

Banda Aceh と周辺における2004年インド洋津波と被害想定からみた課題

松富英夫* ・榊山 勉** ・Sindhu Nugroho****・都司嘉宜*****・谷岡勇市郎*****
西村裕一*****・鎌滝孝信*****・村上嘉謙***** ・松山昌史** ・栗塚一範*****

インドネシアの Banda Aceh と周辺における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、浸水深と流速（流体力）の関係も論じている。ハード面に限られているが、被害想定の見点からみた課題例を論じている。課題例の1つである漂流物を伴う氾濫流については、ドライ・ベッドにも適用可能な簡易モデルを提示し、漂流物を伴えば氾濫流速が増大する解を誘導している。Banda Aceh でビデオ撮影された実現象とその解の比較・検討を行い、モデルの有用性を確かめている。

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（松富ら, 2005）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（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、約1200~1500 km 離れたスリランカやインドを襲い、大被害を与えた。

本研究は、津波被災から約3週間後の2005年1月20~29日（正味）まで現地調査したインドネシアの Banda Aceh と周辺における津波の実態と被害想定の見点からみた課題を論じる。一部の課題については研究の方向を示す。

2. 現地調査

著者らは日本、インドネシア、米国とフランスからなる国際津波調査団（日本：7人、インドネシア：6人、米国：2人、フランス：2人）を組織し、2005年1月17~31日までの15日間、現地調査を行った。1月17~19日はジャカルタで被災地の情報収集などを行い、1月31日はジャカルタのインドネシア気象庁で調査結果の報告を行ったので、実質の調査期間は10日間である。

調査項目は、①地盤変動、②津波の来襲状況、③海岸と Banda Aceh 市内の主要道路沿いの津波高分布、④被

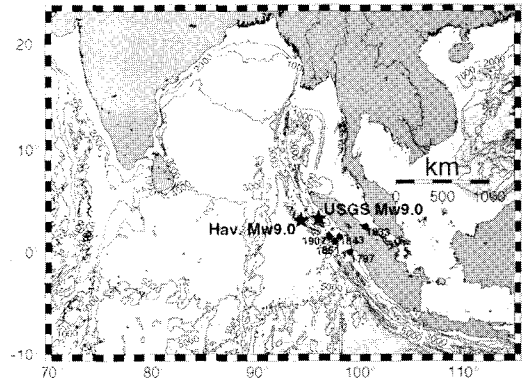


図-1 本地震(★)と既往地震(●)の震源、及び海底地形

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海岸・港湾・貯油施設などの被害状況である。

調査域を図-2と3（拡大図）に示す。Banda Aceh を起点に西岸の Lhoknga から東の Sigli までと Weh 島の南北岸の海岸域である。

3. Banda Aceh と周辺における津波とその被害

(1) 地盤変動

西岸の Lampuuk 海岸での地盤沈降量は1~2 m と推定された。地盤沈降例を写真-1に示す。Banda Aceh 市の Ulee Lheue 海岸(図-3中の★)とその西での地盤沈降量は0.2~0.6 m と推定され、Krueng Raya では地盤変動が認められなかった。これらの傾向は断層モデルから推定されたもの(松山, 2005)と整合する。

(2) 津波の来襲状況

Banda Aceh 市の Ulee Lheue 地区のモスクで得た証言によれば、津波は地震後15~20分で海岸に到達し、1波目と2波目の時間間隔は15~20分であった。また、1波目より2波目が大きかった。地震発生時刻は午前7時59分であり、津波の時間波形が三角関数的であったと仮定すれば、2波目のピーク到達時刻の最も早い場合と選

* 正会員 秋田大学工学資源学部土木環境工学科
** 正会員 (財)電力中央研究所流体科学領域
*** インドネシア気象庁
**** 東京大学地震研究所
***** 北海道大学大学院理学研究科
***** 産業技術総合研究所
***** 関西電力(株)土木建築室
***** 銭高組



写真-1 Lampuuk の地盤沈降 (Guy Gelfenbaum 博士提供)



写真-2 Banda Aceh 中心部の大モスク近くで発見した時計

い場合は次のように推定される。

早い場合：7時59分+15分+15分+15/4分 $\cong$ 8時33分

遅い場合：7時59分+20分+20分+20/4分 $\cong$ 8時44分

海岸から内陸へ約1.5 km のところに位置する Putri 家 (写真-5) で撮られた放送ビデオは8時50分23秒から始まっている (榊山ら, 2005)。このビデオは2波目の津波最盛期のものと考えられ、これらの証言は妥当なものだと判断される。

海岸から内陸へ約3 km のところで写真-2 に示す時計を発見した。8時12分を表示している。この表示が1波目によっても、時計の発見位置を考えると、計時が不正確であったと判断せざるを得ない。

2波目が1波目より大きかったことはタイ南部の Khao Lak などでの津波と同じである (松富ら, 2005)。

(3) 津波高分布

Banda Aceh と周辺における津波 (遡上) 高を図-2 と3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ある。

津波高の平均像は西岸で15~30 m, Banda Aceh 海岸で6~12 m, 油タンク3基が流された Krueng Raya で6 m 程度, Sigli で5 m 程度である。Weh 島の津波高は波源に直面した北岸で3~6 m, 反対側の南岸で3 m 程度である。

Banda Aceh 海岸の津波高は西岸の半分以下である。Banda Aceh 市の海岸でも Ulee Lheue 海岸から北東に約8 km 離れると12 m から6 m に半減する。これらの

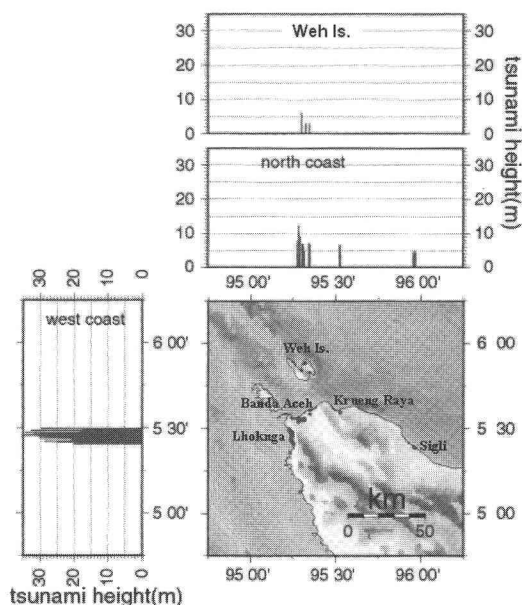


図-2 調査域と津波 (遡上) 高の分布

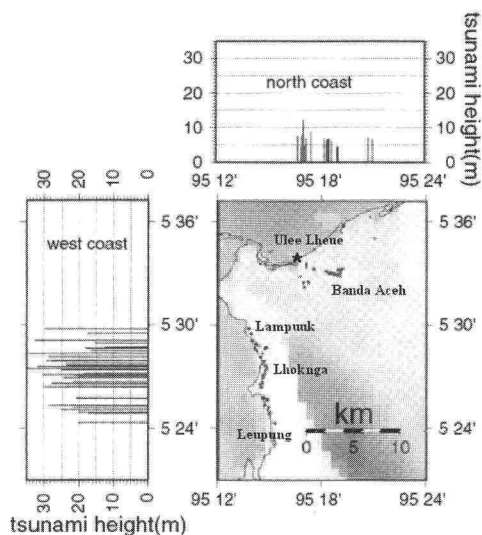
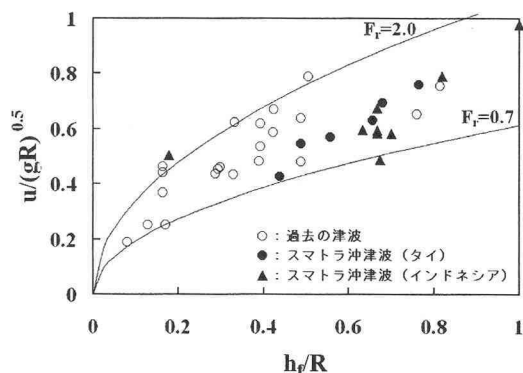


図-3 調査域と津波 (遡上) 高の分布 (拡大図)

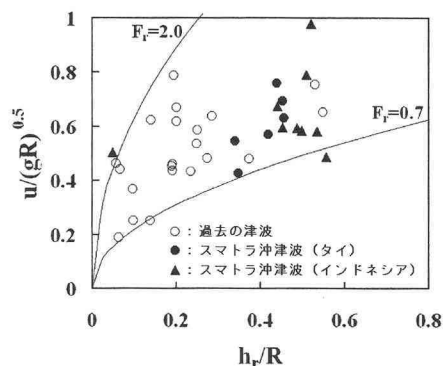
理由として Banda Aceh と Lhoknga 間の島嶼 (図-2) の存在が考えられる。

Banda Aceh では、津波は海岸から内陸に最大で4 km 程度氾濫した。Ulee Lheue 海岸から市中心部の大モスクにかけて津波高は12 m から5 m (浸水深は1.6 m, 写真-6) 程度に減少した。

本地震のアスペリティの場所などがよく判っていない (八木, 2005)。西岸の巨大津波とタイ南部の津波 (松富ら, 2005) が震源域特性や津波初期波形などの決定に大きく影響すると考えられる。



(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-4 浸水深と氾濫流速の関係

(4) 氾濫流速と流体力

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 u の関係を図-4に示す。図中の実線は次式である（松富・飯塚, 1998）。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = \sqrt{\frac{2C_v F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (1)$$

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

ここで、 g は重力加速度、 R は近傍の津波高、 C_v （ $=0.8 \sim 0.9$ ）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。

海岸からの距離による浸水深や氾濫流速などの変化例を写真-3～5に示す。建物の破壊程度の判定は松富・首藤（1994）の基準に基づいている。何れも Banda Aceh の低平地でのものである。距離、浸水深、氾濫流速と単位面積あたりの抗力 F （支配的な力）は各々順に（0.9 km, 4.9 m, 7.7 m/s, 6.2 tf/m²（ 6.1×10^4 Pa））、（1.3 km, 4.0 m, 5.2 m/s, 2.9 tf/m²（ 2.8×10^4 Pa））、（1.5 km, 3.9 m, 5.8 m/s, 3.5 tf/m²（ 3.4×10^4 Pa））であ



写真-3 中破家屋と津波痕跡 (Banda Aceh, 海岸から約 0.9 km 内陸)

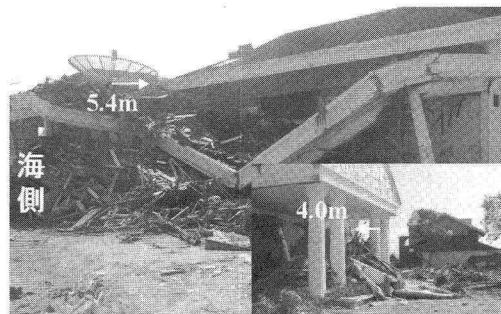


写真-4 中破家屋と津波痕跡 (Banda Aceh, 海岸から約 1.3 km 内陸)



写真-5 中破家屋と津波痕跡 (Banda Aceh, 海岸から約 1.5 km 内陸)

る。ただし、氾濫流速と抗力は次式から評価している。

$$u = \sqrt{2g(h_f - h_r)} \quad (3)$$

$$F = \rho C_D u^2 a / 2 \cong \rho q u \quad (4)$$

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。

4. 被害想定の方点からみた課題例

津波では初期波源と沿岸・陸上のものが大きな課題として残っている。波源での動的解析や初期波形の検知を除いた課題例（ハード面に限定）を以下に示す。

①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（松富ら, 2005）。

②建物の破壊基準と地盤浸食の影響（松富ら, 2005）。

③氾濫流速推定法の一般化（写真-3～5）。

④小山を利用した氾濫流速推定法（写真-7）。

⑤漂流物を伴った氾濫流の流速と破壊力の増大。

⑥植生の津波減勢効果。

③, ④, ⑤については次章以下で論じる。

⑥については, 植生域氾濫流基礎式や樹幹部相似則の誘導, 植生効果の報告・実験・現地資料の収集・整理などが行われているが, 樹冠部相似則など不明点が多い。

5. 漂流物を伴う氾濫流の一理論

本津波では大量の漂流物を伴った氾濫流が話題となった。松富 (1999) は漂流物問題では流木を取り上げ, その衝突力評価法の基本的な考え方などを示した。

本章は流木に関するこれまでの研究との関連で, 漂流物を伴った氾濫流の一評価理論を提示する。瓦礫などの漂流物を流体と見立てて, 段波理論を適用する簡易理論である。適用度は低いかもしれないが, 漂流物さえ存在すればドライ・ベッドにも適用でき, 漂流物を伴った氾濫流研究の一方をを示すものと考えている。

(1) 理 論

定常段波を考える。ただし, 段波下流域に瓦礫や油などを想定し, それらを任意の密度を持った均質な静止流体と見立てる。この簡易モデルを図-5 に示す。本図は段波下流域の仮想静止流体の密度が海水よりも小さい場合のものである。段波上流域での漂流物の鉛直分布次第で圧力分布が異なり, 氾濫流速や段波伝播速度は変化する。本モデルは, 漂流物は段波下流域での分布状態を維持したまま段波上流域に巻き込まれ, 空隙部に海水が入り込むという最も簡単なモデルである。

a) 連続式

本モデルの質量保存則は次式となる。

$$[\{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}h_0 + \rho(h_2 - h_0)] \times (\omega - u_2) = \{\rho_0 + (\rho_f - \rho_0)e\}h_0\omega \cdots \cdots (5)$$

ここで, ρ_0 は漂流物の密度, ρ_f は段波下流域の空隙部の密度 (空気の場合は零), e は段波下流域の漂流物の空隙率, h_2 は段波上流域の水深, u_2 は段波上流域の流速, h_0 は段波上・下流域の漂流物層の厚さ, u_0 は段波下流域の流速 (零を想定), ω は段波伝播速度である。

式 (5) 右辺の中括弧内の密度が仮想静止流体の平均密度である。式 (5) において $\rho_0 = \rho_f = \rho$ とすれば, 理想段波理論の質量保存則となる。

b) 運動方程式

静水圧を仮定したときの運動量保存則は次式となる。

$$[\{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}h_0 + \rho(h_2 - h_0)](\omega - u_2)u_2 = \rho g(h_2 - h_0)^2/2 + \{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}gh_2h_0 - \{2(1-e)\rho_0 + (\rho + \rho_f)e\}gh_0^2/2 \cdots \cdots (6)$$

式 (6) では段波下流域の静水圧を考慮している。油のような実流体ではよいが, 瓦礫や粉体などでは再考の余地がある。この静水圧を無視すれば, 氾濫流速や段波伝播速度は大きくなる。

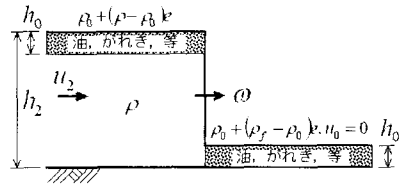


図-5 漂流物を伴う氾濫流の簡易モデル

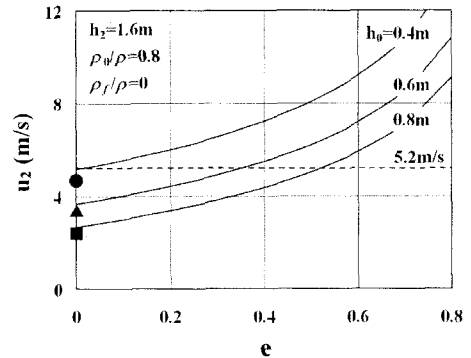


図-6 漂流物の移動速度 (≡氾濫流速) 例

式 (6) において $\rho_0 = \rho_f = \rho$ とすれば, 理想段波理論の運動量保存則となる。

c) 氾濫流速と段波伝播速度

式 (5) と (6) から, 氾濫流速 u_2 と段波伝播速度 ω として各々次式を得る。

$$u_2 = \frac{(\rho/\rho_0 - \rho_f/\rho_0)e + \rho(h_2/h_0 - 1)/\rho_0}{\{1 + (\rho/\rho_0 - 1)e\} + \rho(h_2/h_0 - 1)/\rho_0} \omega \cdots \cdots (7)$$

$$\omega^2 = \frac{g[\{\rho_0/\rho + (1 - \rho_0/\rho)e\}h_0 + h_2 - h_0]}{\{1 + (\rho/\rho_0 - 1)e\}\{(1 - \rho_f/\rho)e + h_2/h_0 - 1\}} \left[\frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right)^2 + \left\{ 1 + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \frac{h_2}{h_0} - \frac{1}{2} \left\{ 2(1-e) + \left(\frac{\rho}{\rho_0} + \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) e \right\} \right] \cdots \cdots (8)$$

本理論ではドライ・ベッドの流れであっても, 氾濫流速と氾濫の伝播速度が異なったものとなる。

(2) 計算例

定常状態での漂流物の移動速度は氾濫流速 u_2 と同じと考えてよい。本理論における u_2 の計算例を図-6 に示す。計算条件は Banda Aceh 中心部の大モスク前で撮られたビデオ (写真-6) とビデオ中の建物の長さや高さなどの現地測量結果から決めている。図中の破線はビデオの解析から得られた漂流物の移動速度 (≒5.2 m/s) で (榊山ら, 2005), このときの氾濫流はフルード数 $Fr \approx 1.3$ の射流である。丸 (●), 三角 (▲), 四角 (■) は理想段波理論に基づく計算値で, 順に $h_0 = 0.4$ m, 0.6 m, 0.8 m の場合のものである。図から, 本理論では漂流物を伴うと氾濫流速が大きくなることが判る。段波伝播速



写真-6 漂流物を伴った氾濫流 (Banda Aceh 中心部の大モスク前)

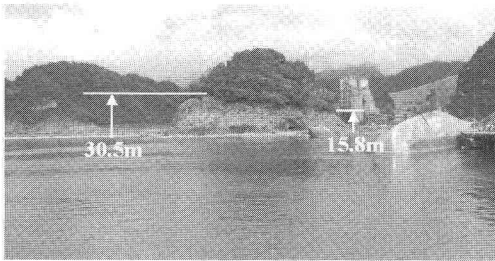


写真-7 セメント工場前の小山の津波痕跡 (Lhoknga)

度も基本的に大きくなるが、全ての条件で大きくなるわけではない。例えば、本計算条件では $h_0 \geq 0.8$ m になると、理想段波の理論値の方が大きくなる。また、本理論では漂流物の密度が小さく、空隙率が大きく、空隙部の密度が小さくなるにつれて、段波伝播速度は大きくなる。

図-6によると、 $h_2 = 1.6$ m, $\rho_0/\rho = 0.8$, $\rho_f/\rho = 0$ とした場合、 $h_0 = 0.4$ m では漂流物の移動速度 5.2 m/s の説明ができない。換言して、破線との交点がない。 $h_0 = 0.6$ m では $e = 0.35$, $h_0 = 0.8$ m では $e = 0.52$ であれば説明が可能である。漂流物の密度 ρ_0 を測定しておらず、本事例に関してはこれ以上の議論はできない。しかし、ビデオから判断すると、 h_0 は 0.4 m 以上あるようで、本理論は有用と考えられる。今後、実験値との比較を行うなど、本理論の適用性の検討が必要である。

6. 氾濫流速推定法の一般化

松富 (1993) の氾濫流速推定法でより正確な氾濫流速、ひいては流体力を推定するには、建物の大きさや形状、流向を考慮する必要がある。これまでも (松富ら, 1996), また本津波でもこれらの資料は収集しており、次式のような一般化は可能になりつつある。

$$u = C_v \sqrt{2g(h_f - h_r)} f(x, y, z) \quad (9)$$

ここで、 x と y は各々建物の大きさや形状に関する変数、 z は流向に関する変数である。

西岸の Lhoknga で写真-7 に示すような小山の津波痕跡を複数発見した。このような痕跡は、大津波時の氾濫流速推定に有用である。小山は一般に概略で円錐であり

(本小山は衛星写真からはほぼ三角錐であることを確認)、前面浸水深に遡上効果などが含まれるため、別途に氾濫流速推定法を検討する必要がある。

7. おわりに

本調査研究で得られた主な結論は次の通りである。

① 西岸で $1 \sim 2$ m 程度、Banda Aceh 市の Ulee Lheue 海岸とその西で $0.2 \sim 0.6$ m 程度の地盤沈降が認められた。

② 津波高の平均像は西岸で $15 \sim 30$ m, Banda Aceh で $6 \sim 12$ m, Krueng Raya で 6 m 程度、Sigli で 5 m 程度、Weh 島で $3 \sim 6$ m 程度である。

③ Banda Aceh では海岸から約 0.9 km 内陸で流速と流体力が各々 7.7 m/s と 6.2 tf/m² 程度、約 1.5 km 内陸で 5.8 m/s と 3.5 tf/m² 程度であった。Lhoknga のセメント工場前では 16 m/s と 27 tf/m² (2.6×10^5 Pa) 程度、Sigli では 3.6 m/s と 1.3 tf/m² (1.3×10^4 Pa) 程度であった。

④ 被害想定視点からみた課題例を示し、漂流物を伴う氾濫流についてはドライ・ベッドにも適用可能な理論を示した。Banda Aceh でビデオ撮影された氾濫流に本理論を適用し、氾濫流速の説明が可能であることを確かめた。謝辞：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。記して謝意を表する。

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.
- 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・今村文彦・高橋智幸・倉吉一盛・小舟浩治・G. Watson・H. Rahman・首藤伸夫 (1996)：1996年イリアンジャヤ地震津波とその被害，海岸工学論文集，第43巻，pp. 311-315.
- 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 (1999)：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No.621/ II-47, pp. 111-127.
- 松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・Seree Supartid・Sittichai Naksuksakul (2005)：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，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1356-1360.
- 松山昌史 (2005)：タイ国津波被災調査，電力中央研究所内発表資料。
- 八木勇治 (2005)：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？，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. 1-5.
- Abe K. (2005)：Revised M_0 and run-up estimate for the Indian Ocean Tsunami, 2005年1月27日 tsunami-japan への投稿資料。