

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*・高橋智幸*・松山昌史**・原田賢治***
平石哲也****・Seree Supartid*****・Sittichai Naksuksakul*****

タイ南部の Khao Lak と Phuket 島における2004年スマトラ島沖津波とその被害の実態を論じている。今後の津波被害想定に資するため、鉄筋コンクリート造建物の浸水深と被害程度の関係、浸水深と流速（流体力）の関係、植生の定量的な津波減勢効果も論じている。さらに、津波避難ビルの在り方などの議論において地盤浸食の検討が必要であること、本地震の規模 $M=9.0$ が現在の地震活動長期評価手法で想定できるかどうか検討する必要があることを提言している。

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 4 番目の規模（表-1）を持った $M=9.0$ の地震（USGS）が北スマトラの西岸沖（図-1）で発生した。インド洋での $M\geq 9.0$ の地震は、少なくとも過去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 3 番目の規模（表-2（Abe, 2005））を持ち、波源に近いインドネシアの Banda Aceh をはじめ、波源から約500 km 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 4 月 8 日現在で各々約181,700人と51,400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被害と考えられ、津波災害としては記録史上最大、自然災害としても記録史上最大級となった。

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 日まで現地調査したタイ南部の Khao Lak と Phuket 島における津波とその被害の実態を論じる。

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日は夕方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 日の午後にタイ政府、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。

* 正会員 秋田大学工学資源学部土木環境工学科
** 正会員 電力中央研究所流体科学領域
*** 正会員 人と防災未来センター
**** 港湾空港技術研究所海洋水工部波浪研究室
***** Ransit University, College of Engineering
***** 横浜国立大学大学院博士後期課程

表-1 20世紀以降の大地震

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	9.0
4	2004. 12. 26	北スマトラ島沖	9.0

表-2 20世紀以降の大津波（Abe, 2005）

順位	年月日	場所	津波規模(M)
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	9.0
5	1957. 3. 9	アリューシャン	9.0

表-3 各国の死者数と行方不明者数（4 月 8 日現在）

国名	死者数(人)	行方不明者数(人)
インドネシア	126,915	37,063
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	-

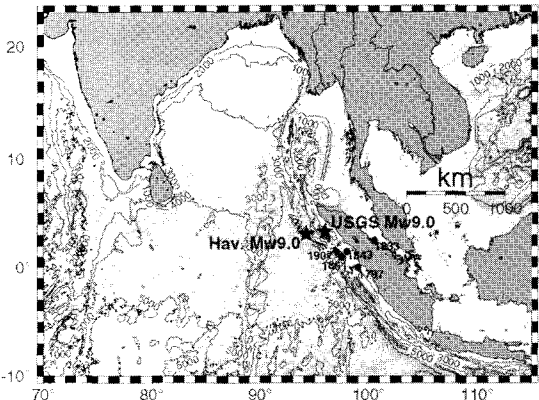


図-1 本地震(★)と既往地震(●)の震源、及び海底地形

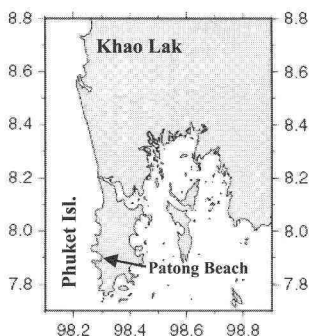


図-2 津波の調査域

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、即ち、被害建物などの前・背面での浸水深（松富，1993）、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140 km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500 km 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報告や現地調査資料から導かれており、これらの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（図-3（Royal Thai Navy, 2005））と整合する。また、津波はまず 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（アスベリティ B 部分）と北側断層（アスベリティ C 部分）の存在（山中，2005）や津波の共振などが考えられる。

写真やビデオによれば、Khao Lak ではソリトン分裂

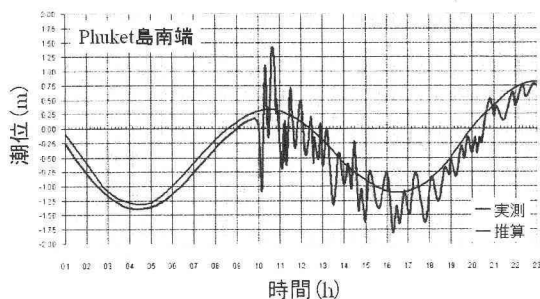


図-3 Phuket 島南端での検潮記録

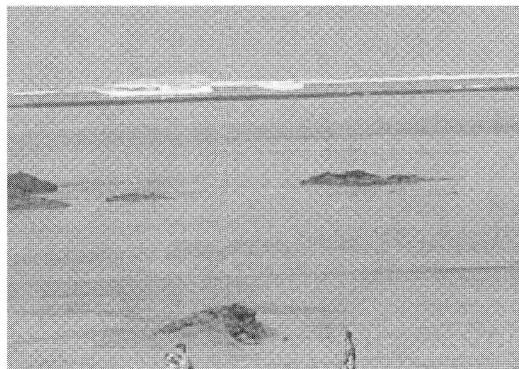


写真-1 Khao Lak の津波(その1)



写真-2 Khao Lak の津波(その2)

が生じたようである。その証拠例を写真-1（BBC, 2005）と2（Asian Tsunami Videos, 2005）に示す。ともに短距離間隔の2段砕波が認められ、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。

津波高の平均像は Khao Lak で6～10 m, Phuket 島西岸で3～6 m, Phuket 島南岸から東岸にかけて3～1 m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6 m 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4.5 m 程度である。

Khao Lak と Phuket 島西岸における津波高の顕著な

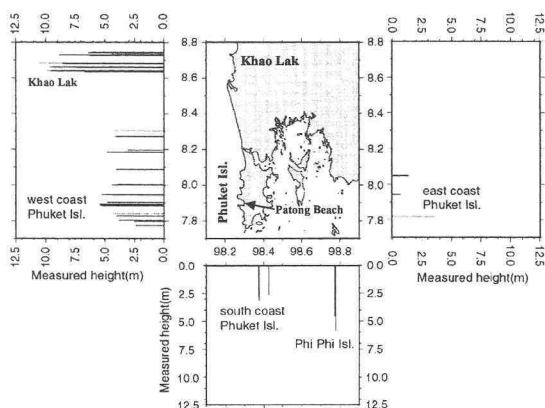


図-4 津波(遡上)高の分布

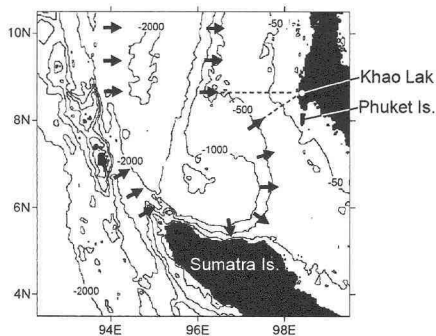


図-5 アンダマン海の海底地形

差の原因として、北側断層の存在や波源の不均一性、海底地形(図-5)、ソリトン分裂の発生などが考えられる。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やや陰である南西岸でも津波高が大きかった(土木学会, 2005)。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。

5. 市街地や居住区における津波

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 5～6 m、浸水深は 2 m 程度であった。痕跡浸水深から推定された氾濫流速 u は 3～4 m/s (本推定法の妥当性が Banda Aceh の津波で実証された(榊山ら, 2005))、単位面積あたりの抗力(支配的な力 F (松富ら, 2004))は $0.9 \sim 1.7 \text{ tf/m}^2$ ($0.9 \sim 1.7 \times 10^4 \text{ Pa}$) であった。ただし、 F は次式から評価している。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 a \cong \rho q u \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は海水の密度、 C_D ($\cong 2$) 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

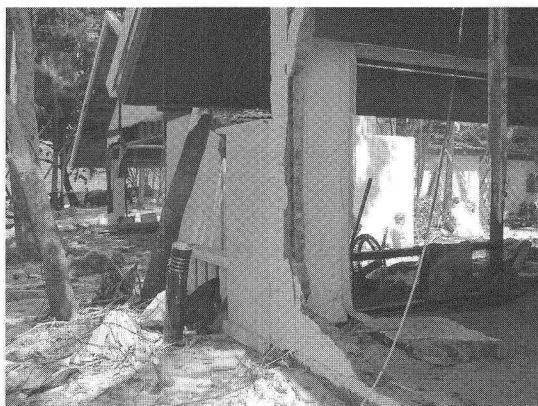


写真-3 壁が壊れた煉瓦造の家屋(Patong ビーチ)



写真-4 廃墟と化した Khao Lak のホテル群(海側から望む)



写真-5 3階部分まで浸水した Khao Lak のホテル(左端)

が 2 m 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 10 m 程度、浸水深は 4～7 m に達した。痕跡浸水深から推定された氾濫流速は 6～8 m/s、単位面積あたりの抗力は $3.8 \sim 6.7 \text{ tf/m}^2$ ($3.7 \sim 6.6 \times 10^4 \text{ Pa}$) であった。

本地区はリゾート地で、コテージやホテルが建ち並んでいた所である。しかし、海に近いコテージや床と柱が鉄筋コンクリート、壁がブロック・モルタルで造られた

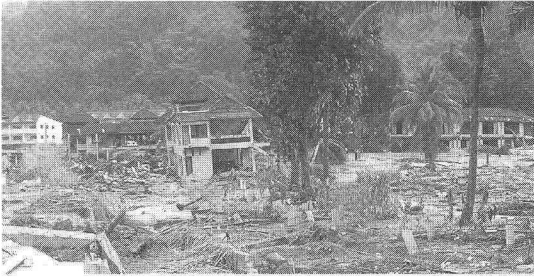


写真-6 地盤が流され、大破に至った建物(Khao Lak)

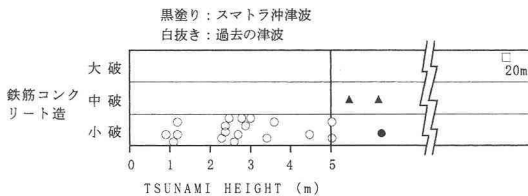


図-6 浸水深と建物の被害程度の関係

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が床のように鉄筋コンクリート版でなく、ブリキや瓦製の三角屋根で、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（松富・首藤：1994）。しかし、本津波では、壁などが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。

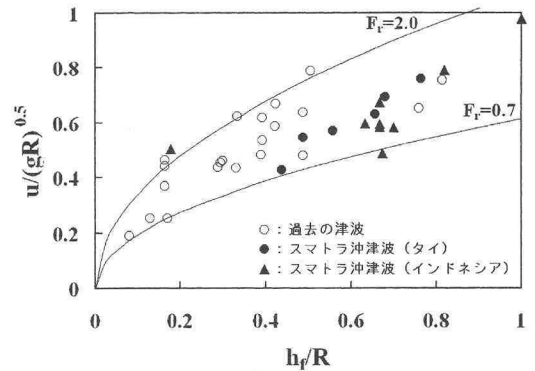
建物自体は小破や中破で済んでも、地盤が浸食され、大破に至ったものもある。その例が写真-6の中央の建物である。地盤浸食は今後の津波避難ビルの在り方などの議論において検討しなければならない項目であろう。

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（松富・飯塚、1998）。

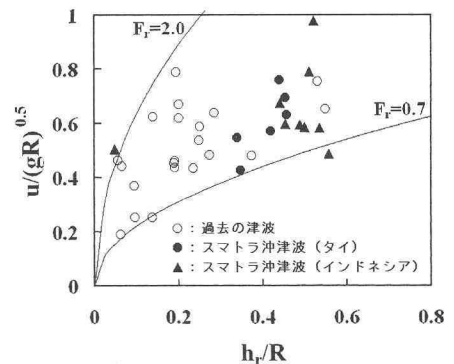
$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (2)$$

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

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。



(a) 前面水深を浸水深とした場合



(b) 背面水深を浸水深とした場合

図-7 浸水深と氾濫流速の関係

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被害状況を写真-7と8に示す。両地点は海岸に沿って約150m離れており、写真-8の地点が北側に位置する。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さそう。

6. おわりに

実質3日間の現地調査結果を示した。建物被害と植生の津波減勢効果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のよい資料（証言）が得られなかった。写真やビデオ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

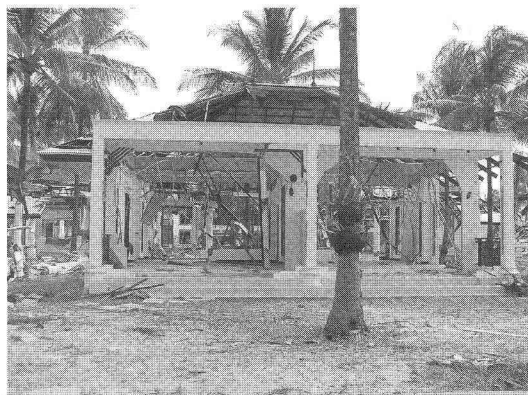


写真-7 植生域(上)と背後家屋(下)の被害状況 (Khao Lak, 地盤高 = 3.7m, 浸水深 = 4.9m, 植生域厚 = 14m, 植生密度 = 0.27%)

写真-8 植生域(上)と背後家屋(下)の被害状況 (Khao Lak, 地盤高 = 3.5m, 浸水深 = 4.6m, 植生域厚 = 28m, 植生密度 = 0.42%)

定や減災対策に貴重な資料を提供するものである。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て、後世に役立てることが我々の責務である。

本地震を除くと、少なくとも過去200年間の本地域における最大地震規模は $M = 8.5$ 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、日本におけるこれまでの評価ケースに比べて評価資料が少なければ少ないなりに、本地震規模 $M = 9.0$ が想定できるかどうか検討する必要があると思われる。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

榊山 勉・松富英夫・都司嘉宜・村上嘉謙(2005)：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, 2004年

12月26日スマトラ島沖地震報告会梗概集, 日本地震工学会, pp. 33-38.

土木学会：2005年1月14日開催速報会資料, <http://www.jsce.or.jp/report/33/>, 参照2005-1-31.

松富英夫(1993)：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, pp. 756-761.

松富英夫・首藤伸夫(1994)：津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 246-250.

松富英夫・飯塚秀則(1998)：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, pp. 361-365.

松富英夫・大向達也・今井健太郎(2004)：津波氾濫流の構造物への流体力, 水工学論文集, 第48巻, pp. 559-564.

山中佳子：2004年12月26日のインドネシアの地震 ($M9.0$) 改訂版 No.161+, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC161a.html, 参照2005-2-21.

Abe K. (2005) : Revised M_s and run-up estimate for the Indian Ocean Tsunami, 2005年1月27日 tsunami-japan への投稿資料.

Asian Tsunami Videos: Amateur Asian Tsunami Video Footage, <http://www.Asiantsunamivideos.com/>, 参照2005-3-30.

BBC: [bbc.co.uk homepage](http://news.bbc.co.uk/) - Home of the BBC on the Internet, <http://news.bbc.co.uk/>, 参照2005-2-28.

Royal Thai Navy: Tide gauge data, <http://www.navy.mi.th/hydro/tsunami.htm>, 参照2005-3-30.