

2004 年インド洋大津波が示した現在の津波警報システムの問題点

Problem of Present Tsunami Warning System indicated by the 2004 Indian Ocean Tsunami

高橋智幸¹・小沼知弘²

Tomoyuki TAKAHASHI and Tomohiro KONUMA

In the 2004 Indian Ocean Tsunami, many people who don't know tsunamis were killed by the tsunami. It showed that disaster information is important to mitigate damage caused by tsunamis. To provide appropriate disaster information for the administrators and residents, a tsunami warning system is necessary. A reliability of the system depends largely on its capacity for detecting tsunamis. The present tsunami warning systems use observed seismic waves to detect tsunami source. Then, the present system has risk of underestimating tsunamis due to the great earthquakes of magnitude 9 class right after the main shocks. In this study, we show what tsunami disaster information would be provided, if the present tsunami warning system had been established in the Indian Ocean before 2004.

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日 0:58 (UTC), インドネシアのスマトラ島北部の西方沖でマグニチュード 9.1 (USGS, 2007-6-20 参照) の地震が発生した (図-1)。この地震により引き起こされた巨大な津波はインド洋の沿岸諸国に未曾有の被害を与えた。これらの被害は、堤防などのハードウェアが整備されてない地域が多かったことが原因しているが、防災教育や防災情報といったソフトウェアによる防災の立ち後れも大きく影響していたと考えられる。例えば、タイのプーケット島では多くの人が地震動を感じていたが、津波に関する知識を有していなかったため、得られた情報が津波への備えには繋がらずに被害が拡大している。このように津波に関する情報を持たない人々が多く犠牲となっており、津波防災・減災における防災情報の重要性が改めて示された災害となった。インド洋沿岸諸国では、経済的条件また観光資源の観点から、ハードウェアの整備が一部の地域に限られる現状を踏まえると、ソフトウェアによる防災は今後より重要になってくると考えられる。

津波防災におけるソフトウェア対策の中心となるのは避難であるが、そのためには適切な防災情報が必要となる。現在、津波に関する防災情報は津波警報システムにより提供されており、太平洋においては日本の気象庁や米国の太平洋津波警報センター (以下, PTWC) などのシステムが既に稼働している。しかし、東海・南海・南海地震の同時発生のような超巨大地震に対するその信頼性の検討は十分には行われていない。また、甚大な津波被害を受けたインド洋にも現在の津波警報システ

ムを導入する計画が国連を中心に進んでいる。そこで、本研究では、2004 年インド洋大津波を対象として、現在の津波警報システムの適用能力を調べるとともに、今後の改善のための問題点を抽出することを目的とした。

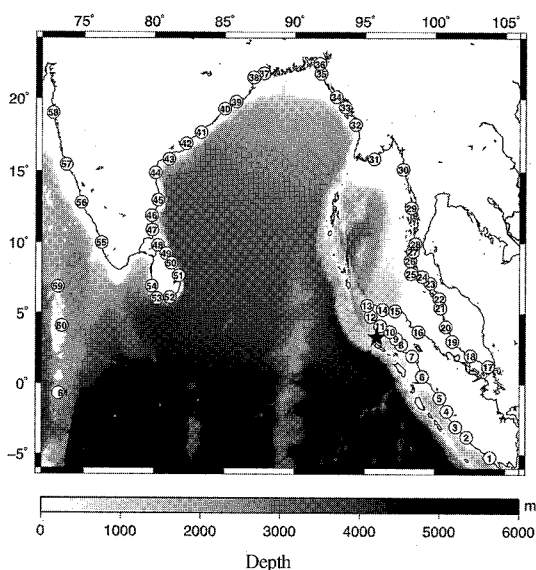


図-1 スマトラ島沖地震の震源 (★), 地形条件および出力地点

2. 現在の津波警報システムの問題点

(1) 現在の津波警報システムの構成

現在稼働している津波警報システムでは、地震の発生を検知するために地震波解析を行っている。すなわち、各地に設置された地震計が記録した地震波を解析して、震源やマグニチュード、メカニズム解などを推定している。そして、これらの地震情報を基に津波発生の危険性を検討して、津波警報を発令している。さらに、気象庁

1 正 会 員 博(工) 秋田大学準教授工学資源学部土木環境工学科
2 学生会員 秋田大学大学院工学資源学研究科土木環境工学専攻

が運営しているシステムでは、地震の発生のみならず、津波シミュレーションを用いた量的津波予報（館畑，1998）も提供している。量的津波予報では、事前に約10万件におよぶ津波シミュレーションを実施しており、それらの計算結果からデータベースが既に構築されている。そして、地震が発生すると、地震波解析から得られる地震情報を基に、このデータベースを検索して津波情報を抽出している。

以上のように、現在の津波警報システムでは、地震および津波の発生を検知するために、観測された地震波を使用している。したがって、津波警報システムが提供する防災情報の信頼性は地震波解析の精度に依存している。そこで次に、地震波解析を基にした地震情報の適用能力を調べるため、2004年スマトラ島沖地震に関する地震情報を整理して問題点を検討する。

（2）2004年スマトラ島沖地震発生直後の地震情報

2004年スマトラ地震発生直後に各防災・研究機関から電子メールで発表された地震情報を表-1に示す。ただし、 M_w はモーメントマグニチュードであり、マグニチュードの種類が明示されていない情報については M とした。発令時間が記述されていない情報については、各機関のSMTPサーバーによる電子メールの送信時間を参照した。また、地震後から発令までに要した時間を計算するための発震時間は2004年12月26日の00:59とした（USGS, 2007-5-16 参照）。

地震発生からわずか15分後に、西海岸・アラスカ津波警報センター（以下、WCATWC）およびPTWCから地震情報が発表されており、管轄外にも関わらず、極めて迅速に対応されていたことが分かる。しかし、この時点で発表された情報で示されていたマグニチュードは8.0と著しく過小評価であった。マグニチュードが9.0に修正されたのは地震発生から約19時間後であり、ハーバード大学によって発表されている。ただし、ハーバード大学は研究機関であるため、防災機関としてのマグニチュードの修正は、約36時間半後のWCATWCおよびPTWCの発表となる。

このように現在の津波警報システムには、巨大地震が発生した直後はマグニチュードを過小評価する危険性がある。ただし、これらの過小評価は各機関の解析ミスを示しているのではない。マグニチュード9クラスの巨大地震が発生した場合の解析の困難さと現在のシステムの限界を示しているのである。すなわち地震波を用いて津波を検知する現在の津波警報システムの問題点である。インド洋にも現在の津波警報システムの導入が予定されており、それは津波防災にとって重要なことである。しかし、現在のシステムにこのような問題点があることを正しく認識した上で、運用していくことが必要である。

表-1 各機関から発表された地震情報と設定した津波モデル

Institute	Magnitude	Issued time (UTC)	Time after the event (hour:min)	Tsunami model
WCATWC	M 8.0	12/26/2004 01:14	00:15	A
PTWC	M 8.0	12/26/2004 01:14	00:15	
PTWC	M 8.5	12/26/2004 02:04	01:05	B
WCATWC	M 8.5	12/26/2004 02:09	01:10	
USGS	M 8.5	12/26/2004 02:17	01:18	
USGS	M_w 8.2	12/26/2004 02:23	01:24	
Harvard Univ.	M_w 8.9	12/26/2004 05:26	04:27	C
Harvard Univ.	M_w 9.0	12/26/2004 20:02	19:03	D
WCATWC	M 9.0	12/27/2004 15:34	36:35	
PTWC	M 9.0	12/27/2004 15:35	36:35	

3. 仮定の津波警報システムから提供される津波情報

（1）仮定の津波警報システムが想定する津波モデル

現実にはまだインド洋に津波警報システムは設置されていないが、2004年の災害発生時にインド洋で津波警報システムが既に稼働していたと仮想する。そして、表-1に示した各地震情報を基に、仮定の津波警報システムがそれぞれの時点で想定したと考えられる津波モデルを検討した。具体的には、マグニチュードが8.0, 8.5, 8.9, 9.0の4段階の地震情報を選択し、それぞれから求められる津波モデルをA, B, C, Dとした。

津波モデルを規定する断層パラメータは以下のように設定した。まず、断層長 L 、断層幅 W 、すべり量 D は次の条件から決定した（Wells and Coppersmith, 1994；佐藤ら, 1989）。

$$M_w = 4.33 + 0.9 \log LW \quad (1)$$

$$W = L/2 \quad (2)$$

$$D = M_0 / \mu LW \quad (3)$$

ここで、 M_0 は地震モーメント、 μ は剛性率（ 3.5×10^{10} N/m）である。ただし、スダ海溝沿いのテクトニクスを考慮して、断層幅については150 kmを上限とした（越村ら, 2005）。また、断層基準点（ X_f , Y_f ）は各機関から発表されている震源を含むようにユニラテラルに断層を配置して決定した。走向 θ 、傾斜角 δ 、すべり角 λ 、断層上端深さ H は、各機関からそれらの値が発表されている地震については解析解を採用したが、発表されていない場合は典型的なプレート境界型地震を想定して、 θ はプレート境界沿い、 $\delta=20$ (deg)、 $\lambda=90$ (deg)、 $H=10$ (deg)と決定した。

以上の条件で設定された各津波モデルの断層パラメータを表-2に示す。また、Mansinha・Smylie (1971)の方法で地盤変動量を計算して求めた津波波源を図-2に示す。地震発生15分後および約1時間後に発表された地震情報を基に想定した津波モデルAおよびBでは、

断層長が 155 km および 293 km と実際より短いため、津波波源はスマトラ島北部付近にのみ分布している。その後、マグニチュードは修正されていき、地震発生から約 4 時間半後の津波モデル C での断層長は 797 km、約 19 時間後の津波モデル D では 1026 km となり、津波波源はインド洋の広い範囲に達していることが分かる。

津波波源の最大隆起は、津波モデル A で 1.40 m であるのに対し、津波モデル B では 2.28 m となり、約 1.6 倍に増大している。一方、津波モデル C および D の最大隆起はそれぞれ 2.68 m および 2.74 m であり、津波モデル B からの増加は比較的小さい。これは、ハーバード大学から発表されている津波モデル C および D の傾斜角 δ が小さいためである。

また、津波モデル D のすべり角 λ は 110 度であるため、若干の横ずれ成分を示している。通常のプレート境界型地震の場合では問題にならない程度であるが、マグニチュード 9 クラスの超巨大地震では相対的に影響が大きくなる。本来は、山中 (参照 2007-6-20) のように長い時間の地震波形の解析からすべりの分布を求め、鈴鹿ら (2005) のように小断層に分割して津波波源を表現すべき規模であるが、時間的制約の大きい津波警報システムでは短時間の地震波形による解析結果を全体に適用しなくてはならない。これは地震波解析から津波波源を推定する現在の検知手法の問題点である。

(2) 各津波モデルから計算されたインド洋での津波

図-2 に示した各津波波源を初期条件として、津波の伝播計算を実施した。支配方程式としては地球座標系の線形長波理論を用い、Staggered Leap-frog 法により差分化した。境界条件は陸側が鉛直壁、沖側は自由透過とした。時間ステップは 5 秒、再現時間は 6 時間に設定した。水深データには、空間格子間隔 1 分の GEBCO Digital Atlas (British Oceanographic Data Centre, 2007-6-20 参照) から南緯 6° ~ 北緯 24°、東経 72° ~ 106° の範囲を切り出して使用した (図-1)。なお、打ち切り水深は 10 m に設定した。各津波モデルから計算された最大水位の空間分布を図-3 に示す。等値線は 0.5 m 毎に引いてある。

地震発生 15 分後に発表された地震情報を基に想定した津波モデル A では、水位が高くなっている領域がスマトラ島北部に限られており、インド洋全体に伝播していった津波エネルギーは小さく、著しく過小評価になっていることが分かる。次に、地震発生から約 1 時間後の

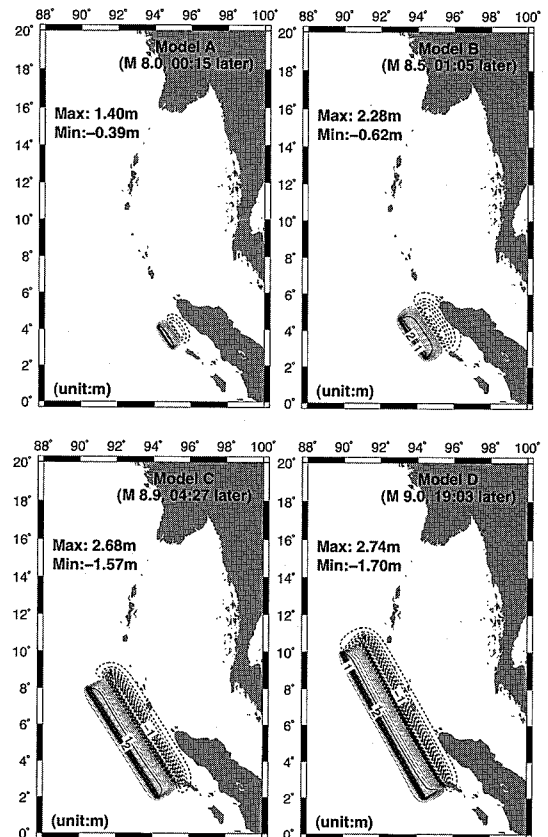


図-2 各津波モデルから計算された津波波源

地震情報を基に想定した津波モデル B では、マグニチュードが 8.5 と改善されているため、インド洋に伝播していく津波エネルギーは増大している。しかし、津波波源としてはまだ小さいため、実際に大きな被害を受けたタイ (例えば、松富ら, 2005) やスリランカ (例えば、富田ら, 2005) へ向かう津波エネルギーは過小評価のままである。一方、地震発生から約 4 時間半後に想定される津波モデル C では、津波波源がニコバル諸島の北方付近まで広がっているため、津波エネルギーはアンダマン海を伝播してタイへ来襲している。さらに、地震発生から約 19 時間後に想定される津波モデル D では、津波波源はアンダマン諸島近くまで広がっているため、スリランカ付近にも大きな津波エネルギーが来襲している。

最大水位の空間分布は津波エネルギーの伝播方向を間接的に示しているが、沿岸部での津波の高さは周辺の地

表-2 各津波モデルの断層パラメータ

Model	M	$M_0(10^{25}\text{Nm})$	X_f	Y_f	$L(\text{km})$	$W(\text{km})$	$H(\text{km})$	$\theta(\text{deg})$	$\delta(\text{deg})$	$\lambda(\text{deg})$	$D(\text{m})$
A	8.0	0.1	E95.0	N3.0	155	77	10	325	20	90	3.01
B	8.5	0.7	E94.5	N2.5	293	147	10	325	20	90	4.70
C	8.9	3.2	E94.3	N2.0	797	150	8.9	326	9	96	6.74
D	9.0	4.0	E94.4	N2.0	1026	150	7.7	329	8	110	7.36

形条件によって大きく異なってくる。そこで、各津波モデルから計算された沿岸部における最大水位の分布を図-4に示す。出力地点は図-1に丸付き数字で示した61地点であり、インド洋沿岸の8カ国におよんでいる。

震源に近いインドネシアでは全ての津波モデルにおいて大きな津波が来襲しているが、全体的には津波モデルA, B, C, Dの順にマグニチュードが増大するにつれて、津波の規模も大きくなっていく傾向を示している。しかし、地震発生15分後に発表された地震情報を基に想定した津波モデルAでは、インド洋全体で津波が小さく、インドネシアでも他の津波モデルの1/2以下となっている。すなわち、現在の津波警報システムが仮にインド洋で2004年の被災当時既に稼働していたとしても、地震発生直後に提供された津波情報はインド洋全体で過小評価になっていた危険性が高い。

また、地震発生から約1時間後に想定される津波モデルBでも、実際には大きな被害が発生したタイやスリランカでは津波が過小評価となっており、マグニチュード8.9の津波モデルCの約1/2、同9.0の津波モデルDの約1/3となっている。すなわち、津波警報システムが稼働していたとしても、タイやスリランカでは津波の来襲以前に適切な津波情報が提供されなかった危険性が高い。

(3) 仮想の津波警報システムが提供する津波予報

図-4に示された沿岸部での最大水位から、仮想の津波警報システムが提供したと考えられる津波予報を表-3にまとめる。予報の基準は、量的津波予報検討会(1998)にしたがって、0.2m以上1m未満で津波注意報、1m以上3m未満で津波警報、3m以上で大津波警報とした。予報区は国単位として、それぞれ国の沿岸部での最大水位をその国の津波の代表値として予報を決定した。表中では、大津波警報を黒色、津波警報を灰色、津波注意報を斜線、発令なしを白色で表し、各国の津波の代表値をm単位で示している。また、各国で調査された信頼性Aの最大値を参考のため併記してある。ただし、局所的な地形条件等の影響により、その国を代表する津波の規模より大きくなっている可能性があることを断っておく。

地震発生15分後に発表された地震情報を基に想定した津波モデルAでは、震源に近いインドネシアにおいて大津波警報が発令されているが、それ以外の国々では津波注意報あるいは発令なしである。地震発生から約1時間後に想定される津波モデルBでは、津波注意報が発令されていた国では津波警報に切り替えられ、マレーシアやミャンマーでは津波注意報が新たに発令され始めている。しかし、インドネシアやタイ、スリランカ、インドなどの実際に大きな被害を受けた地域で、大津波警報が発令されるのは、地震発生から約19時間後に想定される津波モデルDを待たねばならない。すなわち、

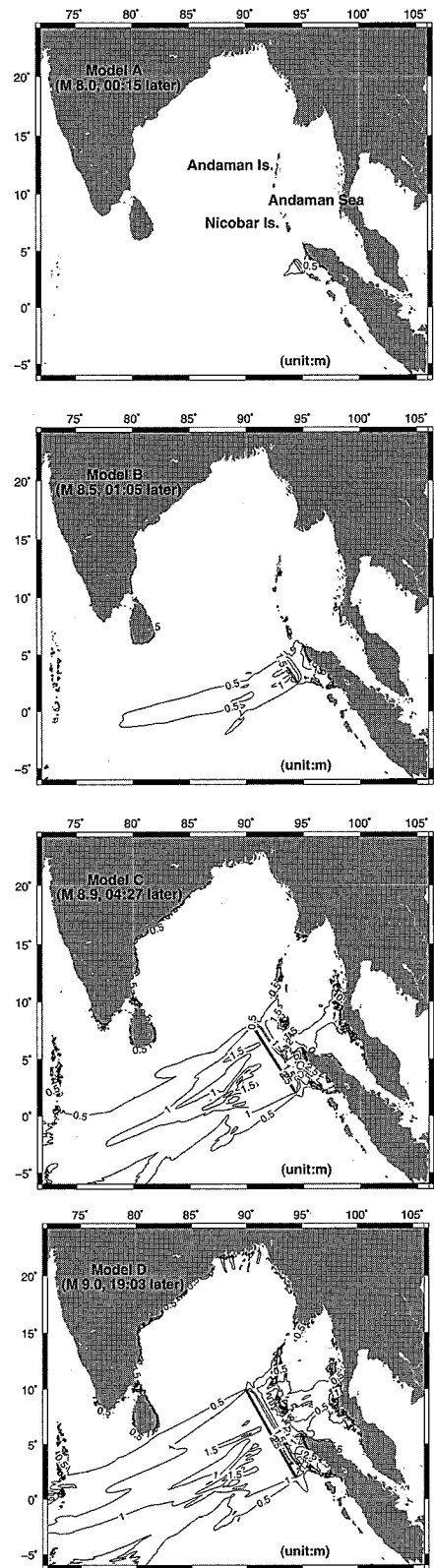


図-3 各津波モデルから計算された最大水位の空間分布

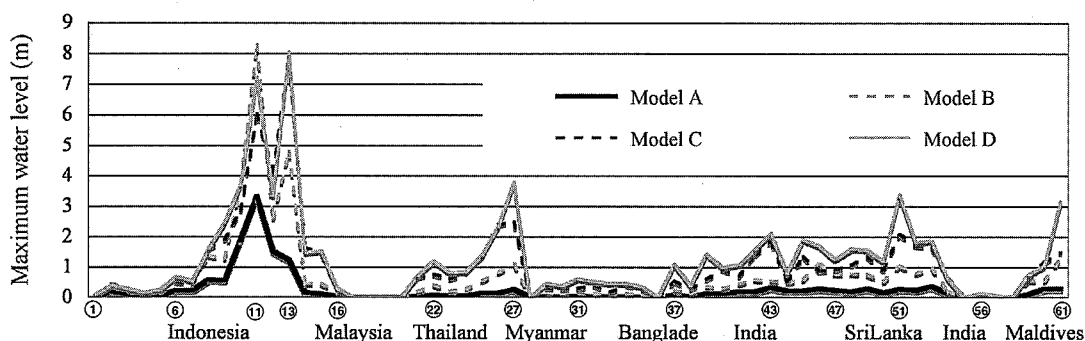


図-4 各津波モデルから計算された沿岸での最大水位分布

表-3 仮想の津波警報システムで発令された津波警報

Country	Model A	Model B	Model C	Model D	Measured
Indonesia	3.31	8.27	7.83	8.02	40.48
Malaysia	0.07	0.41	0.75	1.20	—
Thailand	0.26	1.11	2.47	3.77	14.88
Myanmar	0.04	0.22	0.41	0.52	2.5
Bangladesh	0.00	0.09	0.28	0.35	—
India	0.32	1.11	1.83	2.12	5.57
Sri Lanka	0.36	1.04	2.03	3.37	10.29
Maldives	0.29	1.30	1.47	3.15	3.37

現在の津波警報システムが仮にインド洋で稼働していたとしても、津波来襲以前に、適切な津波予報が発令されなかった危険性が高い。

4. おわりに

2004年の津波発生当時、現在の津波警報システムが既にインド洋で稼働していたと仮想して、提供されていたと考えられる津波防災情報を検証した。その結果、2004年スマトラ島沖地震の発生直後では、津波モデルおよびそれから計算される沿岸部での津波が過小評価となるため、津波来襲以前に適切な津波予報が発令されていなかった可能性が高いことを示した。この原因は、現在の津波警報システムにおける津波発生の検知方法にある。すなわち、現在のシステムで用いている地震波解析は、超大型地震が発生した場合、その直後ではマグニチュードを過小評価してしまう危険性があるためである。

もちろんインド洋ではソフトウェアによる津波防災が不可欠であるため、津波警報システムの導入を急ぐべきである。しかし、現在のシステムにこのような問題点があることを正しく認識した上で運用していくことが必要である。また、今後は、現在の地震波解析による津波波源の推定方法に加えて、海洋レーダ（高橋ら、2007）などを利用して海面変動を直接検知する技術が必要となる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり科学研究費補助金基盤研究（A）（代表者：今村文彦、課題番号 18201033）の

補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭(2005)：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1416-1420。
- 佐藤良輔・阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典(1989)：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，p. 390。
- 鈴鹿 陽・高橋智幸・松富英夫(2005)：タイ南西部に襲来したスマトラ島地震津波の数値解析，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1341-1345。
- 高橋心平・高橋智幸・児島正一郎・小沼知弘(2007)：後方散乱強度を指標とした遠距離海洋レーダによる津波検知に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第54巻，投稿中。
- 館畑秀衛(1998)：津波数値計算技術の津波予報への応用，月刊海洋，号外 No. 15，pp.23-30。
- 富田孝史・有川太郎・安田誠宏・今村文彦・河田恵昭(2005)：インド洋大津波のスリランカ南西部における津波実態・被害調査報告，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1406-1410。
- 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。
- 量的津波予報検討会(1998)：量的津波予報検討会検討結果報告，p. 72。
- 山中桂子(オンライン)：EIC 地震学ノート No.161 + 12月26日のインドネシアの地震 (Ms9.0)，http://www.eri-u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC161.html，参照 2007-6-20。
- British Oceanographic Data Centre : GEBCO Digital Atlas (オンライン)，http://www.bodc.ac.uk/projects/international/gebco/gebco_digital_atlas/，参照 2007-6-20。
- IUGG Tsunami Commission : Tsunami Measurement Data (オンライン)，<http://www.nda.ac.jp/~fujima/TMD/>，参照 2007-6-20。
- USGS : Earthquake Hazards Program (オンライン)，<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2004/usslav/>，参照 2007-6-20。
- Mansinha, L. and D. E. Smylie(1971)：The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440。
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith(1994)：New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement, Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4), pp. 974-1002。