

2004年インド洋津波における Banda Aceh 周辺の橋梁に作用した 津波波力の再評価

Reevaluation of Tsunami Force Acted on the Bridges of the Neighborhood of Banda Aceh in the 2004 Indian Ocean Tsunami

鳴原良典¹・藤間功司²・幸左賢二³

Yoshinori SHIGIHARA, Koji FUJIMA and Kenji KOSA

It had been reported that many bridges in Sumatra island were suffered serious damages due to the 2004 Indian Ocean Tsunami event. We conducted the propagation and runup simulation of tsunami to clarify the external force acted on the bridges of the neighborhood of Banda Aceh. Numerical results showed that the horizontal tsunami force at Cut River Bridge and Lueng Ie Bridge were much larger than that of Kr. Ritting Bridge. A Safety Factor (S.F.), which could predict whether the girder slide occurred or not, was evaluated for the three bridges. The S.F. value was able to identify a clear difference in correspondence with the damage situation of each bridge. A present method is very simple, but it is applicable for the tsunami damage prediction of a bridge.

1. はじめに

2004年インド洋津波では、沿岸に位置する橋梁が桁流出や桁移動により使用不能となった(幸左ら, 2010)。著者らはこれまで、スマトラ島北西海岸を対象とした津波遡上計算を行い、津波により橋桁が上流側へ移動した Lueng Ie 橋と、欄干のみが損傷し桁自体は無被害であった Kr. Ritting 橋について、桁重量と津波波力から算出される桁移動の安全率の比較から両者の被災程度が異なった要因を明らかにした(鳴原ら, 2009)。しかしながら、数値計算における沿岸での津波遡上の再現精度に課題が残っていることや、桁が流出したような被災程度の大きい橋梁については検討しておらず、提案した安全率の妥当性には疑問が残っている。

そこで本研究では、前報(鳴原ら, 2009)で対象とした上記2橋梁に加え、桁が完全に流出した Cut 川橋を対象に津波遡上計算を行い、橋桁に作用する津波波力と桁移動の安全率について再評価を行った。

2. 解析条件

(1) 解析対象橋梁

本研究では、スマトラ島北西沿岸の河川に架かる橋梁の中から、Cut 川橋 ($5^{\circ}36'7.7''\text{N}$, $95^{\circ}20'55.4''\text{E}$)、Kr. Ritting 橋 ($5^{\circ}25'29''\text{N}$, $95^{\circ}14'35''\text{E}$)、そして Lueng Ie 橋

($5^{\circ}15'04''\text{N}$, $95^{\circ}15'11''\text{E}$) を解析対象とした(各橋梁の位置は図-2参照)。Kr. Ritting 橋と Lueng Ie 橋の解析については前報で既に検討しているが、以下の章で示すように、本研究で決定した修正波源モデルを用いて桁に作用した津波波力を再評価する。一方、Cut 川橋は Banda Aceh 市街地から北東に位置し、橋長304.5m、幅員2.8m、構造高1.7mの10径間PC桁である(図-3)。橋は河口から約200mに位置し、橋梁周辺の地形は2~3m程度の低平地である。ここでは津波により全ての桁が流出して橋脚付近に落下するとともに、U字型の橋脚柱頭部の片側部材がせん断破壊していた。さらに、桁の一部は河川堤防右岸側を越え、図-3に示した位置に打ち上げられていた。このように、Cut 川橋では他の2橋に比べ大きな被害を受けていた。

(2) 地形データおよび数値計算条件

津波遡上計算は、波源域から沿岸に近づくにつれて空間格子を細分化するネスティング計算を行った。数値計算に使用した支配方程式や差分スキーム、および計算方法の詳細は前報と同様である。各計算領域と領域接続の位置関係を図-1, 2, 3に示す。ここで図-3中の領域R5-1の地形データについて、Cut 川橋付近の1km四方の領域は現地測量から得られた水深・地盤高データに基づいており、さらにその周辺はSRTM, 海図, Google Earth等から得られたデジタルデータを組み合わせることにより作成した。

3. 波源モデルの決定

橋梁に作用する津波波力を評価するためには、各橋梁位置で来襲する津波が精度良く再現されている必要があ

1 正会員 博(工) 防衛大学校助教システム工学群建設環境工学科
2 正会員 工博 防衛大学校教授システム工学群建設環境工学科
3 正会員 Ph.D. 九州工業大学教授工学部建設社会工学科

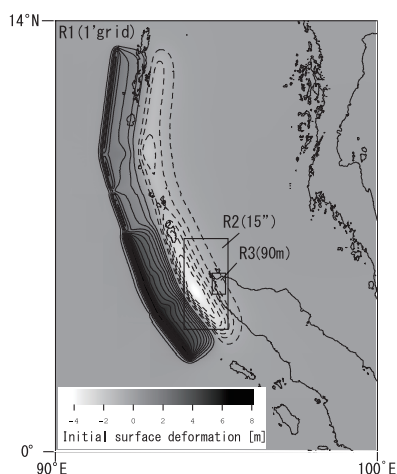


図-1 計算領域 (1次～3次領域) と初期水位分布

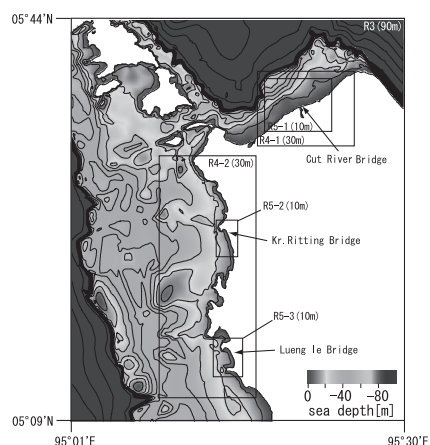


図-2 計算領域 (3次～5次領域) と橋梁の位置

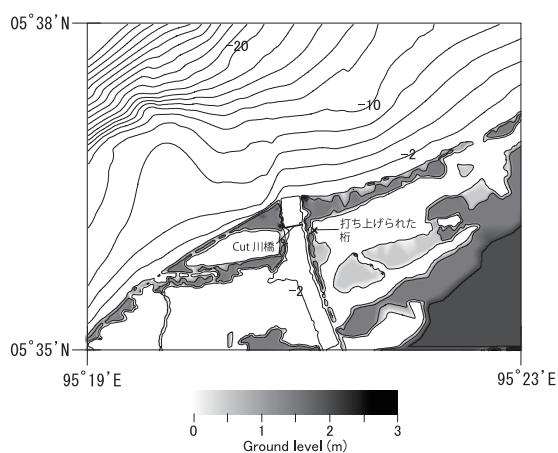


図-3 領域R5-1 (Cut川付近) の地盤高と水深分布

表-1 橋梁付近での浸水高の測定値と計算値の比較

地点名 (IUGGより)	ID-714	ID-695	ID-760
測定浸水高	7.1	20.5	9.5
Koshimura (2009) モデルの計算値	6.6	13.3	7.2
修正波源モデルの計算値	7.5	16.0	9.5

表-2 修正波源モデルの滑り量

Segment n	1	2	3	4	5	6
Dislocation (m)	18	16.6	15.1	7	7	7

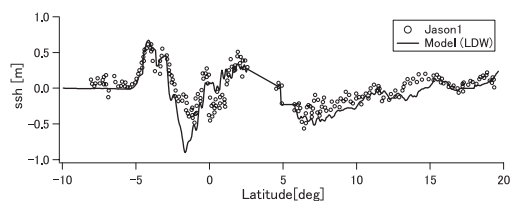


図-4 海面高度計データと線形分散波計算 (修正波源モデル) の比較

る。そこで、スマトラ島北西沿岸の津波高を再現するための適当な波源モデルを決定する。インド洋津波の波源モデルに関する研究は数多くあるが (例えば Hirata, 2006), 本研究では Banda Aceh 市街地の津波高と浸水域に良い整合性を得ている Koshimura ら (2009) が提案する波源モデル (Koshimura, 2009 モデル) を検討した。同モデルは図-1 に示すように、断層の破壊開始点であるスマトラ島沖から北方向に6枚のセグメントから構成される。本研究で解析対象となる3橋梁はスマトラ島北西部に位置し、主に南側のセグメントから放出される津波エネルギーの影響が大きいと考えられる。そこで、検討パラメータとして南側3枚のセグメントのすべり量を最大4mまで変化させ、計27通りの断層モデルについて津波遡上計算を行った。比較する測定値はIUGG (2010-03-10 参照) の現地調査による津波浸水高 (以下、浸水高) であり、各橋梁の近傍に位置している。

表-1 が浸水高の測定値と計算値の比較であり、表中の

記号 ID-714, ID-695, ID-760 はそれぞれ Cut 川橋, Kr. Ritting 橋, Lueng le 橋の近傍の測定地点に対応している。計算結果として Koshimura (2009) モデルの計算値と、27通りの結果のうち、3地点から評価した RMS 誤差が最も小さかったケースを「修正波源モデルの計算値」として示している。この表から明らかなように、本研究の修正波源モデルは Koshimura (2009) モデルに比べ各点において測定浸水高に近い値を示している。以上により決定された修正波源モデルの滑り量を表-2 に示す。その他のパラメータは Koshimura (2009) モデルと同様であり、地震モーメントマグニチュードは M_w 9.11 となる。

修正波源モデルの妥当性を確認するため、修正波源モデルを初期条件として線形分散波計算により外洋伝播計算を行い、海面高度計データ (Jason-1) と比較した結果

を図-4に示す。設定空間格子は1分（約1.8km）である。図より、南緯2度付近の引き波の部分に精度の問題はあるものの、全体的な水位分布としては良好に再現できている。なお、鳴原・藤間（2006）は波源付近のスマトラ島沿岸では分散効果の影響は十分に小さいことを明らかにしている。したがって、以下の議論において津波遡上計算は非分散の浅水理論を支配方程式として行った。

4. 計算結果

(1) Cut川橋での津波来襲状況

計算結果として、Cut川橋位置での水位と流速の時系列を図-5に示す。第1波目は約41分後に到達し、最高水位は約7m、最大流速は5m/s以上に達する。津波が橋梁に作用した状況を調べるため、Cut川周辺の津波遡上の流況を示したのが図-6である。図中には流速ベクトルとともにCut川橋（実線）と打ち上げられた桁（×印）の位置が示してある。図-6(a)（38分30秒後）は津波が沿岸に到達する瞬間であり、津波は海岸線に対してほぼ平行に來襲していることがわかる。その後、Cut川河口から浸入した津波は河川内を遡ってゆく。そして42分20秒後に、橋梁位置での津波水位は橋梁床板の下縁（桁下高2.4m）に接触する高さに達し、津波は橋桁の前面に作用することになる（図-6(b)）。一方、左岸側からは陸上地形の影響で屈折した南東向きの津波成分が到達しており、そして49分後には、河川内の流況も南東向きに変化する（図-6(c)）。その際、橋梁位置における流れの向きとしては桁が打ち上げられた方向であることがわかる。

以上により、Cut川橋には河川を遡上する津波成分が橋長直角方向に直接作用したと考えられるが、左岸側から屈折してきた流れも大きく影響しており、これらが一部の桁の堤防外への打ち上げを生じさせた一因であった可能性がある。

(2) Kr. Ritting橋、Lueng Ie橋での津波水深と流速

修正波源モデルを初期条件としてKr. Ritting橋、Lueng Ie橋での津波水深と流速の再評価を行った。両地点での陸上浸水深と流速の時系列を図-7、8に示す。Lueng Ie橋では前報に比べて津波水深が約2m、流速が平均1m/s大きくなることが確認できた。一方、Kr. Ritting橋では流速が平均して1m/s程度であり、大きな違いは見られなかった。同地点では橋梁から海岸線側の岩山による津波の遮蔽効果と橋梁背後の急勾配な地形による重複波の形成により流速が弱められることが指摘されていることから（鳴原ら，2009），この地点では津波高が大きくなったとしても地形効果の影響により流速はそれほど大きくならないと考えられる。

(3) 橋桁に作用する津波波力

津波遡上計算で得られた津波の通過波水深・流速を用

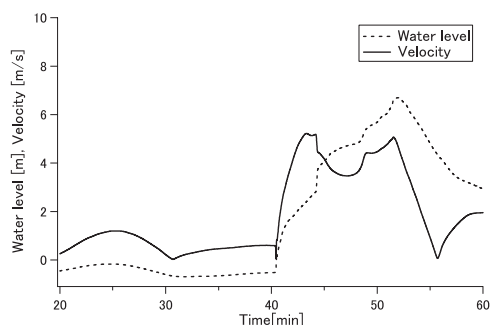


図-5 Cut川橋位置での津波水位と流速の時系列

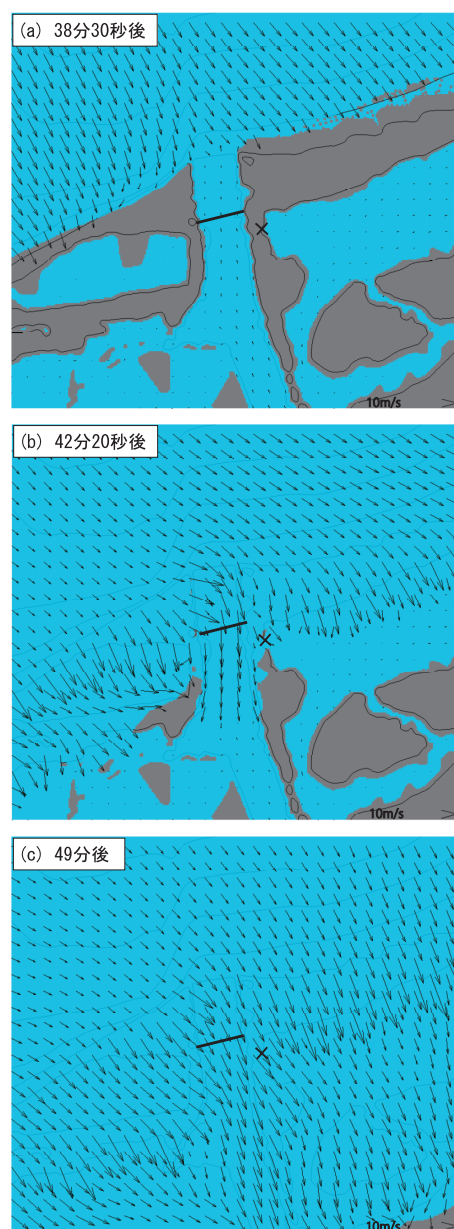


図-6 Cut川橋での津波遡上（矢印は流速ベクトル）

い、橋桁に作用する津波波力（水平波力）を評価する。津波波力 F_x は抗力と慣性力の和として以下のモリソン式の形で表わされる。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_w C_d A q^2 + C_m \rho_w A B \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 q は流速（m/s）、 ρ_w は海水の密度（ $=1,030\text{kg/m}^3$ ）、 A は水中で占める桁前面の投影面積（ m^2 ）、 B は幅員（m）、 C_d は抗力係数、 C_m は質量係数（ $=1.0$ ）、である。抗力係数については幸左ら（2010）がスマトラ島での被害橋梁の抗力係数分布について検討しており、本研究ではその結果に基づき、PC桁とRC桁の平均値として $C_d=1.5$ とした。

各橋梁に作用する単位幅当たりの津波波力（ F_x/B ）の時系列を図-9に示す。3橋梁のうち津波波力の最大値としてはLueng Ie橋が最も大きく約40kN/mであるが、その作用時間は短く、平均的に作用する力としては20kN/m程度である。次にCut川橋では、平均的に見るとLueng Ie橋とほぼ同等の大きさである。ただし、津波の衝突後は35kN/mの力が約1分間継続しており、橋梁に到達後の数分間の力積としては後者の方が大きい。一方でKr. Ritting橋の津波波力の大きさは2.5kN/mほどであり、他の2橋梁に比べて小さい。Cut川橋とLueng Ie橋での流速は4～5m/sであるが、Kr. Ritting橋では1m/sであるため、流速の違いが波力に大きく影響しているものと考えられる。

なお、橋梁に作用する抗力と慣性力について比較すると、前者は後者の数十～数百倍の大きさであり、3橋梁全てにおいて抗力が卓越していた。この理由として、橋梁は中空構造物であるため、加速度の大きい津波先端部は桁前面に接触せずに桁下を通過したことが考えられる。ただし、津波の高さや先端の形状（碎波形態）、橋梁の桁下高の関係によっては津波先端部が桁前面に直接作用する場合もあるため、慣性力が無視できない場合もあると思われる。

(4) 桁移動の安全率の評価

橋桁が津波等の流体力により移動するか否かを判定するための指標として、桁移動の安全率（Safety Factor, S.F.）が嶋原ら（2009）により提案されている。ここでは、これまでに議論した被災程度が異なる3橋梁についてS.F.値を算出し、これらの値と橋梁の被災程度との対応性について検討する。

桁移動の安全率は、前節で評価した橋梁に作用する津波の水平波力 F_x と、桁重量による抵抗力との比として以下の式で定義される。

$$S.F. = \frac{\mu(\rho V g - \rho_w V' g - F_z)}{F_x} \dots\dots\dots (2)$$

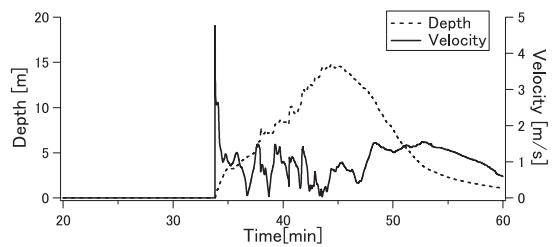


図-7 Kr. Ritting橋位置での津波浸水深と流速の時系列

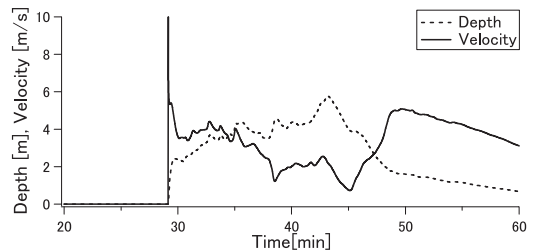


図-8 Lueng Ie橋位置での津波浸水深と流速の時系列

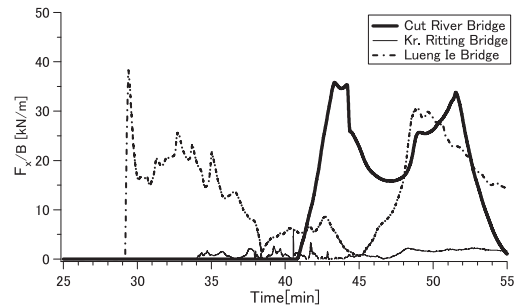


図-9 各橋梁に作用する単位幅当たりの津波波力

ここで、 ρ は鉄筋コンクリートの密度（ $=2,500\text{kg/m}^3$ ）、 g は重力加速度（ $=9.8\text{m/s}^2$ ）、 μ は鉄筋コンクリートの摩擦係数、 V は桁の体積（ m^3 ）、 V' は水中で占める桁の体積（ m^3 ）、 F_z は桁に作用する上揚力（N）である。式（2）による評価からS.F.値が1未満であれば、津波波力が桁重量による摩擦力を上回り、桁が水平方向に移動することを意味する。橋台と橋桁間での摩擦係数については、幸左ら（2010）により検討された値である $\mu=0.6$ を用いた。上揚力 F_z については、実際には津波の形状や桁の形状が影響するため複雑な評価を必要とするが、庄司ら（2009）は水理実験結果から橋桁に作用する上揚力 F_z と水平力 F_x の大きさは同程度となる場合があることを指摘していることから、ここでは簡単に $F_z=F_x$ とした。

図-10に、各橋梁の桁移動に対するS.F.値の時系列を示す。桁移動の被害が生じなかったKr. Ritting橋はS.F.値が10～100以上であり、桁に作用する津波波力に対して抵抗力が十分に大きい。次に、桁が水平移動したLueng Ie橋は最初の波力の作用によりS.F.値が1まで減少するが、

その後は2付近を推移し、津波波力と抵抗力はほぼ同じオーダーである。また、桁流出したCut川橋では波力が作用した後0.01まで減少し、常時1未満である。なお、本検討では上揚力を $F_z = F_x$ と仮定しているが、これは危険側の評価である。仮に安全側として $F_z = 0$ とするとS.F.値は常に0.6大きく評価されるが、Lueng Ie橋とKr. Ritting橋は大きな違いにはならない。一方でS.F.値が小さいCut川橋では大きな違いとなるものの、その場合でも $S.F. < 1$ となることから、上揚力の大きさに関係なく、提案するS.F.値は橋梁の被災有無の判断として工学的に有用であるといえる。次に、Lueng Ie橋とCut川橋の津波波力 F_x は同程度ながらS.F.値は大きな差になっているが、これは図-11に示す両者の断面形状の違いで説明できる。Cut川橋は歩道橋であり幅員が2.8mとLueng Ie橋に比べて短い。そのため、単位長さ当たりの重量も51.9kN/mとLueng Ie橋 (143.1kN/m) の1/3程度である。これに対し、津波作用力の支配的要因である構造高は1.7mと同じであるため、Cut川橋はLueng Ie橋に比べて桁が移動しやすい形状であったといえる。

以上の結果から、各橋梁のS.F.値の大きさにはその被災程度に対応して明確な差が見られることが確認できた。橋梁位置での津波水位と流速を数値計算で求めることができれば、本研究で提案する安全率に基づいて橋梁の津波被害程度を簡易的に予測することが可能になる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) スマトラ島北西沿岸の津波高を再現するための適当な波源モデルを決定するため、Koshimuraら (2009) の波源モデルのすべり量について津波遡上計算によるパラメータスタディを実施し、上記を説明する修正波源モデルを得ることができた。
- (2) スマトラ島沿岸の数値計算から、Banda Aceh郊外のCut川橋での津波の来襲状況を明らかにした。Cut川橋には河川を遡上する津波成分が橋長直角方向に直接作用したと考えられるが、左岸側から屈折してきた流れも大きく影響しており、これらが一部の桁の堤防外への打ち上げを生じさせた一因であった可能性がある。
- (3) モリソン式により橋桁に作用する津波波力を評価した。Cut川橋とLueng Ie橋の単位幅当たりの津波波力は平均的に見ればほぼ同等の大きさであったが、Kr. Ritting橋は地形効果により流速が小さくなるため他の2橋梁に比べて小さい。
- (4) 3橋梁の桁移動の安全率 (S.F.値) を算出し、橋梁の被災程度との対応性について調べることで、S.F.値の

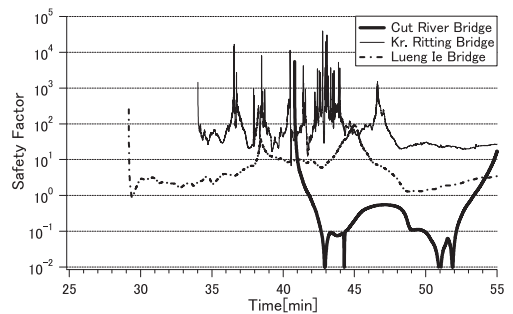


図-10 各橋梁に対するS.F.値の時系列

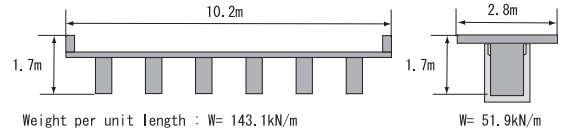


図-11 Lueng Ie橋 (左) とCut川橋 (右) の断面形状の違い

大きさに明確な差が確認できた。橋梁位置での津波水位と流速を数値計算で求めることができれば、安全率に基づいて橋梁の津波被害程度を簡易的に予測することが可能になる。

謝辞: 本研究を行うに際し、研究の一部は「国土交通省道路局、道路政策の技術研究開発」(代表: 幸左賢二) より行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 幸左賢二・二井伸一・庄司 学・宮原健太 (2010): スマトラ地震に伴う津波による橋梁の被害分析, 構造工学論文集, Vol.56A, pp. 454-463.
- 鳴原良典・藤間功司 (2006): インド洋津波における波数分散効果について, 海工論文集, 第53巻, pp. 266-270.
- 鳴原良典・藤間功司・幸左賢二・廣岡明彦・二井伸一・庄司 学・宮島昌克・小野祐輔 (2009): 2004年インド洋津波におけるスマトラ島北西沿岸の被害橋梁に関する数値計算, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No.1, pp. 311-315.
- 庄司 学・森山哲雄・藤間功司・鳴原良典・笠原健治 (2009): 単径間橋梁に作用する碎波津波の荷重に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.55A, pp. 460-470.
- Hirata, K., K., Satake, Y., Tanioka, T., Kuragano, Y., Hasegawa, Y., Hayashi and N., Hamada (2006): The 2004 Indian Ocean Tsunami: Tsunami source model from satellite altimetry, Earth Planets Space, 58, pp. 195-201.
- IUGG Tsunami Commission: Tsunami measurement data compiled by IUGG Tsunami Commission, <http://www.nda.ac.jp/cc/users/fujima/TMD/>, 参照 2010-03-10.
- Koshimura, S., T., Oie, H., Yanagisawa and F. Imamura (2009): Developing Fragility Functions for Tsunami Damage Estimation Using Numerical Model and Post-Tsunami Data From Banda Aceh, Indonesia, CEJ, Vol. 51, No. 3 pp. 243-273.