

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

越村俊一* ・ 高島正典** ・ 鈴木進吾***
林 春男**** ・ 今村文彦***** ・ 河田恵昭*****

インド洋のプレート境界に沿った地震空白域で発生し得るマグニチュード9クラスの巨大地震を想定して津波の数値シミュレーションを実施し, 得られたシミュレーション結果とリモートセンシングにより得られた都市光の分布や沿岸の人口統計データとを統合し, 沿岸の土地利用状況や津波災害の社会的影響の大きさも考慮したインド洋沿岸諸国の津波脆弱性を評価する指標を提案し, インド洋において発生する津波災害による被害のポテンシャルを明らかにした。

1. 序 論

2004年12月26日00:58 (UTC), インドネシア・スマトラ島の西方沖を震源とする巨大地震が発生した。地震のマグニチュードは, 米国ハーバード大学の発表によると $M_w=9.0$ (Harvard University, 2005) で, 1900年以降に世界で発生したすべての地震のうち第4番目となる巨大なものであった。この地震により発生した津波はインド洋全体に伝播し, 史上最悪となる甚大な被害を及ぼした。

インド洋沿岸12カ国で29万人以上の死者・行方不明者をだしたこの津波災害を契機に, インド洋の津波防災対策推進に向けての国際社会の要請が高まった。これを受けて, 気象庁はインド洋全体を43の予報区に分割して, 地震直後の津波発生有無の可能性と予想到達時刻等を伝える警戒システムの運用を開始した (気象庁, 2005)。しかし, インド洋における真の津波予警報システムの構築には, 2004年の災害事例だけでは不十分であり, 過去の事例の整理や津波観測網の整備に加え, 将来起こり得る巨大地震のシナリオを網羅した, インド洋全体の津波伝播・被害特性を基礎資料として蓄積する必要がある。

そこで本研究では, (1)インド洋のプレート境界に沿って発生し得るマグニチュード9クラスの巨大地震を想定して津波の数値シミュレーションを実施し, インド洋の津波特性を総合的に明らかにすること, (2)得られたシミュレーション結果とリモートセンシングにより得られた都市光の分布や沿岸の人口統計データとを統合し, 沿岸の土地利用状況や津波災害の社会的影響の大きさも考慮したインド洋沿岸諸国の津波脆弱性を明らかにすることを目的とする。

2. インド洋における津波数値解析

(1) 数値モデル

大洋を伝播する津波の数値解析には, 後藤ら (1988) により導出された, コリオリ力 f を考慮した地球座標系の線形長波理論に基づく Staggered Leap Frog 法を採用する。解析の実施には, 米国 National Geophysical Data Center が配付している 2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) を利用した。図-1 に解析領域と水深の分布を示す。

(2) 2004年スマトラ島沖地震津波の数値解析

まず, 2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震津波の再現計算を行い, インド洋全体に波及した津波の伝播特性を検証する。図-2 に, 12月26日の本震の震源 (図中の星印: 米国地質調査所, ハーバード大学発表のもの) と余震分布を示す。図中の実線はプレート境界である。スダ海溝ではインド・オーストラリアプレートが, スマトラ島を挟んで, ユーラシアプレートの下に北北東方向に沈み込んでおり, その沈み込み帯において本震が発生したと考えてよい。2004年12月26日の本震後の余震は, スマトラ島北西部からアンダマン・ニコバル諸島にかけてのスダ海溝に沿って1300 km 以上の広い範囲で発生し, 本震の断層面もこれに近いスケールを持ったものであると考えられる。

しかし, この断層面のどの領域が津波の発生に寄与したかについては未だ結論が出ていない。たとえば, 八木 (2005) や山中 (2005) による広帯域地震計の観測波形

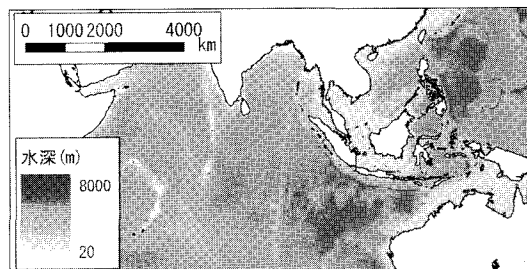


図-1 解析対象領域の水深分布

* 正 会 員 博 (工) 東北大学大学院工学研究科
** 正 会 員 博 (情) 東京大学生産技術研究所
*** 学生会員 修 (工) 京都大学大学院情報学研究科
**** 正 会 員 Ph.D. 京都大学防災研究所
***** 正 会 員 工博 東北大学大学院工学研究科
***** フェロー 工博 京都大学防災研究所

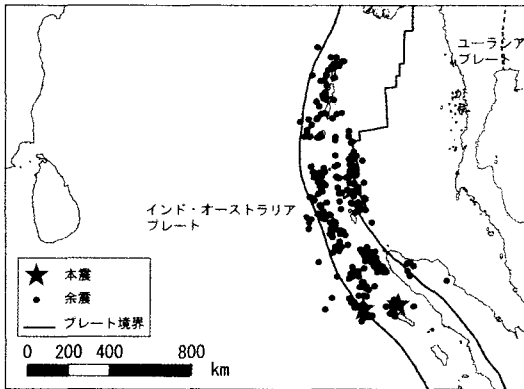


図-2 12月26日の本震の震源と余震分布

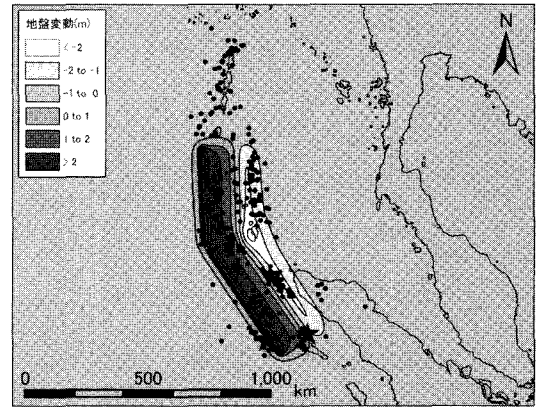


図-3 2004年スマトラ島沖地震による推定地盤変動

を用いた暫定解析は、ニコバル諸島からさらに北に延びる破壊領域の存在の可能性を示唆しているものの、解析に利用できる地震波の帯域に限界があり、最終的な断層面の特定には至っていない。

本研究では、断層面を決定するにあたっては、まずスンダ海溝沿いのテクトニクスを考慮して断層の幅を $W = 150 \text{ km}$ とし、式(1)に示す Wells and Coppersmith (1994) による断層モデルの幾何学的経験則に整合するように断層長さを $L = 900 \text{ km}$ と決定することにした。

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

ここで M_w はモーメントマグニチュード ($M_w = 9.0$)、 L 、 W はそれぞれ断層の長さ、幅 (km) である。

次に、式(2)の地震モーメント M_0 の定義式から断層滑り量 D (m) を算出した。 M_0 はハーバード大学発表の $M_0 = 4 \times 10^{29} \text{ Nm}$ を採用した。

$$M_0 = \mu DLW \quad (2)$$

μ は地殻の剛性率で、ここでは $3 \times 10^{10} \text{ N/m}$ と仮定した。

一方、断層の走行、傾斜角、滑り角については、ハーバード大学発表の CMT 解を参考にしながら、長さ 900 km の断層を北と南でそれぞれ 400 km と 500 km のセグメントに分割し、余震分布に整合するように決定した。表-1 に断層パラメータを示す。

上記パラメータに基づいて求めた海底地盤変動量分布 (津波発生時初期水位分布) を図-3 に示す。地盤変動量の計算には、Okada (1985) の解析解を利用した。断層の位置については、松富ら (2005a) により報告された、スマトラ島北西岸の地盤沈降量 (1~2 m) と計算結果が整合するよう、試行錯誤的に決定した。

(3) 2004年スマトラ島沖地震津波の伝播特性

図-4 に数値解析で得られた最大津波高分布を示す。上から、(a) インド洋全体、(b) スマトラ島北部・タイ、(c) スリランカの予測最大津波高を示してある。津波の

表-1 2004年スマトラ島沖地震津波の波源モデル

	南セグメント	北セグメント
長さ/幅 (km)	500/150	400/150
走行/傾斜角/滑り角 (度)	329/15/90	358/15/90
深さ (km)	10	10
滑り量 (m)	11.0	11.0
基準点 (経度/緯度)	94.8E/2.5N	92.0E/6.5N

エネルギーは、波源から東西に放射される成分が卓越しており、北側からのセグメントで発生した津波がスリランカを直撃したことが分かる。2分という空間格子間隔を用いた解析では、津波高に関する測定値との直接的な比較は難しいが、津波高の分布特性は松富ら (2005a, 2005b) の結果と定性的によく一致していることが確認できた。特にタイ国ブーケット島北部には局所的に津波が集中しており、彼らの現地調査の結果においても同様の結果が得られている。

スリランカにおいても、南東部から北東部にかけての海岸線により高い津波が来襲しており、現地調査との整合性は高いことを確認できた (京都大学, 2005)。

(4) 衛星高度計データを用いた津波波源の検証

Gower (2005) によると、これまで人工衛星に搭載された海面高度計が伝播途上の津波を捕らえたのは、1例しか存在しなかった。リモートセンシング技術は、津波発生時や伝播途上の海面を面的に測定することができれば、津波の発生機構の解明に最も貢献できると期待されている。2番目の事例として、今回偶然にも伝播途上の津波をとらえることに成功したのは、2001年に米国 NASA とフランス CNES が共同で打ち上げた衛星 Jason1 であった。地震発生当時、Jason1 はスリランカの 1500 km 南方からベンガル湾にかけての軌道を周回していた。図-5 に、地震発生から2時間後の Jason1 の軌道

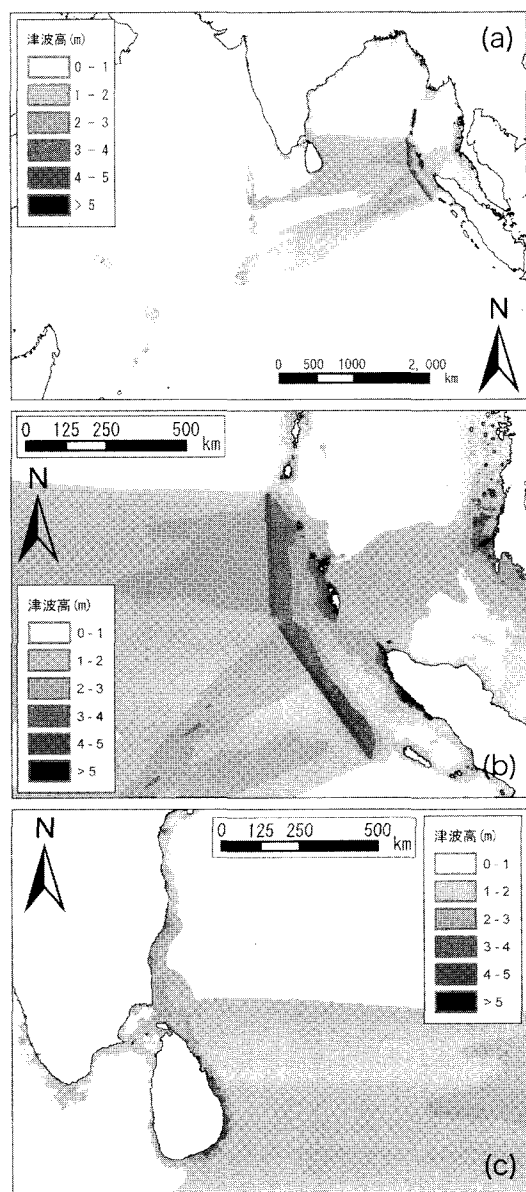


図-4 最大津波高分布の予測値

と津波フロントとの位置関係を示す。波源から南西方向に伝播する津波フロントを横切るようにして海面変動を計測することに成功した。図-6に、高度計データと各観測ポイントの同位置、同時刻におけるシミュレーション水位の比較を示す。南緯5度付近と北緯20度付近にある水面変動は津波第1波によるもので、シミュレーション波形と高度計データは良い一致を示しており、本研究で得られた津波波源モデルの妥当性が示された。しかしながら、赤道から北緯5度にかけての水面変動の再現性は好ましくなく、波数分散性を考慮していない線形長波理論による数値解析の第1波以降の予測精度の低下が考

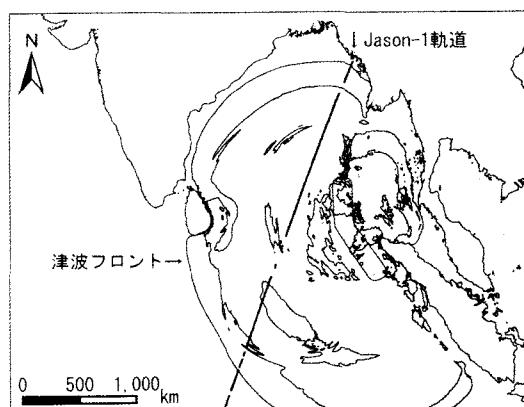


図-5 Jason 1の軌道と津波フロントの地理的關係

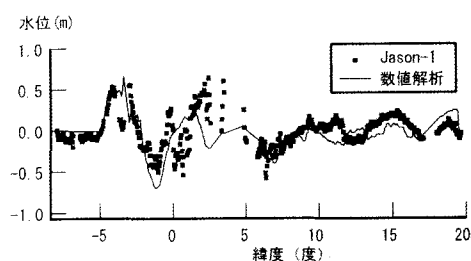


図-6 海面高度計データと数値解析結果の比較

えられるが、高度計データそのものにおいても、たとえば潮汐の影響を取り除いていないなどの誤差要因は考えられる。第2波以降の再現性の向上は今後の検討課題であろう。

3. 津波災害への地域脆弱性評価

(1) 津波影響人口 (Potential Tsunami Exposure)

津波災害が社会に与える影響度や地域の津波災害に対する脆弱性を評価する一指標として、沿岸部の津波に曝される人口 PTE (Potential Tsunami Exposure) を算出する。まず、地域に襲撃する津波の高さ毎に、その高さの津波に曝される人口を整理する。PTEは、考慮する地域毎に次式により定義する。

$$PTE(\eta)_i = \sum_{j=1}^J P_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

これは、ある評価領域 i (国や州などの比較的広範囲な領域) において任意の津波高 η に曝される人口を求めるもので、海岸線に沿った評価単位 (これは地域毎でも単位面積でもよい) j 毎に任意の津波高 η に曝される人口の総和で表現したものである。

PTEは、海岸線に沿った津波高 (または津波浸水域) の分布と、海岸に面した評価単位内 (または浸水域内) の人口 P_{ij} が既知であれば算出することができる。海岸

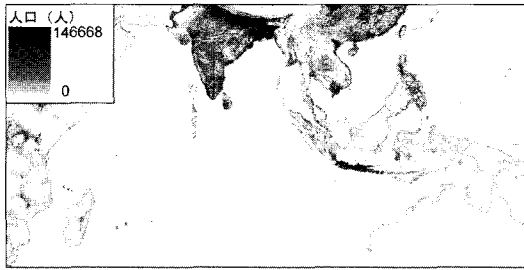


図-7 LandScan 2003の人口分布

沿いの津波高 η については、数値解析や詳細に実施した現値調査の結果を利用すればよい。ここでは、評価領域をインド洋沿岸の主要な被災国とし、各国の海域に面する標高30 m以下の土地を30秒メッシュに分割した領域（900 m 四方）を評価単位としてGIS分析を行った。標高の抽出は、米国NASAが公開している、スペースシャトル飛行で得られた合成開口レーダー画像をDEM (Digital Elevation Model) に変換したSRTM (Shuttle Radar Topography Mission) データ（3メッシュ）を利用した。評価単位を30秒メッシュにした根拠は、人口統計データとの整合性を図るためである。PTE算出のための人口統計データは、米国Ork Ridge National University (2003) が公開しているLandScan 2003を採用した。Landscanとは、各国の県・州レベルの人口を、土地の傾斜、土地被覆、主要道からの距離、都市光が観測された頻度で、30秒メッシュに按分することで得られたものである。図-7にLandScan2003から得られた人口分布を示す。ただし現状では、特に発展途上国における統計データの精度検証が十分に行われておらず、利用にあたっては注意が必要である。

(2) 2004年スマトラ島沖地震津波災害におけるPTEの検証

上述の手法を、2004年スマトラ島沖地震津波災害に適用する。インド洋全体（13カ国）および主要被災国（インドネシア、スリランカ、インド、タイ）についてそれぞれ求めたPTEの累積値を図-8に示す。図の横軸は津波高 η (m) で、縦軸は η (m) 以上の津波に曝される人口の累積PTEである。たとえば、CNNが公表している2005年2月現在のインド洋全体の津波死者・行方不明者数は297,046名であるから、それと一致する累積PTEに対応した津波高を図から読み取ると4.09 mとなった。すなわち、インド洋全体で考えた場合、4.09 m以上の津波に曝された人口が死亡または行方不明になったと解釈できる。

同様に、主要被災国の死者・行方不明者数に一致するPTEに対応した津波高を図の値から読み取り、これを

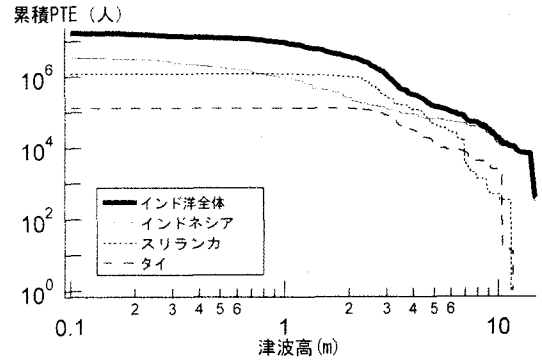


図-8 任意の津波高に対する累積PTE

表-2 スマトラ島沖地震津波における被災各国の脆弱性

	インド洋全体	インドネシア	スリランカ	インド	タイ
死者・行方不明者 (人)	297,046	236,169	35,672	16,416	8,388
脆弱性 (m)	4.09	2.07	5.38	5.86	5.92

地域の津波脆弱性と定義すると、表-2のようになる。この値は、ある地域において死者が得る津波高の下限であると解釈できるから、小さくなるほど想定した津波に対して脆弱であると判定することができる。2004年のイベントに対してはインドネシアが最も脆弱であり、次いでスリランカ、インド、タイと、死者数に対応していることが分かる。

4. インド洋の津波災害ポテンシャル評価

前章において導入したPTEおよび津波脆弱性の評価結果は、同じ評価地域であっても、当然津波の発生位置や規模により変化するはずである。そこで、インド洋全体の津波災害ポテンシャルを評価するために、スンダ海溝沿いで発生しうるM9クラスの巨大地震を想定し、4通りの津波波源（発生シナリオ）を設定して津波の数値解析を実施した後、上記の分析を行った。図-9に本研究で考慮した地震断層のシナリオを示す。4シナリオの地震の発生規模、断層の長さ・幅、傾斜角、滑り角、滑り量は2004年の場合と等しく設定し、断層の走行だけを海溝軸に沿って変化させた。断層パラメータについては表-1を参照されたい。図からも明らかであるが、スンダ海溝に沿って発生し得るM9クラスの巨大地震による津波のエネルギーの指向性は、波源域の位置により、ベンガル湾およびミャンマーに向くシナリオ(1)、タイ・スマトラ島・スリランカ・モルディブに向くシナリオ(2) (2004年型)、スマトラ島・ジャワ島を直撃するシナリオ(3)、オーストラリア西岸に向くシナリオ(4)の

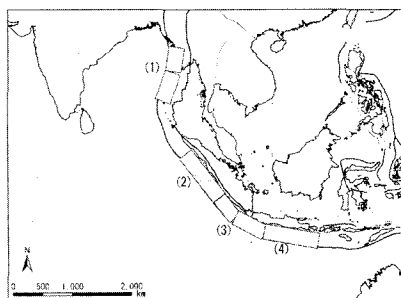


図-9 スンダ海溝沿いの想定地震断層

4タイプに分類できる。紙数の制限により、図示することは叶わないが、シミュレーション結果の可視化により、シナリオ(1)ではベンガル湾奥の大陸棚、(2)ではタイ西部の大陸棚およびスリランカの島周辺、(4)ではオーストラリア西岸の大陸棚が、津波のエネルギー捕捉と局地的な増幅に寄与することが分かった。

それぞれのシナリオについて脆弱性に関するしきい値を設定して求めた推定死者数を表-3に示す。しきい値2.07 mは、2004年のケースでインドネシアに対して求められた脆弱性で、5.71 mは、2004年のケースでインドネシア以外の主要被災国(スリランカ、インド、タイ)の脆弱性の平均値をしきい値としたものである。

表-3 インド洋で発生し得る津波災害による推定死者数

	推定死者数(人) (しきい値2.07 m)	推定死者数(人) (しきい値5.71 m)
シナリオ(1)	3,310,923	708,323
シナリオ(2)	1,223,236	121,574
シナリオ(3)	1,538,711	631,332
シナリオ(4)	1,362,972	447,135

特に、シナリオ(1)の場合には、人口分布の高いベンガル湾奥に津波エネルギーが集中するため、しきい値を5.7 mとした場合でも推定死者数が70万人を超えることが分かる。スンダ海溝沿いで2004年と同規模の巨大地震が発生すると仮定すると、2004年のケースが必ずしも最悪なシナリオとはならないことが分かる。

5. 結 論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

(1) インド洋における津波数値解析の実施により、2004年スマトラ島沖地震津波の波源域を特定した。スマトラ島北西部からニコバル諸島にかけての海溝軸に沿う長さ900 km、幅150 kmの断層が11 m滑ったと仮定すると、スマトラ島北部の地盤沈下、地震から2時間後の衛星Jason-1による第1波の測定海面高度を説明できることが分かった。

(2) 津波災害が社会に与える影響度や地域の津波災害に対する脆弱性を評価する指標として、PTE (Potential Tsunami Exposure) を提案した。2004年の津波災害によるインド洋の津波影響人口PTEは、インド洋沿岸部に来襲する4.09 m以上の津波に対して推算すると2005年2月時点の死者・行方不明者数297,046人とほぼ一致することが分かった。

(3) スンダ海溝に沿って発生し得るM9クラスの巨大地震の4シナリオを想定し、インド洋の津波災害ポテンシャルの評価を行った。それぞれのシナリオに対してPTEを算定した結果、ベンガル湾に向かうシナリオ(1)の津波が最も甚大な人的被害を及ぼし得ることが分かった。2004年型と同じ規模で津波が発生した場合、5.7 m以上の津波に対する影響人口は70万人以上におよぶため、2004年のケースが、必ずしもインド洋における最悪のイベントになるとは限らないことが示された。

参 考 文 献

- 気象庁(2005): インド洋沿岸各国に対する暫定的な「津波監視情報」提供について、報道発表資料、平成17年3月17日。
- 後藤智明・今村文彦・首藤伸夫(1988): 遠地津波の数値計算に関する研究、地震第2輯、第41巻、pp. 515-526。
- 八木 勇 治(2005): URL: iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/Sumatra2004/Sumatra2004-j.html。
- 山中佳子(2005): EIC 地震学ノート、No.161+。
- 松富英夫・榊山勉・Sindhu Nugroho・都司嘉宣・谷岡勇市郎・西山裕一・鎌滝孝信・村上嘉謙・松山昌史・栗塚一範(2005a): 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、海岸工学論文集、第52巻。
- 松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・Seree Suparatid・横浜国立大学大学院(2005b): 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。
- 京都大学防災研究所(2005): www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/。
- Harvard University (2005): Harvard Seismology CMT Catalog Search, <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>。
- National Geophysical Data Center (2005): 2-Minute Gridded Global Relief Data, www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html。
- 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。
- Okada, Y.(1985): Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75, 4, pp. 1135-1154。
- Gower, J.(2005): Jason 1 Detects the 26 December 2004 Tsunami, EOS, Transactions, AGU, Vo. 86, No. 4, pp. 37-38。
- NASA (2000): SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), www2.jpl.nasa.gov/srtm/。
- Ork Ridge National University(2003): Global Ambient Population 2003, www.ornl.gov/sci/gist/landscan/landscan2003。