、いずれも西岸中央部の北緯7.8~8度付近に現われており、6m 程 度の高さで、両者はよく一致する。プーケット島北部からカオラックへ向かうにしたがって、津波の高さは 両者とも5m 以下になる。カオラック付近では、再び両者の津波高は大きくなり、計算結果は最大8m、実測 結果は9~10m になる。以上のように、カオラック付近での最大津波高さに違いは見られるものの、計算結 果は実測結果ときわめて調和的なものとなった

次に、水位変動について、図4(c)に示す。津波はまずプーケット島南端(f22,24)に地震後1時間30分に到達 し、引波から始まっている、引き波の継続時間は30分程度あり、地震後2時間で押波に転じた。そして、津 波は海岸沿いを北へ順番に到達した。この特徴は証言から得られた津波の到達の特徴とよく一致している。 カオラック付近(f05,f09)では、プーケット島南端より1時間程度遅れて津波は到達している。押波の継続時間 は、20分から40分であり、浸水域では津波による流れが数分以上は継続したことが示唆される。また、押波 の第2波目以降に最大水位となる場所が f02、f09、f13、f19と4箇所みられる。 特に、f19は地震後4時間半後 に最大水位を記録した。



図4 タイ南部沿岸における津波高の実測結果、数値計算結果、 および数値計算による水位の時間変化

5.2 スマトラ島北部

図5にスマトラ島北部の津波高さについて、実測結果(河田ら、2005)と数値計算結果をそれぞれ示す。ス マトラ島北岸の津波高については、計算結果ではバンダアチェ付近で最大約4m、西に行くにしたがって、 その値は小さくなり、東経96度付近で約2.2mとなる。一方、実測結果においては、バンダアチェ付近で平 均的に6~7m程度であり、やはり西へ行くに従って小さくなり、東経96度付近では、約5mである。このよ うに津波高の海岸沿いの分布は同じ傾向を示しているが、計算結果は実測結果の40~50%程度である。スマ トラ島西岸については、北緯4.2~5.5度の範囲で平均的に約5mであるが、2点で大きくなる場所があり、北 緯4.6度付近と北緯5度付近で、それぞれ約10m、約8mである。一方、実測結果はこの範囲のごく一部ではあ るものの、西岸北端の北緯5.5度付近で20~30mと、計算結果の4倍以上と圧倒的に大きい。このように、数 値計算結果は実測結果と比較して著しく小さい。数値計算の波源モデルは、500km×200km断層を2枚であ り、最大海底地形鉛直変動も2m弱である。しかし、実際にはスマトラ島北部近傍の波源は不均一性が大き い可能性が高い。山中(2005)の地震波の解析結果によると、スマトラ島北端西方沖に大きなアスペリティが あり、今後はこの情報を取り入れた数値モデルを行う必要がある。

次に、水位変動について図6に示す。北岸(el2, el3)では、地震とほぼ同時に海面も低下し、約30分後に 押波の第一波が到達し、その後も津波による水位変動が繰り返されている。西岸(e01~el1)でも地震とほぼ 同時に海面も低下し、約30分後に押波の第一波が到達、押波の継続時間は約30分である。その後に最大の引 波が20~30分継続し、その後も何度も押波と引波を繰り返した。押波と次の押波の間隔は1時間程度有り、 西岸が30分程度あることに比べて長い点も特徴的である。



図5 スマトラ島北部の津波高に関する実測結果と数値計算結果



図6 スマトラ島北部の津波による水位変動(数値計算)

5.2 まとめ

2004年スマトラ沖地震津波について、地球座標系の線形長波理論に基づき、沿岸では20秒の解像度で数値 解析を行った。断層モデルは500km×200km のものを2枚設定して実施したところ、波源から約500km 離れ たタイ南部沿岸の津波高分布に調和的な結果が得られたが、スマトラ島北部については、実測結果を大きく 下回った。この結果より、スマトラ島北部西方においては、断層の不均一性が大きいことが示唆された。 今後は断層の不均一性を取り込んで、断層モデルを改良する予定である。

本研究については、文部科学省特別研究推進費(代表:河田恵昭 京都大学教授)の補助を受けた。ここに 記して感謝の意を表する。また、図面や地形データの編集において、GMT(Generic Mapping Tools)を使用 しました。開発に携わった方々に謝意を表します。

<参考文献>

後藤智明・小川由信:Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法、東北大学土木工学科資料、1982、52p.

今村文彦・後藤智明・首藤伸夫:1964年アラスカ津波の外洋伝播計算、第33回海岸工学講演会論文集、1986、pp.209-213.

河田恵昭ら(インド洋地震津波災害調査研究グループ): 2004年12月26日 インド洋地震津波災害、2005、 http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/index-j.html.

Mansinha, L. and D. E. Smylie : The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seimological Society of America, Vol.61, No.5, 1971, pp.1433–1440.

山中桂子:12月26日のインドネシアの地震(Ms9.0), EIC 地震学ノート No.161+, 2005, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC161a.html.

スマトラ沖大地震及びインド洋津波被害

平成17年3月2日 外務省緊急対策本部

被害状況

被災国	死者
インドネシア	死者123,727人(国家災害管理調整委員会)
	行方不明者 113,961人
タイ	5,395名(内務省)
マレーシア	68名(警察庁)
スリランカ	3万0974名(スリランカ国家対策本部)
	(注:公安省は死者数を3万8000人と発表)
モルディブ	82名(大統領府)
インド	10,749名(1月18日以降、政府発表なし)
(うちアンダマン・ニコバル諸島)	(1,899名。行方不明者数5554名)(内務省)
ミャンマー	61名(ミャンマー社会福祉・復興救済省)
バングラデシュ	
ソマリア	298名(ソマリア暫定政府当局発表)
タンザニア	10名
ケニア、セーシェル	各1名

邦人の安否

- 30名の邦人の死亡を確認(タイで19名、スリランカで11名)。
- 本省への安否照会人数は、3,331名(3,316名の安否を確認。15名未確認)。

国際社会の対応

- (1)ジャカルタにおける緊急首脳会議(1月6日)
- (イ)国連の緊急支援アピール(今後6ヶ月) 約9.77億ドル
- (ロ)共同宣言 緊急支援措置、復旧・復興、再発防止策について合意
- (2) ジュネーブにおける支援国会合(会合後の誓約も含む)(1月11日) 国連統一緊急アピール(9.77億^۴ル)の約77%(7.56億^۴ル)を誓約。日本はその約1/3の2.5億^۴ルを誓約。

(3)パリクラブ会合(1月12日)

世銀/IMFによる評価実施間、要請のあった被災国による対外公的債務支払いを期待しないことを表明。また、当該評価結果等を踏まえ、更なる措置の必要性の検討等について意見が一致。

(4) 国連防災世界会議(1月18〜22日)

インド洋災害に関する特別セッションを開催し、インド洋地域における恒久的な津波早期警戒システムの 構築を、国連の調整の下にインド洋諸国の意向を踏まえ行うものとする声明を採択した。我が国からは、 ①インド洋の津波早期警戒メカニズム構築のため、知見と技術を最大限に提供する用意がある、②暫定的 措置として現時点で利用可能な観測データから得られる警戒情報を既存の情報通信網を通じて提供する、 ③国際防災戦略(ISDR)やユネスコ等の国際機関と協力する、④JICAによる研修を速やかに行う旨表明。

(5) 主要国の援助表明額

各国の支援総額は50億^ドル以上。日本は5億^ドル、米は9.5億ドル、豪州は約8億^ドル、独は約6.8億^ドル、EC委は約6.2億^ドル、仏は約4.5億^ドル。(注)日本は全額無償の緊急支援であるのに対し、米は中長期復興支援、豪州はインドネシアへの借款 を含む今後5年の中長期支援、独は3~5年の中長期支援、EC委は復興支援を、仏も中長期復興支援をそれぞれ含む。

- (6) 我が国の対応
 - (イ)緊急支援
 - 5億ドルの無償による支援
 - (内訳) · 国際機関 2.5 億^k (1月 21 日までに送金済) UNICEF, WFP, UNHCR, UNDP, IOM 等
 - ・二国間ベース 2.5 億^ドル相当
 - (i)246 億円(2.46 億^ドル相当、1 月 19 日送金済) インドネンア 146 億円、スリランカ 80 億円、モルディブ 20 億円
 - (ii) その他400万ドル(初動措置として実施したもの) インドネシア、スリランカ、モルディブ、タイに対し、計302万^ドルの緊急無償資金協力、6000万円 相当の緊急援助物資供与、WFP を通じた2400トン(5300万円相当)のコメ提供等を実施。
 - (ロ) 人的貢献(自衛隊の活用等)

インドネシア、スリランカ、モルディブ、タイに対し、国際緊急援助隊の医療チームを派遣した他、 警察、消防、海保から構成される救助チーム、DNA鑑定の専門家等のチームを累次派遣(自衛隊を 除き、延べ約240人)。

自衛隊については、インド洋における任務引き継ぎ後、帰国途中の海自艦艇3隻により、タイにお いて捜索・救助活動を実施(終了)したほか、空自輸送機C-130一機がタイのウタパオ基地を拠 点として援助物資等の空輸を実施中。陸上自衛隊は医療・防疫活動(バンダ・アチェ市内)、ワクチ ン接種(テラン:アチェ州西海岸)及びヘリコプターによる援助物資輸送を実施中。海上自衛隊は、 陸自の活動支援を継続しつつ、エアクッション艇(LCAC「エルキャック」)による西岸地区に対す る輸送及び護衛艦艦載へリ(SH-60)による援助物資輸送を実施中。なお、3月上旬には活動を 収容し、10日主力部隊を撤収する予定。

- (ハ) <u>NGOによる支援活動</u>
 ジャパン・プラットフォーム傘下の NGO 及びその他の NGO 1 団体の支援活動に対し支援を実施(約3.8 億円)。
- (二) 官民の支援物資リレー 民間企業及び自治体から政府に対し、各種支援物資の無償提供の申し出があったことを受け、関係省庁、 民間倉庫業者(保管・通関を無償で担当)、航空会社(無償で輸送)、自衛隊、国際機関の協力を得て、 これら物資をインドネシアヘリレー輸送(2日、第1便がバンダ・アチェに到着)し、被災民へ配布 (我が国NGOも協力)している。
- (ホ) <u>復旧・復興</u> 緊急支援に加え、中長期的な復旧・復興についても最大限の支援を行う。
- (へ) <u>公的債務の支払い猶予</u> 債務の支払いを一定期間猶予する用意がある旨表明済み。
- (ト) インド洋における津波の早期警戒システムの構築への努力 国連の関連機関(ISDR)に拠出(400万ドル)。JICAによる研修を実施。国連防災世界会議 (1月18日~22日)では「特別セッション」を開催し、協力のあり方を議論し、「共通の声明」を発出。

インド洋大津波の被害分析に基づく今後の津波防災への一提言

高梨和光¹⁾

1)正会員 清水建設(株)土木事業本部 設計部 設計技術グループ

1 はじめに

従来,津波の調査研究を行う方法には,①古文書や伝承の調査,②現地での聞き取り調査や痕跡調査,③ 大型実験設備(造波水路)による模型実験および④津波シミュレーションがある.今回のスマトラ沖地震・ インド洋大津波のように、インド洋周辺諸国(直接的な被災国は12ヶ国)に被害をもたらした大津波を調査 するには、現地の状況(政治的な問題,宗教的な問題および衛生的な問題)を十分に把握していないと調査 中での事故(ゲリラ,マラリアや2次災害等)に遭遇する可能性がある.このため、新聞やテレビ等のメデ ィアの情報を収集・分析する1次調査(初動調査)が非常に重要になる.近年、この情報収集にはインター ネットという世界的なコンピューターネットワークも用いることができ、新聞やテレビ等のメディア以外の 情報ツールとして利用され、比較的簡単に世界の情報が入手できるようになってきている.

本報告では、まず、インターネットから得られる情報でインド洋大津波の全貌がどの程度まで明らかにで きるかについて報告する.その結果を踏まえて、今後の現地調査や耐津波設計技術の確立のためにいくつか の提言を行う.提言の内容は、①津波および津波被害調査方法、②防災教育のための教材内容、③海岸施設 設計のための耐津波性能マトリクス(今回のインド洋大津波と日本に来襲した歴史津波の比較分析による) および④総合的な津波防災の観点から要求される機能を満足する施設である.

2 インド洋大津波の概要と被害状況

今回の地震・津波の被害状況および規模を確認するために、表1,2,3,4を掲載した.これからインド洋 大津波が非常に大きい災害であることがわかる.

発生日時¹⁾: 2004/12/26 00:58:49 (UTC), 07:58:49 (Local Time) 発生場所¹⁾: OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA (3.244°N, 95.825°E) 震源の深さ¹⁾: 10 km 地震のモーメントマグニチュード¹⁾: Mw = 9.0 (JMA マグニチュード換算 Mj = 8.6) 津波のマグニチュード :m = 4 以上

表1 インド洋大津波による犠牲者数(2005.1.31現在)²⁾

表2 津波のマグニチュード³⁾

国名	死者	行方不明者
インドネシア	105,162人	127,774人
スリランカ	38,000人	5,600人
インド	11,000人	5,600人
タイ	5,400人	3,100人
東アフリカ4カ国(ソマリア、ケニア、タンザニア、セーシェル)	137人	(不明)
マレーシア	74人	(不明)
モルディブ	82人	26人
ミャンマー	59人	(不明)
バングラデシュ	2人	(不明)
計	159,916人	142,100人

津波のマグニチュー ド(m)	津波の高さ	被害程度
-1	50cm	な
0	1m	非常にわずかな被害
1	2m	海岸及び船舶の被害
2	4~6m	若干の内陸までの被害や人的損失
3	10~20m	400km以上の海岸線 ご顕著な被害
4	30m以上	500km以上の海岸線 ご顕著な被害

表3 巨大地震と犠牲者数¹⁾

1	1960年	チリ地震	M9. 5	約5700人
2	1964年	アラスカ地震	M9. 2	約130人
3	1957年	アリューシャン地震	M9. 1	0
4	1952年	カムチャツカ地震	M9. 0	(不明)
4	2004年	スマトラ沖地震	M9. 0	約300,000人

表4 5万人以上の犠牲者を出した地震¹⁾

1	2004年	スマトラ油地震	M9 0	約300 000人
	20044		1010.0	*j000,000X
2	1976年	唐田(タンシャン)地震	M/.5	約255,000人
3	1927年	西寧(シーニン)地震	M7.9	約200,000人
4	1920年	甘粛(カンスー)地震	M8. 6	約200,000人
5	1923年	関東大震災	M7.9	約143,000人

3 津波および津波被害のインターネットを用いた調査方法

3.1 情報収集の目的と前提条件

インド洋大津波による各国での津波現象をインターネットで得られた写真(244点)やビデオ(22点)で 津波現象の評価を行った.このとき,情報収集を行うにあたって,倫理規定と収集規定を次のように設定し た.これは,倫理規定を設定することで,確実な津波防災の資料の位置づけと品質を明示することができる からである.一方,収集規定は収集する津波現象を把握する有益な情報のランクを設定するものである.こ れらの規定によって,質の高い情報を収集することができる.さらに,インターネットを用いた情報収集と ともに,新聞記事の収集を行い,インターネットによる情報との比較検討も実施中である.

◆倫理規定	◆収集規定
 ・ 地震・津波防災に資すること ・ 工学的な観点で整理すること ・ 資料の活用を考慮すること ・ 知見の公表を前提とすること ・ 出所・出典を明確にすること 	 津波や被災構造物の写真やビデオ 浸水している写真やビデオ 被害状況の写真やビデオ 体験談や状況報告 現地状況を把握する資料

3.2 収集作業の概要

インド洋大津波が発生した翌日から、情報収集を開始し、1週間、2週間および1ヶ月を区切りとして、その時点での簡易資料を作成し、関係各位に配布した.長期的には、この1ヶ月の期間を①情報収集期間、それ以降を②情報整理期間、③情報整備期間とし、津波データベースの整備を念頭においた.さらに、効果的な収集作業を行うため、収集する資料の保存形態と津波伝播シナリオを設定した.これは、情報収集の初期 段階では錯綜した情報や安易な報告が流布するため、これらの情報に惑わされないようにするためである.

この津波伝播シナリオは波源モデルによって検討し、津波被害が集中する場所や津波伝播特性を確認しな がら行った.図1は津波伝播シナリオを構築するための波線理論による津波伝播解析である.インドネシア の西部にある長方形は断層モデル、レンズ状の形状は海底地形や島による津波を収斂させる場所、円形が描 かれている場所は津波が収斂して被害を与えた地域を示している.今回の津波は、インド亜大陸北部のミャ ンマーやバングラデシュでの被害が少なかった.これは、海底地形の影響で津波が収斂して津波被害がスリ ランカやタイに集中したからであると考えられる.次に、図2は波線理論の津波波源の妥当性を確認する逆 伝播解析である.これは、津波被害があった地域から津波が逆進して波束が集まった場所が津波の波源にな るという考え方で解析を行う方法である.この方法によって、津波の波源を求めてみると、波線理論で設定 した断層モデルとの良い一致を得ることができた.この逆伝播解析によって、津波伝播解析の妥当性が確認 することができ、スリランカやタイに津波が集中することが明らかとなった.

この津波伝播シナリオによって、津波被害が大きくなると予想されるスリランカやタイを中心に津波情報 を収集することにした.このように、波源モデルによる津波伝播シナリオは簡易にできるもので津波の定性 的な検討には適していることがわかる.



図1 波線理論による津波伝播解析



図2 津波の逆伝播解析

3.2 インターネットによるインド洋大津波の収集資料の特徴

津波伝播解析による被害地域予想を考慮した結果,スリランカとタイの情報(36点と53点)を多く入手す ることができた.一方,地震と津波の直撃によって,津波発生直後,情報発信が鈍っていたインドネシアも 最終的には一番多くの津波情報(46点)を収集することができた.他方,被害の程度が比較的他の地域に比 べて小さいインドやモルディブの情報(13点と3点)が極端に少なかった.これは,インターネットで提供 される情報が主に通信社(AP⁴⁾, REUTER²⁾, AFP⁵⁾)に依存しているためニュース性のある情報が多くな るからである.そこで,インターネットの個人サイト,現地新聞社のホームページの参照や日本にいるイン ドからの留学生からの写真(93点)の情報提供で欠落している津波情報の補充を行った.

個人サイトによる津波情報の補充した結果を図3,4に示す.ここで,GIRIJAはインドの留学生からの写真, 個人サイトのAVC⁶(アジアビデオコム),ADRC⁷(アジア防災センター)と各通信社(AP,REUTER, AFP)のサイトとポータルサイトのYahoo⁸⁾である.図3は国別に収集した写真数で犠牲者の多い国の順番を 横軸にしている.インドは留学生からの写真が一番多く,タイは日本からの観光客被害もあったので比較的 情報が多くなっている.図4はサイト別での写真数を比較したものである.インドからの留学生の写真 GIRIJAが一番多く,次にポータルサイトのYahoo,通信社のAPのサイト,個人サイトのAVC,ADRC,通 信社のREUTER,AFPのサイトの順番となっている.このように,インターネットは個人の情報源を活用で きる特長を有し,従来の新聞の記事ではできないニュース性に左右されない情報収集ができることが明らか となった.



3.3 インターネットによるインド洋大津波の被害分析

インド洋大津波の被災地が地球レベルの広範囲であるため、ほとんどの津波現象を網羅していることが確認できる.今までに、日本に来襲した歴史津波では遡上(陸上や河川),海底形状や海岸形状による津波の 増幅が良く知られていたが、今回の津波被害の分析には、近年(主に1980年以降)の津波工学の知見(レン ズ効果、津波ソリトン、トラッピング現象、回り込み現象や島による遮蔽効果)を十分考慮する必要がある. これらの現象を整理すると以下のようになる.

- ① レンズ効果:島や浅瀬が津波の波束を収斂するために起こる現象で、1960年チリ地震津波によるハワイ 諸島による三陸地域への津波来襲や1983年日本海中部地震津波の大和堆による韓国への被害がある。
- ② 津波ソリトン:1983年日本海中部地震津波でソリトン現象が明らかにされた。海底地形の急激な変化に よって、津波のフロントがいくつもの短波長の津波に変化する現象である。
- ③ トラッピング現象:津波の波長と島の大きさが一致した場合に生じる共鳴現象によってできる定在波で、 1993年北海道南西沖地震津波が奥尻島に来襲したときに観測され、エッジウェイブとも呼ばれている.
- ④ 回り込み現象:基本的には波の回折現象の一部であるが、津波が回折する時に陸上遡上を伴う現象として、今回著者が定義したものである.1983年日本海中部地震津波や1993年北海道南西沖地震津波で観測され、回折時に構造物に沿って大きな被害をもたらす.
- ⑤ 島による遮蔽効果:津波が島に来襲した場合、その背後にある陸地に津波の被害が及ばない現象である. ただし、この遮蔽された近傍地域では津波による被害がある.これは、1993年北海道南西沖地震津波における奥尻島背後の北海道で確認されている.

今回のインド洋大津波を被災国と津波の現象で整理すると表5のようになる.代表的な来襲津波の写真を 国別に添付したものを写真1に示す.表5の内容は主に個人サイトのAVCの写真を基に,NOAA⁹⁾やインドか らの留学生からの写真によって,トラッピング現象,回り込み現象や島による遮蔽効果をまとめたものであ る.このとき,各通信社(AP, REUTER, AFP)のサイトやポータルサイトのYahooからの津波被災後の写 真を参考にしている.

津波の現象	陸上遡上	河川遡上	海底形状増幅	海岸形状増幅	レンズ効果	津波ソリトン	トラッピング 現象	回り込み現象	島による遮蔽 効果
インド洋大津波	0	0	0	0	0	0	0	0	0
インドネシア	0	0	0					0	
スリランカ	0		0		0		0	0	
インド	0	0	0						0
タイ	0		0	0	0	0		0	
マレーシア	0		0						
モルディブ	0		0			0	0	0	0

表5 津波被災国と津波の特徴

写真1における各々の写真は特定の地点を表しているので、その国全体を表現しているものではないが、 現地調査や津波シミュレーションによる分析を行う場合の貴重な情報であり、インド洋大津波の概要の一部 を明らかにしているものと考えられる.ここで、インド、タイとマレーシアでは巻き波砕波、モルディブで は崩れ波砕波が確認できる.



写真1 津波被災国の来襲津波

さらに、今回の津波被害において注目すべき事象としては、①インドネシアでのデュアルハザード(地震 と津波の二重被害)、②スリランカでのセイロン島による複雑な津波現象の発現、③インドでの重要構造物 の津波被災、④タイでの津波避難施設の重要性および⑤モルディブでの防波堤による津波被害の低減、が挙 げられる.これらの事象の分析が、日本における歴史津波被害の見直しや将来の巨大津波の被害分析に寄与 することが期待できる.さらに、地球レベルの地震観測(USGS¹⁾)や海域観測(NOAA)や商用の衛星写 真によって、インド洋大津波を地球規模で捕捉できたことは津波工学にとって意義あることである.また、 「インド洋地震津波災害調査研究グループ」¹⁰⁾のサイトも国際的な津波情報の提供および共有化ということ で日本による貢献の一つと考えられる.インターネットによる津波被害の分析の課題としては、資料収集を 行う上での現地スタッフやパートナーの確保が挙げられる.今後、各国と連携した情報収集体制の構築の必 要性がある.

4 津波防災に向けた提言

4.1 津波および津波被害の調査方法

インド洋大津波のインターネットで得られた写真やビデオのほとんどが現地の人々によって撮影されたもので、広域の被災状況を把握するのに威力を発揮する航空写真はアメリカ軍が広報用に配信した数点しか得られなかった.一方、衛星写真はインド洋大津波被害の前後を撮影しているものもあるが、高価なため利用しにくいのが現状である.

そこで、簡易に広域での調査ができる無人ヘリによる津波調査や震災調査が有効であると考えられる.こ れは、津波の現地調査では地面が瓦礫だらけになっており、人がかならずしも立ち入る場所があるとは限ら ないからである.さらに、広域の津波による土砂流出、津波の回り込み被害の把握や陸上遡上域の調査(植 生の変化、津波痕跡、建物被害、農業被害や漁業被害)では威力を発揮できると期待される.さらに、この 無人ヘリで地震・津波の調査を行えば、調査中の事故(ゲリラ、マラリアや2次災害等)は防止できる.今 後の津波調査の方法の一つとして十分に検討していく必要があると思われる.

この無人ヘリを用いた広域調査の特長を以下に示す.ここで、①と②は有人ヘリで難しい調査項目である. 運用コストは有人ヘリによる調査の約半分程度で、30m~150mの低高度での撮影が可能である.このため 調査地点での接写画像も入手できる.この作業③と④を行うために無人ヘリに搭載された技術は、GPSと連携した自律制御飛行システムによる軌道追従、誘導飛行とリアルタイム画像技術である.

- ① 人が踏み込めない場所での状況把握
- ② 気象条件の変化や昼夜を問わない即時的な対応(夜間飛行は赤外線カメラを搭載)
- ③ 観測座標, 方位と時系列的な情報の収集と配信
- ④ 精度の高い軌道追従性調査

図5に無人へりによる広域調査の作業工程を示す.この無人へりは軽量・小型であるため,調査地点に車 両や船舶で搬入できる機動性を有している.最初に調査地点の座標を地上局のパソコンに入力し,離陸指令 を無人へりに与える.この地上局は車載が可能でオペレータとともに車両によって移動ができる.無人へり は、この離陸指令による運行プログラムによって,離陸,ホバリングを行い.予め入力された座標を参照し ながら調査地点に向かって飛行する.その間,飛行領域の状況をリアルタイムで地上局に画像伝送する.調 査地点に到達すると、写真撮影を行うプログラムによって,調査地点を撮影する.撮影された画像データは 基地局の画像処理装置により3次元化されて状況把握ができる.もし、新たに追加項目が生じた場合も、地 上局からの割り込み指令によって写真撮影を行うことができる.調査活動が終了した場合と通信の途絶など で飛行が困難な場合,無人へりは自動的に帰還するプログラムを実行し、速やかに撤収,調査作業を終了す る.この無人へりは,他の無人へりとの連携(共同作業と情報交換)によって,さらに広域の調査を行うこ とができる.



図5 無人へリによる広域調査作業¹¹⁾

4.2 防災教育のための教材内容

インド洋大津波のインターネットで得られた写真やビデオを通じて、津波の現象や津波被害の特徴を十分 に把握できることがわかった.また、情報量の豊富さとともに、それらの情報がデジタルデータであるとい う特長がある.表6は日本に来襲した被害津波と資料形態をまとめたものである.日本海中部地震以降は、 写真やビデオによる情報は多くなるが、それ以前の津波では写真自体が高価であったため、極端に少ない.

歴史津波においても、陸上遡上がある被害津波ではインド洋大津波の被害ビデオで確認できる激しい渦や 瓦礫の漂流が考えられる. ▲印は今回のインド洋大津波から得られた知見を基に、情報が少ないチリ地震津 波以降の津波被害を見直したものである. リアス式海岸付近での島や入り江によって、トラッピング現象, 回り込み現象や島による遮蔽効果が予想される. 今後,これらの現象については分散項を考慮した津波シミ ュレーションで詳細に分析する必要がある.

津波名称	陸上遡上	河川遡上	海底形状增幅	海岸形状增幅	レンズ効果	津波ソリトン	トラッピング現象	回り込み現象	島による遮蔽効果	
明治三陸大津波	0		0	0						·文献
昭和三陸大津波	0		0	0						·文献、写真(数点)
東南海地震津波	0		0	0				A	▲	·文献、写真(数点)
南海道地震津波	0		0	0						·文献、写真(数点)
チリ地震津波	0		0	0	0					·文献、写真(数点)
日本海中部地震津波	0	0	0		0	0				・文献、写真(数十点)、ビデオ(数点)
北海道南西沖地震津波	0		0				0	0	0	·文献、写真(数十点)
北海道東方沖地震津波	0	0	0			0				・文献、写真(数十点)、ビデオ(数点)
インド洋大津波	0	0	0	0	0	0	0	0	0	・文献(数十点)、写真(数百点)、ビデオ(数十点))

表6 被害津波と資料形態

今回得られた写真やビデオを津波データベースとして整備することで、防災教育のために、以下のような 内容の教材を作成することができる.

- 大きな被害が発生する陸上遡上や河川遡上
- ② 広範囲な被害が生じる津波の海底形状増幅や海岸形状増幅
- ③ 集中的な被害が出る島や浅瀬によるレンズ効果
- ④ 局所的な被害が起こる津波ソリトン、トラッピング現象、回り込み現象や島による遮蔽効果

さらに、⑤国別の津波被害状況、⑥日本に来襲した被害津波、⑦津波の基礎知識、⑧津波防災対策技術が 考えられる.このように、教材(コンテンツ)が多岐に及ぶため、階層性のないネット的なシナリオも含め た津波データベースの検討を行う必要がある.

4.3 耐津波性能マトリクス

4.3.1 インド洋大津波による海岸施設の被害状況

インド洋大津波での知見を生かした歴史津波の被害の見直しや性能設計という観点で、今後の構造物の耐 津波性能を考えていく必要がある.表7は津波と構造物の被害状況を国別に整理したものである.インドネ シアやマレーシアでは津波を低減するものが少なく、被害が最も大きかった.インドやタイでは海岸沿いに 建てられたホテルや堤防が後背地の津波被害を低減している.モルディブでは、日本の ODA による防波堤 が津波被害の低減に寄与したが、津波の写真からさんご礁による津波低減効果も加味されていると思われる. スリランカでは植民地時代に作られた城壁が完全に津波を防いだ例があった.このように、今回のインド洋 大津波においても、構造物に適切な津波対策がおこなわれている場合やそれに準じた場合は津波被害を免れ ていることが確認できる.

	押し波	引き波	津波の高さ(m)	遡上高さ(m)	潜堤(さんご礁を 含む)	津波防波堤	防波堤	護岸	盛土	堤防(道路を含 む)	建物や港湾施設 への被害状況
汀線までの距離の目安(m)						-100	-50	0	10		
インドネシア(バンダ・アチェ)		0	30	10						0	×
スリランカ(ガール)	0		10	5			0		0	0	0
インド(チェンナイ)	0		10	5						0	Δ
タイ(パトンビーチ)		0	20	10						0	Δ
マレーシア(ペナン)		0	10	5						0	×
モルディブ(マリ)	0		2	1	0		0				Δ

表7 津波と構造物の被害状況

4.3.2 インド洋大津波の知見を考慮した耐津波性能の設定

インド洋大津波での知見を生かした耐津波性能を考えるに当たって、従来の津波に対する設計を参照して みる.従来の津波設計は以下のような基準によって行われていた.

◆設計潮位

港湾の施設の構造及び安定に用いる潮位は、天文潮及び気象並びに津波等による異常潮位の実 測値又は推算値に基づいて定めるものとする. ・・・

◆津波

津波の諸元としては、最高潮位、最低潮位、津波偏差、津波波高、周期等を考慮する.これらの諸元は、できるだけ長期間にわたる実測地、既往災害等の痕跡等を参考にして、適切な手法により定める.

(港湾の施設の技術上の基準・同解説より)

インド洋大津波では、津波の陸上遡上による構造物被害が顕著であった.ここでは、海岸付近の建物、土 木構造物を想定し、巨大津波による津波の陸上遡上を考慮して耐津波性能を考慮して以下のように設定する.

◆耐津波性能(案)

- ・耐津波性能1:防波堤および護岸で対応でき、陸域での津波 遡上を防止できる性能
- ・耐津波性能2:越波および遡上による陸域での浸水を許容するものの、津波減災設計により、構造物の躯体の主部材(一次部材)と付属部材(二次部材)に影響がない性能
- ・耐津波性能3:越波および遡上による陸域での浸水を許容するものの、津波減災設計と損傷制御設計により、構造物の付属部材(二次部材)に影響がでるが、躯体の主部材(一次部材)には影響がでない性能

表8 耐津波性能マトリクス



この耐津波性能を横軸,津波の発生頻度を縦軸に設定した耐津波性能マトリクスの例を表8に示す.津波 の頻度によって、津波(1年に1回程度)、大津波(10年に1回程度)と巨大津波(50~100年に1回程度)を 考慮している.〇印の都市は5万人以上の海岸に面した市での建物や構造物、△印の地方は5万人未満の海岸 に面した町や村での建物や構造物、◇印の都市・地方重要施設は海岸に面した市町村に建設される重要な施 設(例えば、エネルギー生産施設)と想定している.このとき、◇印の都市・地方重要施設と〇印の都市の 巨大津波に対する設計では、巨大津波による陸上遡上が津波被害を助長する傾向がインド洋大津波の被害事 例で明らかとなったので、耐津波性能を1ランク高めている.

4.4 耐津波性能を考慮した施設

インド洋大津波や今後日本に来襲する巨大津波を考えると、都市部のような人口集中地域では耐津波性能 2を有した構造物やこれらの構造物から構成される施設が必要である.この構造物には、災害時における人 命の確保や災害復旧時での防災拠点としての機能の確保が期待される.

今回のインドネシアの陸上遡上では道路が津波の通り道になっているので、構造物や施設の配置計画はハ ザードマップを作成して、総合的に評価しなければならない.この防災マネジメント計画は構造物のハード な防災対策だけでなく、ソフトな防災対策の構築という観点でも重要である.特に、情報の受発信や伝達は 非常に重要で、地震や津波の警報、避難誘導だけでなく、被害状況の確認ができることが望ましい. 防災拠点としての機能を確保できる構造形式の一つとして、①耐震性能を満足する免震構造、②耐津波性 能を満足する高床構造と③災害復旧を行える防災拠点としての機能、が挙げられる.図6に耐津波性能2を有 する構造物の一例と表9に防災拠点となる構造物に要求される機能を示す.

耐津波性能2を有する構造物は大津波と巨大津波に対して陸上遡上を許容する構造物である.この構造物 は、津波による洗掘と津波力の低減を考慮するため、地盤改良によって固められたマウンドの上に構築する. この柱は杭に連結して基盤に達し、津波による流体力だけでなく、漂流物の衝突力を評価して設計される. ここでの、2次部材は上部構造物に連絡するための歩廊である.柱の直上には、免震装置を設置することで、 レベル2地震に対する耐震性能を与えることができる.上部構造物は常時は予め設定された機能(例えば、 港湾事務所)を満足するが、地震や津波による災害時には防災拠点として避難場所に転用できる.

防災拠点の機能の中で、情報の受発信や伝達は非常に重要で、これを行う電力の確保が不可欠である.例 えば、自家発電設備による復旧時の3日間程度の電源確保が必要である.次に、淡水化プラントによる飲料 水の確保が挙げられる.



図6 耐津波性能2を有する構造物の一例

5 おわりに

インターネットによるインド洋大津波の情報収集および被害分析によって、インド洋大津波の被災地 が地球規模の広範囲で全ての津波現象を網羅していることが確認できた.つまり、津波による遡上(陸 上や河川)、海底形状や海岸形状による津波の増幅だけでなく、レンズ効果、津波ソリトン、トラッピ ング現象、回り込み現象や島による遮蔽効果とそれに関連した構造物被害が起きていることが明らかと なった.その結果を踏まえて、今後の現地調査や耐津波設計技術の確立のために①津波および津波被害 調査方法、②防災教育のための教材内容、③海岸施設設計のための耐津波性能マトリクス(今回のイン ド洋大津波と日本に来襲した歴史津波の比較分析による)および④総合的な津波防災の観点から要求さ れる機能を満足する施設、についての提言を行った.

将来,各国と連携した情報収集体制の構築の布石となる人材育成の重要性を再認識すると同時に,今後の現地調査,津波解析や設計検討の作業を通じ,これらの提言を具現化するように大学や関係機関が 連携し,巨大地震や巨大津波発生時に要求される機能を発揮できる構造物や施設の検討を行っていく必 要があると考える.

謝辞

東京大学生産技術研究所研究生 Rajarathinam Girija 女史から受領したインドにおける津波情報はインド洋大津波の被害分析を行う上で非常に参考になった.ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

- 1) USGS : http://earthquake.usgs.gov/
- 2) REUTER : http://www.reuters.com/
- 3) 渡辺偉夫:日本被害津波総覧〔第2版〕,東京大学出版会,1998
- 4) AP : http://www.ap.org/
- 5) AFP : http://www.afp.com/home/
- 6) AVC : http://www.asiantsunamivideos.com/
- 7) ADRC : http://www.adrc.or.jp/top_j.php
- 8) Yahoo : http://www.yahoo.co.jp/
- 9) NOAA : http://www.noaa.gov/
- 10) インド洋地震津波災害調査研究グループ:http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/index-j.html
- 11) ヒロボー(株): http://www.hirobo.co.jp/

表9	防災拠点となる構造物に要求される機能
120	「「「「「「「」」」の「「」」の「「」」の「「」」の「「」」の「「」」の「「

災害時での機能	機能を満たす手段	常時での活用
電力	分散型電源	ピークカットで使用
ガス、冷暖房	分散型エネルギー	ピークカットで使用
飲用水	淡水化施設、井戸、貯水池	他地域への支援活用
情報通信	衛星、回線の多重化	
交通	ヘリポート、道路の多重化、無人ヘリコプター	救急医療で使用
避難救護	可動間仕切り	_
資材	備蓄倉庫	