

2004 年インド洋大津波によって形成された津波堆積物の特徴： タイ・バンサックビーチの研究例

後藤和久¹, 今村文彦¹, P. Kunthasap², 松井孝典³, 箕浦幸治⁴, 菅原大助⁴

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ島沖大地震により、人類史上最大規模の巨大津波（2004 年インド洋大津波）が発生し、周辺各国の沿岸域に甚大な被害を及ぼした。このような巨大津波が発生した場合、津波の掃流力により大量の土砂が陸域、または海域方向に運搬され堆積すると考えられる。このようにして堆積した土砂は津波堆積物と呼ばれ、これまで過去の津波イベントによって形成された津波堆積物を用いて、津波の発生周期の推定が行われてきた（例えば、Atwater, 1987; Minoura et al., 1987; Dawson et al., 1988）。しかし、津波発生直後に津波堆積物の調査を行った例は少なく、例えば津波の浸水域や高さなど、津波発生直後にしか得にくい情報と、津波堆積物の分布傾向などとの比較はあまり行われていない。そこで本研究では、2004 年インド洋大津波によって形成された津波堆積物の現地調査をタイ・バンサックビーチ周辺で行い、特に堆積物の分布傾向と津波浸水域の関係を検討した。

2. 調査地域および調査方法

本研究では、2005 年 3 月 26～31 日にタイ南西部のバンサックビーチ周辺で調査を行った（図 1a, Goto et al., in press）。同地域での津波の最大遡上距離は、植物の生存状況から約 650～800 m と判断される（図 1b, c）。

本研究ではまず、約 700 m 四方の範囲のマッピングを行い、津波堆積物の分布を調べた。そして、図 1b の地点 1 において、津波堆積物の詳細な観察を行った。その後、堆積物が連続的に観察される場所で、海岸線に直交する方向に 2 本の測線（測線 A, B）を設定し、測線上の地形、津波高さ、および堆積物の層厚や堆積構造の観察、試料採取を行った。採取した試料は、実体顕微鏡下で構成粒子を調べた。また、粒度を調べるため、採取試料中の泥質成分を #200 メッシュのふるいで除去した後、京都大学大学院理学系研究科の沈降管粒度分析器で残さの粒度測定を行った。粒度は、次式で示される ϕ スケールを用いて表現する。

$$\phi = -\log_2 d / d_0 \quad (d: \text{粒径}, d_0 = 1 \text{ mm})$$

3. 調査結果

3.1. 地点 1

地点 1 では、層厚 50cm を超える津波堆積物を確認した（図 2, Sugawara et al., in press）。津波堆積物は、津波前の地表面と考えられる黒褐色の土壌を不連続に覆っており、大きく 3 つのユニット（下部、中部、上部）に区分される。下部は、層厚約 20cm の中～粗粒砂からなる。中部は、層厚 5～10cm のシルト～極細粒砂からなり、下部を整合的に覆っている。上部は、層厚 20～30cm の中～粗粒砂からなり、中部を侵食面を持って覆っている。その境界は著しく乱れて脱水構造（Lowe, 1975）を呈しており、断片化したシルトが上部に取り込まれている様子が観察される。また、下部・上部海浜砂層中には小型の離弁した二枚貝殻が含まれる。

¹ 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

² National Disaster Warning Center

³ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

⁴ 東北大学大学院理学研究科地圏環境科学科

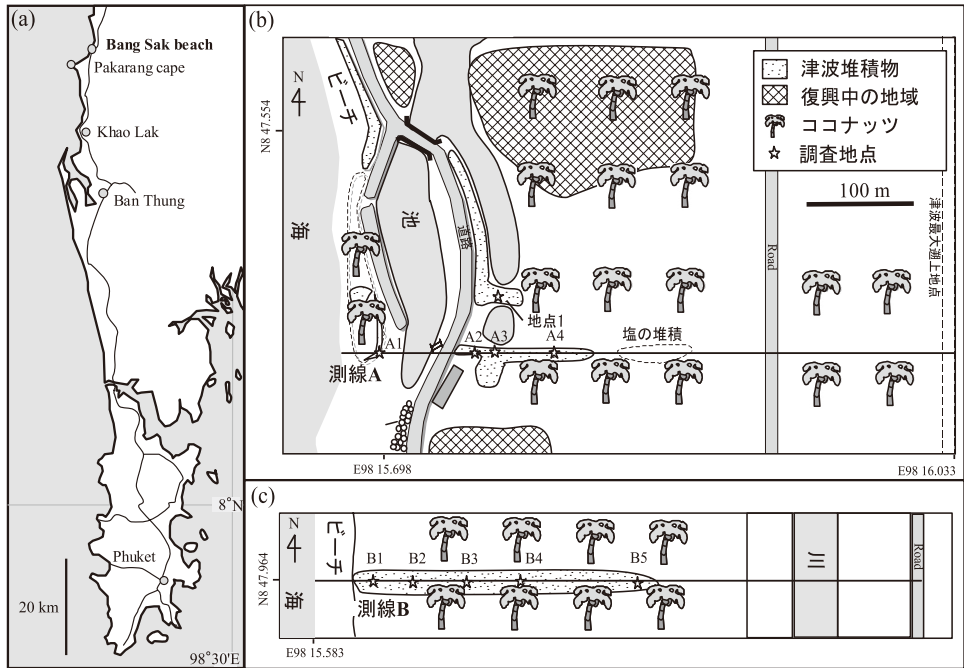


図 1. (a) 本研究の調査地域, (b)バンサクビーチの地点 1 および測線 A 付近における堆積物の分布状況, (c)バンサクビーチの測線 B 付近における堆積物の分布状況. いずれの図も, Goto et al. (in press)に基づく。

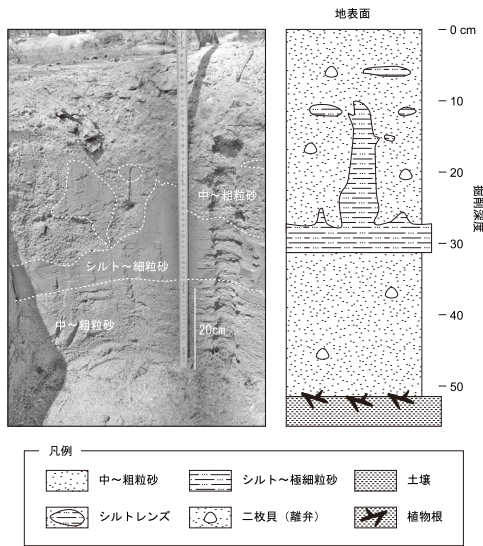


図 2. 地点 1 における津波堆積物 (Sugawara et al., in press に基づく)。

3. 2. 測線 A

同測線上の地形断面図を図 3a に示す。この測線上での津波の最大遡上距離は約 650m である。また、津波高さは、海岸付近で 9~11m 程度で、海岸から 400m の地点では 6.5m である (表 1, 図 3a)。

海岸線から 50m 内陸までは、草木が一樣に内陸側に折れ曲がっている。A1 地点の堆積物は、この内陸側に折れ曲がった草の上に堆積している (図 4)。同地点の津波堆積物の層厚は約 43cm で、上下 2 つのユニットからなる (図 3b)。下部 10cm は、淘汰の悪い塊状の明灰色粗粒砂からなる (図 3b)。砂粒子は主に珪酸塩鉱物や貝殻、サンゴ片からなり、ビーチや浅海域に堆積しているものとよく類似している。上部 33cm は、淘汰の悪い白色の粗粒～極粗粒砂からなり、弱い平行葉理が観察される (図 5)。

A2 地点の堆積物は層厚約 18cm で、暗茶色の土壌を明瞭な境界を持って覆っている。

表 1. バンサックビーチでの津波高 (m)。Goto et al. (in press) に基づく。

Latitude (N)	Longitude (E)	Height (m)	Distance from shoreline (m) ^c	Corrected tsunami height (m)
8°47.305'	98°15.733'	8.0 ^a	60	7.7
8°47.389'	98°15.736'	10.0 ^a	90	10.0
8°47.539'	98°15.722'	9.4 ^a	75	9.6
8°47.964'	98°15.583'	5.8 ^a	40	6.0
8°47.605'	98°15.680'	10.6 ^a	50	11.0
Transect A				
8°47.472'	98°15.696'	9.3 ^a	25	9.6
8°47.441'	98°15.744'	11.1 ^a	110	11.3
8°47.381'	98°15.899'	6.5 ^b	300	7.0
Transect B				
8°47.977'	98°15.662'	5.1 ^a	150	4.5
8°47.998'	98°15.811'	5.1 ^a	425	4.5

note: ^a Tsunami height measured on a tree. ^b Tsunami height measured on an electrical pole. ^c Tsunami arrival time assumed to be 10:00 a.m. December 26, 2004, in Thailand (<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/index-e.html>). Tidal corrections determined using tidal data at Ao Kaulak for Bang Sak beach (<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/namegaya/sumatera/tide/index.htm>).

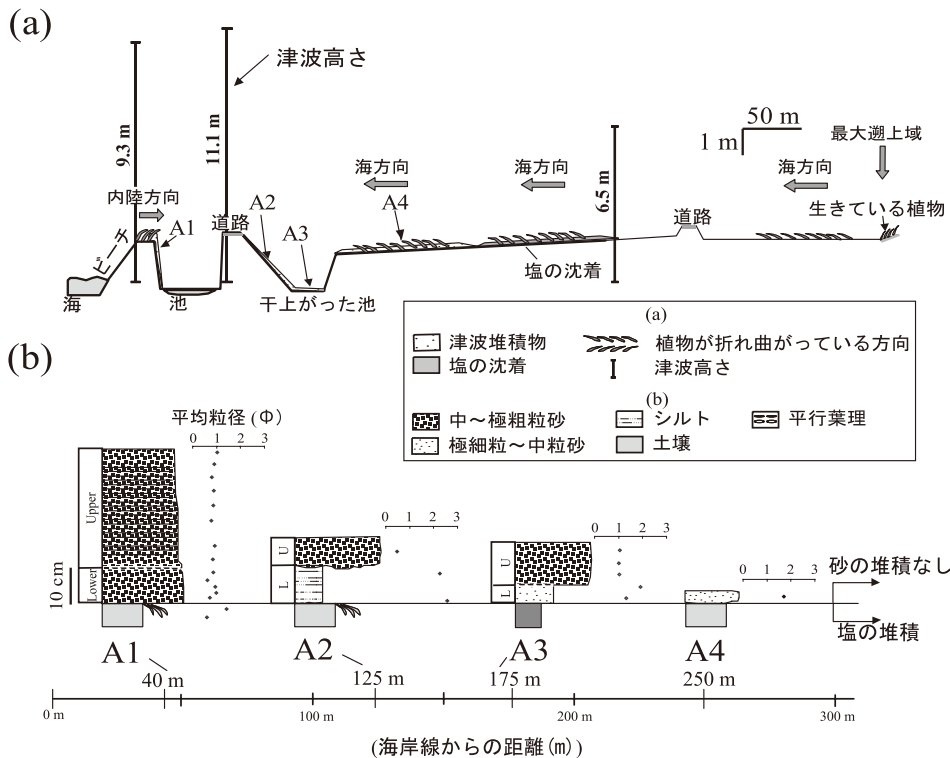


図 3. (a) 測線 A の地形断面図。(b) A1～A4 地点の津波堆積物の柱状図および平均粒径 (Φ)。Goto et al. (in press) に基づく。

堆積物は 2つのユニットからなり、下部 10cm は淘汰の良い暗灰色シルト～極細粒砂からなる。上部 8cm は、淘汰の悪い塊状の灰色極粗粒砂からなり、侵食面を持って下部

を覆っている。A3 地点の堆積物は層厚約 17cm で、暗灰色の土壌を明瞭な境界を持って覆っている。堆積物は 2つのユニットからなり、下部 6cm は塊状の明灰色細粒砂から

なる。上部 11cm は、下部を整合的に覆っており、塊状の灰色粗粒～極粗粒砂からなる。A4 サイトの堆積物の層厚は 3cm で、暗茶色の土壌を明瞭な境界を持って覆っている。堆積物は淘汰の良い塊状の白色中粒砂からなり、砂は珪酸塩鉱物、貝殻やサンゴの破片などから構成される。

津波によって運ばれた土砂は、海岸線から 300m 以上内陸では観察されなかった。海岸線から 300～400m の間では、土壌表面に塩が付着している様子が観察された (Goto et al., in press)。また、海岸線から 200～650m の間は、一様に海域方向に草木が押し倒されている様子が観察された。



図 4. A1 地点の津波堆積物。

3.3. 測線 B

同測線上の地形断面図を図 6a に示す。同測線上での津波の最大遡上距離は約 800m である。また、津波高さは約 5m である (表 1, 図 6a)。同測線上の地形は、海岸線から内陸側 400 m の地点までは平坦で、草木は一様に海側に向かって倒されていた (図 7)。

測線 B では、海岸付近で地盤が約 50 cm 侵食されている様子が観察される (図 6a)。B1 から B5 地点の津波堆積物は、いずれも暗茶色の土壌を侵食面を持って覆っている。B1 地点の堆積物の層厚は 10cm で、淘汰の悪い塊状の白色粗粒～極粗粒砂からなり、逆級化している様子が観察される (図 6b)。砂



図 5. A1 地点の津波堆積物の断面の拡大写真。

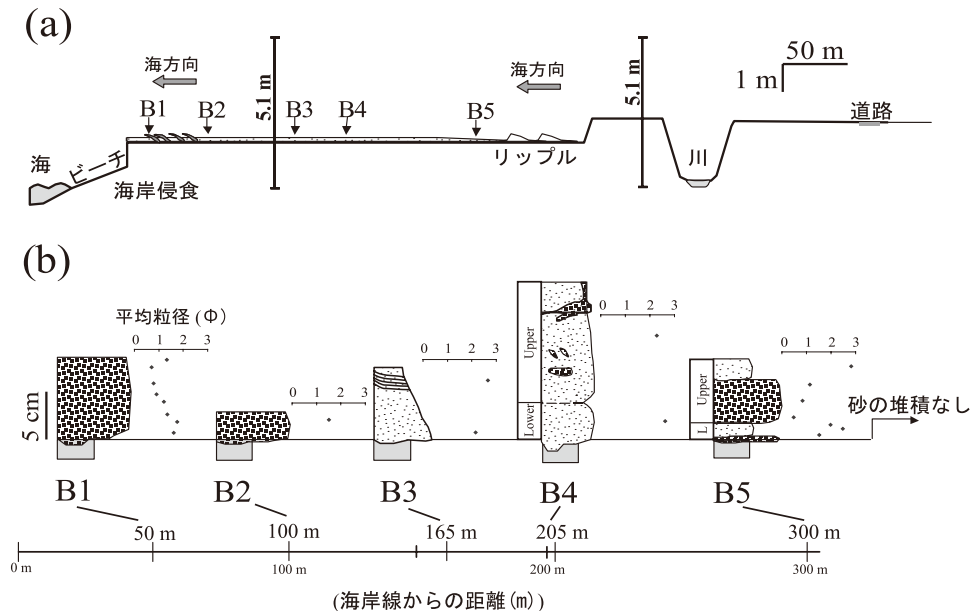


図 6. (a) 測線 B の地形断面図。(b) B1～B5 地点の津波堆積物の柱状図および平均粒径 (Φ)。Goto et al. (in press) に基づく。



図7. 測線Bの内陸から海に向かう方向に向かって撮影した写真。草木が一様に海側に向かって押し倒されている様子が観察される。

は、主に珪酸塩鉱物、貝殻やサンゴ片などから構成されている。B2地点の堆積物は層厚5cmで、淘汰の悪い塊状の白色粗粒～極粗粒砂からなり、B1地点と類似している。B3地点の堆積物は層厚約10cmで、中粒砂からシルトへと上方細粒化する。上部3～4cmには、海側方向に向かう流れの作用を示す斜交葉理が観察される。

B4地点の堆積物の層厚は17～22cmで、淘汰の良い塊状の明灰色細粒～中粒砂からなる(図8)。この砂層には、粗粒砂からなるレンズ状構造が観察される。この構造は、上面から見ると同心円状の構造を示し、急速な堆積に伴う脱水構造ではないかと推定される。B5地点の堆積物の層厚は12cmで、2つの上方細粒化ユニットからなる。下位は層厚3cmで、粗粒砂から極細粒砂へと上方細粒化する。上部は層厚9cmで、明瞭な境界を持って下位層を覆っており、極粗粒砂から極細粒砂へと上方細粒化する。

測線B上では、海岸線から300m以上内陸側では砂の堆積は観察されなかった。また、測線Aと同様に、海岸線から300～400mの地点では、地表面に塩が付着している様子が観察された。さらに、海岸線から350～400mの地点では、海側に向かう流れの作用を示すリップルが地表面上に観察された(Goto et al., in press)。

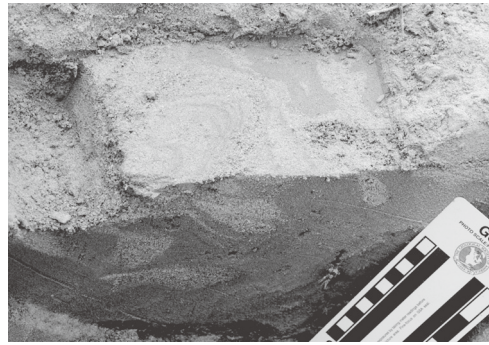


図8. B4地点の津波堆積物の拡大写真。

4. 議論

バンサックビーチで観察されたシート状の砂質津波堆積物は、主に珪酸塩鉱物や貝殻、サンゴ片などからなり、ビーチないし浅海域から運搬されたものと考えられる。津波堆積物は、全体的には内陸に向けて徐々に薄層化、細粒化する傾向にあるものの、局所的な地形の影響を受けて層厚や粒度、堆積構造が変化する(図3b, 6b)。また、堆積物は主に2層から構成されている場合が多く、2度の波によって形成された可能性が推定される。これは大きい波が2回押し寄せたという現地住民の証言と一致する。また、地点1では脱水構造が観察された(図2)。これは、津波の遡上に伴って運ばれた砂が下部の中～粗粒砂層として堆積した後、海水の滞留によって中部のシルト～極細粒砂層が沈積し、次の波が流入した際に運び込まれた砂の急速な堆積により、シルト～極細粒砂層が脱水を起こし、上部砂層に取り込まれたと考えられる(Sugawara et al., in press)。

A1地点を除いて、草木の倒れている方向やリップルの示す流れの方向は、すべて海側に向かう流れ、つまり引き波の作用があったことを示している。これは、土砂自体は海岸付近から押し波によって運搬されているものの、その堆積過程で引き波の影響を受けていることを意味する(Goto et al., in press)。A1地点では、引き波の影響が見られないが、同地点より内陸側の低地に池が2つ存在してお

り、引き波はこの池から排水されたために、A1 地点にはその影響が及ばなかった可能性が考えられる。

本調査地点では、津波は海岸線から約 650~800m 内陸まで浸水しているにもかかわらず、津波堆積物の分布は約 300m までの範囲に限られていた。上述のように、本調査地点に分布する津波堆積物は引き波の影響を受けていると考えられるものの、地形が平坦なことから、引き波によって粗粒~極粗粒砂からなる堆積物を大規模に再運搬・再堆積させたとは考えにくく、津波堆積物の分布は押し波による土砂運搬・堆積の結果を反映している可能性が高いと考えられる。津波による土砂の運搬距離は、地形、流速、運搬される粒子の沈降速度に依存していると考えられる。同地域の海岸周辺の粒子は中粒砂~極粗粒砂と粗く、細粒砂以下の粒子が少ない。そのため、粒子の沈降速度が流れに対して速く、津波の遡上途中で沈降してしまい、300m 以上内陸側に土砂が到達しなかった可能性が推定される。

同様の特徴は、他の津波イベントでも報告されている。例えば Shi et al. (1995) は、インドネシア・フローレス島パンタイ・ラトにおいて、1992 年フローレス津波による土砂堆積作用を調べ、浸水域は海岸線から 140m (最大波高約 3 m) だったのに対し、堆積物はその半分の約 70~80m 付近までしか分布していないことを報告している。堆積物の粒度が主に中粒~極粗粒砂と粗いことから (Shi et al., 1995)、バンサックビーチと同様に粒子の沈降速度が流れに対して速く、土砂が遠くまで運搬されなかった可能性が考えられる。一方、今村ら (1997) はバビ島において同津波による堆積作用を調べ、津波堆積物の分布と浸水域がほぼ一致していることを報告している。また、七山ら (2004) は、北海道臼別川セクションにおいて津波堆積物の分布末端部と津波の遡上限界を比較し、その差がごく僅かであることを指摘している。その理由として、堆積物の構成粒子がシルト~極細粒砂のように運搬されやすいものであった

ことや、地形的条件を挙げている (Nanayama et al., 2003; 七山ら, 2004)。このように、浸水域と津波堆積物の分布域は必ずしも一致するわけではなく、地形、流速、運搬される粒子の沈降速度、引き波の流れの強さなどによって多様に変化すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、インド洋大津波によって形成されたタイ・バンサックビーチの津波堆積物の特徴と分布を調べた。その結果、津波堆積物は全体的には内陸に向けて徐々に薄層化、細粒化する傾向にあるものの、局所的な地形の影響を受けて層厚や堆積構造が変化すること、津波の浸水域の半分程度の距離までしか土砂が堆積していないことが明らかになった。津波堆積物を用いて過去の津波の発生頻度を調べる研究手法は確立されつつあるが、過去の津波の規模を知る手段はほとんどない。その原因の一つとして、津波発生直後に津波高さや浸水域と堆積物の層厚や分布の両方を調べ、両者を比較した研究例が少なかったために、その関係が十分わかっていなかったことが挙げられる。2004 年インド洋大津波発生直後に多くの研究者が被災各国で調査を行っており、浸水域や津波高さとともに津波堆積物の層厚や分布傾向などが報告されており (例えば、Moore et al., 2006; Fujino et al., in press; Goto et al., in press)、両者の比較が可能になりつつある。現地調査から得られる情報に加えて、土砂移動に関する水理・数値実験を行うことで、今後浸水域と土砂運搬距離の関係を定量的に明らかにできるようになると考えられる。これによって、津波堆積物を用いて過去の津波の浸水域や高さの推定ができる可能性があり、防災上有用な情報になると期待される。

6. 謝辞

本調査では、S. Supharatid 氏 A.

Ruangrassamee 氏, W. Kanbua 氏, N. Chaimanee 氏, P. Foytong 氏, N. Saelem 氏, Y. Chidong 氏, S. Nawawitphisit 氏, および W. Buatong 氏に協力を頂いた。また, 粒度分析を行うにあたり, 京都大学大学院理学系研究科の成瀬元氏, 藤野滋弘氏には大変お世話になった。本調査は, 依田巽氏, 東海旅客鉄道株式会社 (JR 東海), サントリー株式会社, ワック株式会社からの研究助成金, および科学研究費補助金 (no. 17740331) を受けて行われた。以上の方々に謝意を表す。

7. 引用文献

- Atwater, B. F., Evidence for Great Holocene Earthquakes along the Outer Coast of Washington State, *Science*, v. 236, p. 942-944, 1987.
- Dawson, A. G., Long, D. and Smith, D. E., The Storegga Slides: Evidence from Eastern Scotland for a possible tsunami, *Marine Geology*, v. 82, p. 271-276, 1988.
- Fujino S., Naruse, H., Suphawajruksakul, A., Jarupongsakul, T., Murayama, M. and Ichihara, N., Thickness and grain size distribution of Indian Ocean tsunami deposits at Khao Lak and Phra Thong Island, southwestern Thailand. In *Developments in Sedimentology. Tsunamites - Their Features and Implications*, Elsevier, Berlin (in press).
- Goto, K., Imamura, F., Keerthi, N., Kunthasap, P., Matsui, T., Minoura, K., Ruangrassamee, A., Sugawara, D., Supharatid, S., Distributions and Significances of the 2004 Indian Ocean tsunami deposits -Initial results from Thailand and Sri Lanka-. In *Developments in Sedimentology. Tsunamites - Their Features and Implications*, Elsevier, Berlin (in press).
- 今村文彦・箕浦幸治・高橋智幸・首藤伸夫, 最近の津波による土砂移動に関する現地調査。津波工学研究報告, 第 14 巻, p. 89-100, 1997.
- Lowe, D. R., Water escape structures in coarse-grained sediments, *Sedimentology*, v. 22, p. 157-204, 1975.
- Minoura, K., Nakaya, S. and Sato, H., Traces of tsunamis recorded in lake deposits: An example from Jusan, Shiura-mura, Aomori, *Journal of Seismological. Society of Japan*, v. 40, p. 183-196, 1987.
- 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*, v. 58, p. 253-258, 2006.
- Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Atwater, B. F., Shigeno, K. and Yamaki, S., Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench, *Nature*, v. 424, p. 660-663, 2004.
- 七山太・重野聖之, 遡上津波堆積物概論 - 沿岸低地の津波堆積物に関する研究レビューから得られた堆積学的認定基準 -。地質学論集, 第 58 巻, p. 19-33, 2004。
- Shi, S., Dawson, A. G., and Smith, D. E., Coastal sedimentation associated with the December 12th, 1992 tsunami in Flores, Indonesia, *Pure and Applied Geophysics*, v. 144, p. 525-536, 1995.
- Sugawara, D., Minoura, K. and Imamura, F., Tsunamis and tsunami sedimentology. In *Developments in Sedimentology. Tsunamites - Their Features and Implications*, Elsevier, Berlin (in press).