

2004年スマトラ・アンダマン地震津波調査報告：スマトラ島北西端における 津波波高と堆積物の分布

A short report on the 2004 Sumatra-Andaman tsunami and its deposits around the Banda Aceh, northern Sumatra, Indonesia

鎌滝孝信¹・西村裕一²・Guy Gelfenbaum³・Andrew Moore⁴・Rahmat Triyono⁵

Takanobu Kamataki¹, Yuichi Nishimura², Guy Gelfenbaum³, Andrew Moore⁴ and Rahmat Toriyono⁵

¹ 活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSI/AIST, t.kamataki@aist.go.jp)

² 北海道大学地震火山研究観測センター (Institute of Seismology and Volcanology)

³ 米国地質調査所 (United States Geological Survey)

⁴ ケント州立大学 (Department of Geology, Kent State University)

⁵ インドネシア気象庁 (Badan Meteorologi dan Geofisika, Indonesia)

Abstract: The 2004 Sumatra earthquake (Mw=9.3) was the largest subduction-zone earthquake in the world since the 1960 Chilean earthquake. The 2004 earthquake generated large tsunami, which propagated across the Indian Ocean and caused the catastrophic disaster. Our international tsunami survey team investigated the magnitude of tsunami and distribution of tsunami deposits caused by this earthquake in the province of Nanggroe Aceh Darussalam, northern Indonesia. Distributions of tsunami deposits were surveyed in detail along three lines from beach to inland. The maximum thickness of the tsunami deposits is about 70 cm. Most of them are composed of beach sands including rip-up clasts, shells, and coral fragments. The tsunami deposits can be separated into several units showing the deposition from succeeding waves. These deposits extend at least 600 m from the beach, and show landward decreases in thickness and grain-size.

キーワード: インドネシア, 2004年スマトラ・アンダマン地震, 津波調査, 津波堆積物
Keywords: Indonesia, the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, tsunami survey, tsunami deposit

1. はじめに

2004年12月26日にスマトラ島北西沖でMw 9.3の地震が発生し、インド洋周辺に津波による被害を及ぼした。この地震発生約1ヶ月後、インドネシア、スマトラ島北端部、ナングロアチェ・ダルサラム州(以下アチェ州)の州都バンダアチェ(Banda Aceh)市周辺(第1図)において、国際津波調査団(団長:東京大学地震研究所都司嘉宣助教授)による現地調査を実施した。調査地域は今回の津波による最大被災地であるが、津波の波高や遡上高、浸水域については我々の調査以前には明らかになっていなかった。調査団は、日本人7名、米国人2名、インドネシア人6名の計15名からなり、団員の専門は理学・工学分野の多岐にわたった。現地ではそれぞれの専門を生かし、津波の被害状況調査、津波の規模や襲来時刻についての聞き取り、痕跡に基づく津波の波高や浸入方向の測定、津波の流速の推定、津波堆積物の調査などを実施した。

津波堆積物を使って過去に生じた海溝型巨大地震の履歴や浸水範囲を推定する研究が、最近になって数多くおこなわれている(例えば、Atwater, 1987; 箕浦ほか, 1987; Nanayama *et al.*, 2003; 藤原ほか編, 2004; Cisternas *et al.*, 2005など)。これら歴史地震津波の研究は、地震発生や津波被害の将来予測を行う上で重要な研究として認識されている。また、津波堆積物の堆積学的な特徴も明らかにされつつある(例えば、西村・宮地, 1994; 七山ほか, 1998; 藤原ほか, 2003; Tuttle *et al.*, 2004; 鎌滝ほか, 2004など)。しかしながら、津波堆積物の産状や分布範囲について、原因となった津波の波高や浸水域と比較検討した例は、これまでほとんど報告されていない。津波堆積物の分布から過去に生じた海溝型巨大地震による津波の規模を推定する際には、津波の規模とそれによって形成される津波堆積物の分布様式や厚さとの関係を明らかにする必要がある。

今回の調査の目的は、津波の波高を測定し、さらに津波堆積物の分布様式や厚さとの関係を明らかにすることにある。以下に調査の簡単な報告を記す。

2. 2004年スマトラ・アンダマン地震津波と調査地域

2004年12月26日の7時58分(現地時間, UTC: 0時58分), スマトラ島北端バンダアチェ(Banda Aceh)市の南南東約250 km, 深さ約30 kmを震源とするMw 9.3の地震(以下, 2004年スマトラ・アンダマン地震)が発生した。地震の規模は観測史上最大といわれる1960年チリ地震(Mw 9.5)に次ぐもので, 余震域はスマトラ島北部からインド領アンダマン諸島まで, 1000 km以上におよんだ。

2004年スマトラ・アンダマン地震は巨大な津波を引き起こし, インド洋沿岸諸国に甚大な被害をもたらした。死者, 行方不明者が合わせて20万人以上という規模は, 過去に知られている津波災害の中で最悪のものとなった。中でもインドネシアのアチェ州における被害が最も大きく, 人口の80%以上が犠牲になるという壊滅的な被害を受けた地域もある。

2004年スマトラ・アンダマン地震が発生した地域では, インド洋プレートが, スンダ海溝においてアンダマン・ニコバル諸島やインドネシア各島が載るユーラシアプレートの下に斜めに沈み込んでいる。スマトラ島西方沖では, 最近の約200年で津波を伴う地震が1797, 1833, 1843, 1861, 1907年に発生している(Soloviev and Go, 1974)。なかでも1861年には2月および3月に地震が発生し, それぞれ905人, 1700人の津波による犠牲者を出したとされる(Soloviev and Go, 1974)。

3. 現地調査

現地調査は, 2005年1月17日から2月1日にかけて, バンダアチェ市を中心に実施した。筆者らは堆積物調査班として, バンダアチェ市街地から15 km程南西に位置しスマトラ島西海岸に面したロックガ(Lhok Nga)地区を中心に, 津波の波高および遡上高の測定と津波堆積物の分布の調査をおこなった。なお, 調査期間中, バンダアチェ市およびその近郊には営業しているホテルなどの宿泊施設はなく, 同市内の被災しなかった地区にある民家の数部屋を間借りさせていただき, 調査のベースキャンプとした。調査団員の1日3度の食事もすべてそこで世話になった。被災後3週間が経過していたにもかかわらず, バンダアチェ市内の様子は道路や家の内部に泥が堆積し, 清掃もままならない状況であった。しかし, 水や食糧などは豊富にしまわっており, 市の中心部では人々に活気も戻ってきているように感じられた。

海岸から約5 km離れた市内中心部では津波によって打ち上げられた船がみられ, 津波がこれ以上内陸まで侵入したことがわかる。また, バンダアチェ市北方のウレレー海岸(Ulee Lheue beach)付近では建物のほとんどが破壊され, 津波の破壊力の凄まじさ

を痛感させられた。バンダアチェ市中心部から約15 km南西に位置するロックガ地区における津波被害は, バンダアチェ市街よりさらに激しく, 海岸付近の建物や構造物などはほぼ100%が破壊され, 家屋の断片すら残されておらず, 数本の木が残されているのみの地域もあった。ロックガ地区より南, 西海岸に沿った道路では, 津波により川に架かる橋のほとんどが流失し, 被災者の救援活動, 我々の調査活動, そして復興支援活動をいっそう困難なものにしていた。

バンダアチェの市街地はスマトラ島の北端にあり, 震源域から見てその北に連なる島々の影に位置している。一方, スマトラ島の西海岸にあるロックガ地区は前面にそうした“バリアー”がなく, インド洋に面しているため津波の直撃を受けた。

3.1 津波波高の測定

津波の浸水高, 遡上高は, 建物に残された痕跡(建物の壁に残された水の跡, 第2図a), 木に残された痕跡(折れた木の枝, 木の枝に引っかかった浮遊物など, 第2b図), そして崖に残された痕跡(水流によって土壌や植生を削り取られた壁面および崖や地面に残された浮遊物など, 第2c図)の海面からの高さを, レーザー式測距計(米国レーザーテクノロジー社製インパルス200LR)を用いて測定した。建物や木に残された痕跡は津波の波高, すなわち浸水高を示す。一方, 崖に残された痕跡は津波が斜面をはい上がった高さ, すなわち遡上高を示す。

浸水高の測定値は西海岸北方のランプーク(Lampuuk)地区にて34.3 m(潮位補正前値: 測定時の海水面からの高さ)を記録した。アチェ州西海岸では一様に15~35 mという高い値を示した。また, 同地域における遡上高の測定値は, 25~35 mであった。潮位補正後の浸水高データを, 第3図に示す。一方, アチェ州北海岸やバンダアチェ市街地の遡上高および浸水高はそれぞれ最大15 m, 5 mであった(第3図)。

3.2 津波堆積物の調査

津波の浸水域には, 「津波堆積物」として材やヤシの実などの浮遊物の他に, 海から運ばれたと思われる直径1 mを越えるサンゴの塊や岩石, すなわち「津波石」, そして海浜砂を主体とする「津波砂層」が残されていた。津波堆積物の詳しい分布調査は, 海岸から内陸方向へ流れと同じ方向の測線を3カ所で設定し, それぞれの測線沿いにおおよそ100~50 m間隔で幅約50 cm深さ5~80 cm(地表面から埋没土壌が現れるまで)のトレンチを掘削し, 堆積物表面から埋没土壌(津波襲来以前の地表面)までの堆積物を観察し, 厚さを計測した。3カ所でプラスチックケースを用いて試料の採取をおこなった(七山・重野, 1998のLunch Box法による)。測線の走

向は、津波によって倒され運ばれた木の向きや木に引っかかった浮遊物、そして倒された草の向きなどから流れの方向を推定して決めた。この方向は海岸線の向きとほぼ直交する。以下に2本の測線における津波堆積物の分布の特徴を記す(第4,5図)。

(1) ランプークゴルフコース測線(第4図)

ここは以前ゴルフ場だった場所であるが、現在では一面津波によって運ばれた砂に覆われている。この測線における津波堆積物の分布様式の特徴は、現在の海岸から約90m内陸までは侵食が卓越し堆積物は残されておらず、そこから約600m内陸まで堆積物が認められる。堆積物の厚さは津波前の地形面の起伏に沿って増減するが、大局的に見れば内陸へと徐々に薄くなる。また、堆積物の粒径も内陸へと細粒化する。

(2) ロックガビーチリゾート測線(第5図)

ここは以前リゾートホテルが建っていた場所である。津波によってそのホテルは建物の痕跡すら失われ基礎のコンクリートのみが地面に残された状態であった。この場所は周囲を小高い斜面に囲まれ、比較的閉ざされた環境である。この測線における津波堆積物の分布様式の特徴は、現在の海岸線から約20m内陸までは堆積物が残されておらず、そこから約400m内陸まで堆積物が認められる。この測線でも、津波堆積物は海岸付近から内陸へとその厚さを繰り返し増減させながら徐々に薄くなる。しかし、ランプークゴルフコース測線ほど、地形面の起伏と関係があるとは思われない(第4,5図)。また、堆積物の粒径は海岸線から内陸方向へと細粒化する(Moore *et al.*, submitted)。

今回の津波によって形成された堆積物の厚さは0~70cmで、堆積物の大部分は貝殻やサンゴ片を含む海浜砂からなり、土壌起源のものと思われる直径数mmのリップアップクラストを含む。また、津波堆積物は複数の堆積ユニットからなり、上位のユニットが下位のユニットを削剥する構造がみられ、複数回の侵食、堆積作用によって形成されたことが推定される。1枚の堆積ユニットは正級化構造を示すものが多くみられる。津波堆積物全体としては上方細粒化する。津波堆積物の厚さは微地形の起伏等に影響され変化に富むが、総じて海岸から陸方向へと薄層化する傾向を示す(第4,5図)。このような特徴は、1960年チリ地震津波によって形成された津波堆積物(宍倉ほか, 2004; 鎌滝ほか, 2005)や北海道東部の500年間隔の地震津波によって形成された津波堆積物(鎌滝ほか, 2004)などと同様で、津波の遡上に対応した営力の減衰過程を示していると解釈でき、潮間帯から陸域に遡上した津波堆積物の一般的特徴といえよう。

4. おわりに

今回の津波調査では、スマトラ島北部のバンダアチェ周辺で津波波高の測定と津波堆積物の分布に関する調査をおこなった。甚大な被害を受けた地域であったため数々の苦難があったが、調査団全員が無事に調査を終え貴重なデータを収集することができた。今後、本調査で得たデータの解析を進め、津波堆積物を使った古地震研究に役立ててゆきたい。また、この地域でも将来の地震・津波の災害軽減のために過去の津波堆積物を調べ、大規模な津波の再来間隔を求めることが重要である。

謝辞 被災地の住民の皆様には、甚大な被災の直後にもかかわらず、住居や移動手段そして飲食糧の提供をはじめ調査にご協力いただき、心よりお礼申し上げます。この地震津波で犠牲になられた方々のご冥福を心からお祈りし、被災地域の一日も早い復興を祈念いたします。

インドネシア気象庁(Badan Meteorologi dan Geofisika / Meteorological and Geophysical Agency)には調査の際に様々な便宜を図って頂いた。以下に示すインドネシア国際津波調査団の皆様には、調査中に様々な面でお世話になった。東京大学地震研究所の行谷佑一氏には、インドネシア調査に関して日本での情報のとりまとめなどお世話いただいた。活断層研究センターの杉山雄一センター長、佐竹健治副センター長、岡村行信チーム長には、インドネシア調査団への参加を勧めていただいた。同センター、藤原 治博士による査読意見は、原稿の改善に役立った。以上の方々にこの場を借りて感謝の意を表します。

本調査研究の一部は、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恵昭, 課題番号:16800055)の補助を受けておこなわれた。

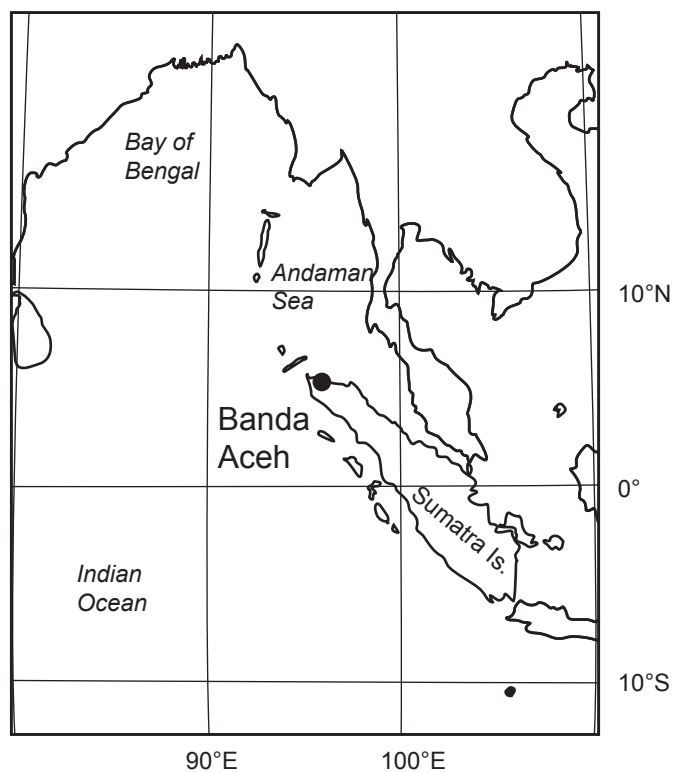
2004年スマトラ・アンダマン地震津波インドネシア国際津波調査団団員リスト

都司嘉宣(団長, 東京大学地震研究所), 松富英夫(秋田大学資源工学部), 谷岡勇市郎, 西村裕一(北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター), 榊山 勉(電力中央研究所), 鎌滝孝信(産業技術総合研究所活断層研究センター), 村上嘉謙(関西電力株式会社), Guy Gelfenbaum(米国地質調査所), Andrew Moore(ケント州立大学, 米国), Sindhu Nugroho, Budi Waluyo, Inyoman Sukanta, Rahmat Triyono, Alphonso(インドネシア気象庁), Yudhicara(インドネシア海洋地質研究所)

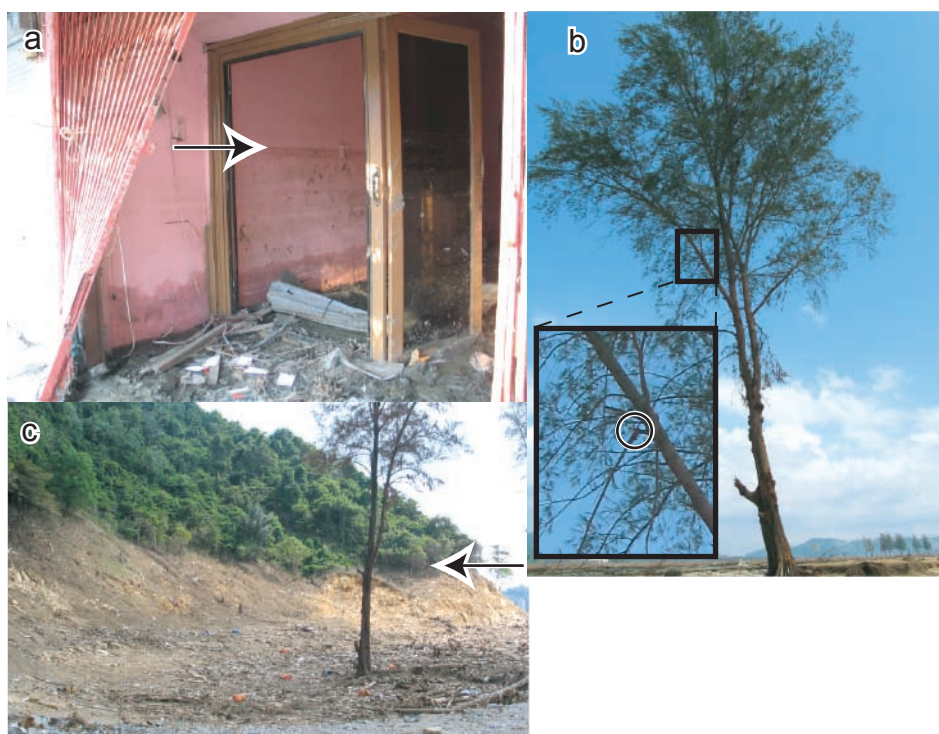
文 献

- Atwater, B. F. (1987) Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State, *Science*, 236, 942-944.
- 藤原 治・鎌滝孝信・田村 亨 (2003) 内湾における津波堆積物の粒度分布と津波波形との関連－房総半島南端の完新統の例－. *第四紀研究*, 42, 67-81.
- 藤原 治・池原 研・七山 太 編 (2004) 地震イベント堆積物－深海底から陸上までのコネクション－. *地質学論集* 第 58 号, 日本地質学会, 169p. 東京.
- 鎌滝孝信・澤井祐紀・宍倉正展・佐竹健治・山口正秋・松本 弾 (2004) 潮間帯における津波堆積物の分布様式：北海道東部，藻散布沼の例. *活断層・古地震研究報告*, No. 4, 31-43.
- 鎌滝孝信・宍倉正展・澤井祐紀・佐竹健治・Cisternas, M., and Atwater, B. F. (2005) チリ中南部における津波堆積物と古地震調査. *日本地震学会 2005 年秋季大会予稿集*, 44.
- Cisternas, M., Atwater, B. F., Torrejon, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T., Shishikura, M., Rajendran, C. P., Malik, J. K., Rizal, Y., and Husni, M. (2005) Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 437, 404-407.
- 箕浦幸治・中谷 周・佐藤 裕 (1987) 湖底底質堆積物中に記録された地震津波の痕跡－青森県市浦村十三付近の湖沼系の例－. *地震* 第 2 輯, 40, 183-196.
- Moore, A., Nishimura, Y., Gelfenbaum, G., Kamataki, T., and Triyono, R., Sedimentary deposits of the 26 December 2004 tsunami on the northwest coast of Aceh, Indonesia. *Earth, Planets, Space* (submitted).
- 七山 太・重野聖之 (1998) Lunch Box と速乾性ボンドを用いた未固結砂礫の定方位試料作成法. *地質ニュース*, 523, 52-56.
- 七山 太・佐竹健治・下川浩一・重野聖之・小板橋重一・宮坂省吾・石井正之 (1998) 遼上型津波堆積物の堆積相と堆積過程－1993 年北海道南西沖地震津波の研究例－. *月刊地球号外*, no. 15, 140-146.
- Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Atwater, B. F., Shigeno, K., and Yamaki, S. (2003) Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril Trench. *Nature*, 424, 660-663.
- 西村裕一・宮地直道 (1994) 北海道南西沖地震に伴う津波堆積物の分布及び粒度特性. *月刊地球号外*, no. 7, 139-147.
- 宍倉正展・鎌滝孝信・澤井祐紀・佐竹健治・Cisternas, M., Atwater, B. F., and Youlton, C. (2004) チリ中南部における古地震・古津波調査－2003 年, 2004 年調査報告－. *活断層・古地震研究報告*, No. 4, 265-280.
- Soloviev, S. L. and Go, Ch. N. (1974) A catalogue of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean. Academy of Sciences of the USSR, Nauka Publishing House, 310p. Moscow.
- Tuttle, M. P., Ruffman, A., Anderson, T., and Jeter, H. (2004) Distinguishing tsunami from storm deposits in eastern North America: the 1929 Grand Banks tsunami versus the 1991 Halloween storm. *Seismol. Res. Lett.*, 75, 117-131.

(受付：2005 年 9 月 28 日，受理：2005 年 11 月 7 日)



第1図. インド洋と周辺地域.
Fig. 1. Map showing the Indian Ocean and our survey site, Banda Aceh, northern Sumatra, Indonesia.



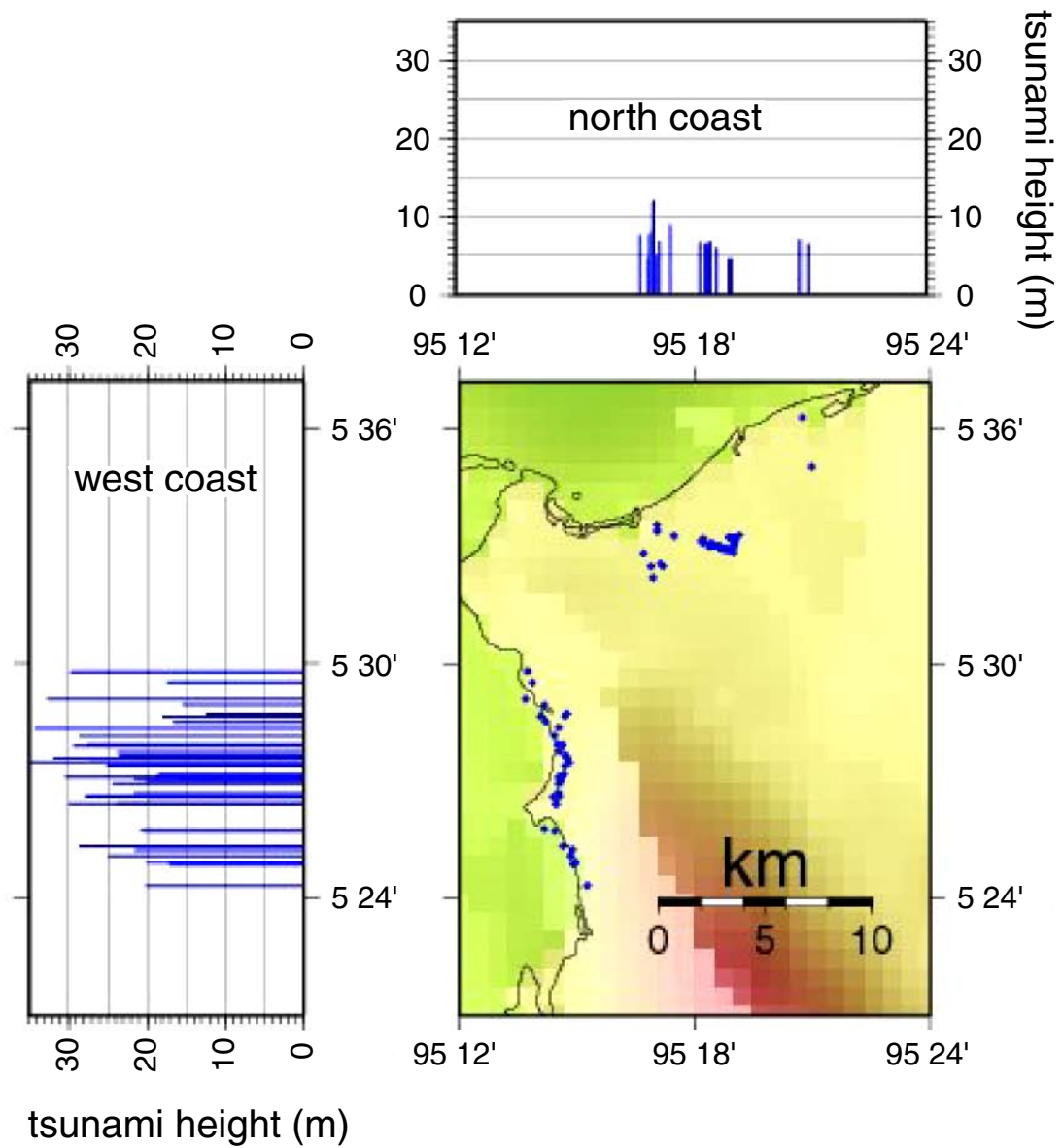
第2図. 津波波高の指標. a) 建物の壁面に残された水の痕跡(矢印). b) 折れた木の枝(円). c) がけに残された痕跡(植生の枯れた跡や洗い流された跡: 矢印).

Fig. 2. Example of flow indicators. a) The water mark on the wall. b) The broken branches. c) The water mark at a hill.

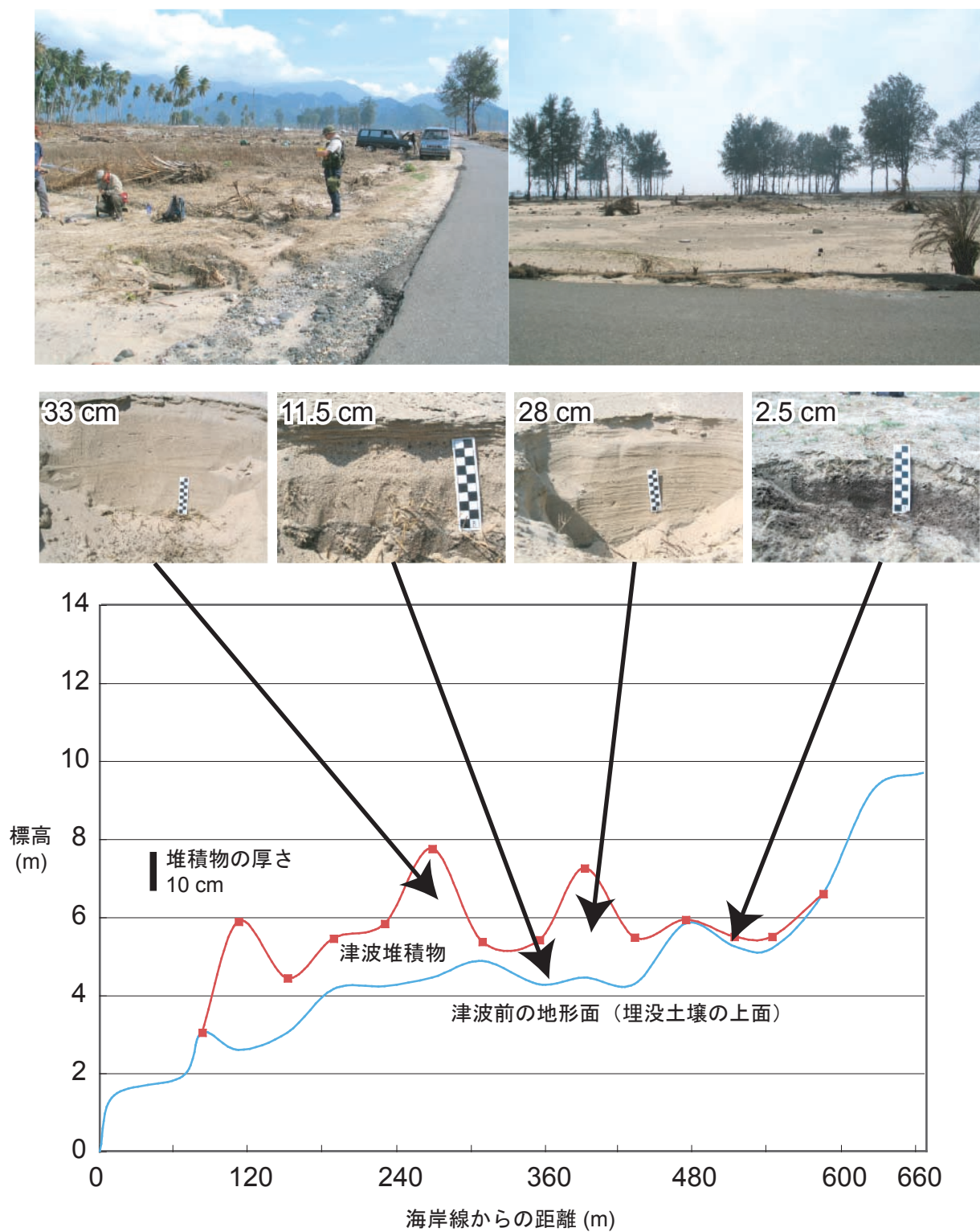
Measured tsunami height (m)

Banda Aceh

2005/1/30

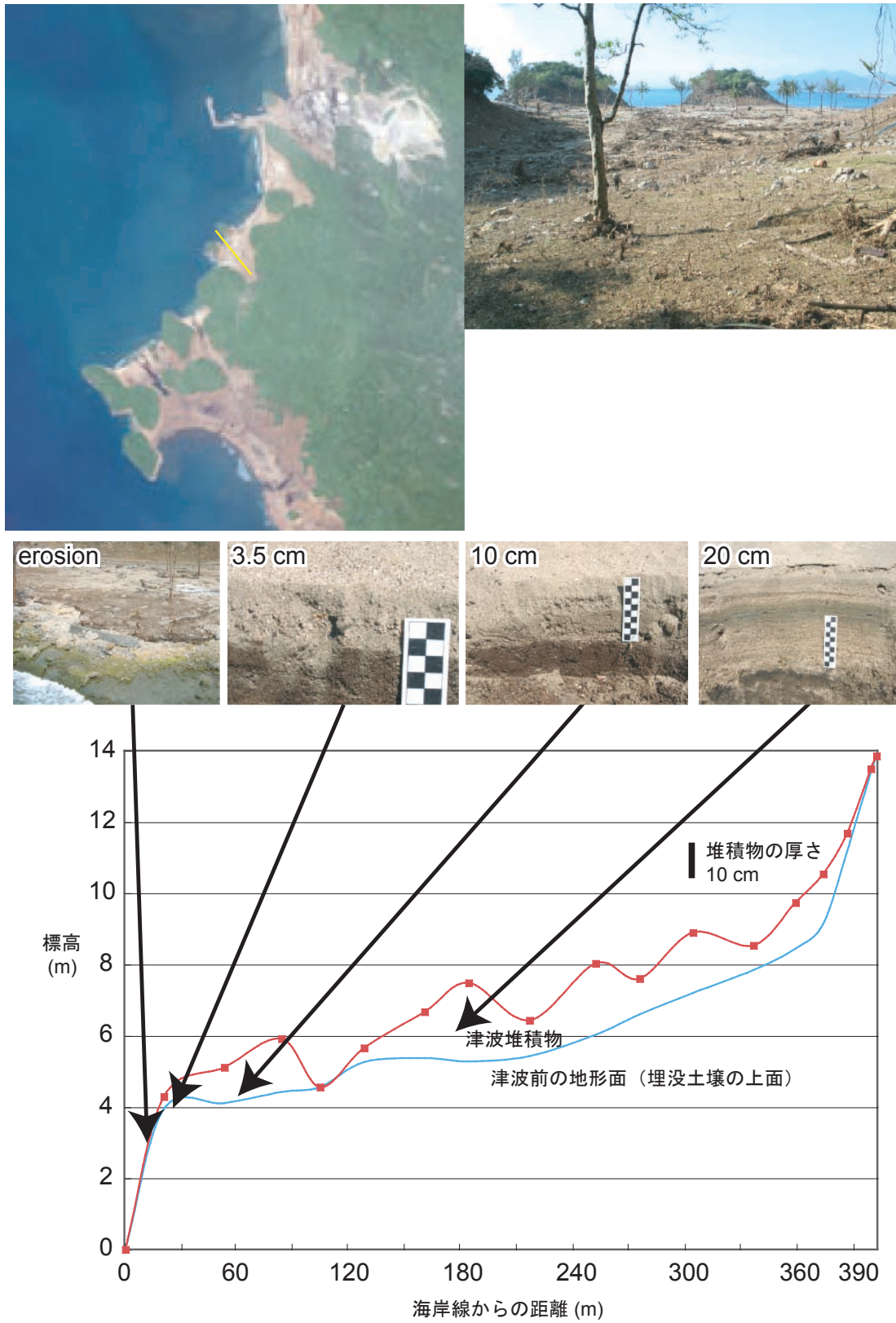


第3図. バンダアチェ周辺における津波波高調査結果. (電力中央研究所 松山昌史氏作成)
Fig. 3. Survey localities and tsunami height distribution (Compiled by Dr. Matsuyama).



第4図. Lampuuk Golf Course 測線における津波堆積物の分布様式.

Fig. 4. Distribution pattern of the 2004 tsunami deposits at the survey line of Lampuuk Golf Course.



第5図. Lhok Nga Beach Resort 測線における津波堆積物の分布様式.
 Fig. 5. Distribution pattern of the 2004 tsunami deposits at the survey line of Lhok Nga Beach Resort.