

2004 スマトラ沖地震津波の数値解析

松山 昌史¹⁾

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日 7 時 58 分 (日本時間 9 時 58 分) に, スマトラ西方沖でマグネチュード (以下, M) 9.0 の巨大地震が発生, それに伴う津波がインドネシア, タイ, インド, スリランカをはじめインド洋沿岸に甚大な被害を及ぼした。この津波は 5000km 以上離れたアフリカ沿岸にも被害を及ぼし, 南極の昭和基地でも水位変動が観測された。その後, 現地被災調査が実施され, 津波の全容が少しずつ明らかにされつつある。

この津波はその高さ, 被害範囲の点で, 世界的にも過去最大級のものである。この津波を数値計算においてどの程度再現できるかは, 今後の日本をはじめ世界の津波防災においてどの程度の断層を波源モデルとして設定すべきか, また断層における不均一性をどの程度考慮すべきかといった課題に対して貴重な資料となる。本研究では, 本津波を対象に数値解析を試み, その挙動及び被災調査結果と比較した。

2. 津波の実測結果概要

津波発生後から国際的な津波被災調査団が結成され, 各被災地で津波痕跡高が測量されている。これらの結果は集約されてインターネット上で公開されている (河田ら, 2005)。図 1 にインド洋周辺の海底地形と津波高の調査結果概略を示す。本震に近いスマトラ島北部では, 西岸で最大約 30m, 北岸で最大約 10m, タイ沿岸ではプーケット島で最大約 6 m, その北 50 km に位置するカオラック沿

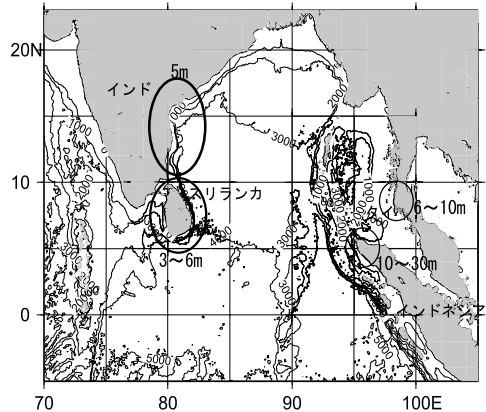


図 1 津波実測結果の概略と海底地形, コンターラインは 1000m 間隔

岸で最大約 10m, スリランカ沿岸で最大約 6m, インドで最大約 5m 程度の津波の痕跡高 (津波来襲時の海面からの高さ) が記録された。

3. 数値計算方法

3.1 基礎方程式と計算手法

数値計算は地球座標系の線形長波理論に基づく計算モデルを用い, 海岸線では鉛直無限壁の完全反射境界条件を設定している。基礎方程式は以下の通り (今村ら, 1986)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial (N \cos \theta)}{\partial \theta} \right] = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = fN \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = -fM \quad (3)$$

λ は経度, θ は緯度, η は水位変動, h は静水位, g は重力加速度, (M , N) はそれぞれ

¹⁾ 正会員 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域

(λ, θ) 方向の流量フラックス, R は地球の半径, ξ は海底地盤の変動量, f はコリオリ係数で $f = 2\omega \sin\theta$ (ω : 角速度) ある。式 (1) が連続式, 式 (2), (3) がそれぞれ, 経度・緯度方向の運動方程式である。摩擦項は考慮せずに最小水深を 10m としている。数値計算には水位計算点と流速計算点が 1/2 メッシュ分, 空間方向にも時間方向にもずれるスタッガードリーブフロッグ法を用いている。計算領域は図 2 に示すように東経 70 ~ 105 度, 南緯 5 度 ~ 北緯 23 度で, 全体領域 a を格子幅 3 分, スリランカ周辺領域 b, スマトラ島北端周辺領域 c, タイ南部周辺領域 d を, それぞれ格子幅 1 分, さらに, スマトラ島北端周辺に領域 e, タイ南部周辺に領域 f 設定し, 格子幅を 20 秒とした。領域の接続計算については, 後藤・小川 (1982) の方法

に準じた。

3.2 波源モデル

波源モデルは, ハーバード大学の CMT メカニズム解の断層パラメータ及び余震分布を参考に設定した (表 2)。断層は余震分布を覆うように 500km × 200km を 2 枚設定, 地盤の剛性率はを用いた。この断層パラメータを基に, Mansinha and Smylie (1971) の方法により計算した海底地盤の変動を図 3 に示す。これが津波の入力条件となる。数値計算では, 波源は本震位置 (東経 94.26 度, 北緯 3.09 度) から円弧状に広がるものとし, その時の破壊伝播速度は 2.5km/秒, 立ち上がり時間は 0.01 秒とした。断層全体の長さが約 1000km あるので, 断層の破壊開始から終了までの時間は約 400 秒となる。

表 2 断層パラメータ

	south	north
L (km)	500	500
W (km)	200	200
depth (km)	28.6	28.6
Strike	329	360
Dip	8	8
Slip	110	110
D islocation (m)	5.0	5.0
Mo (dyne cm)	4.0×10^{29}	

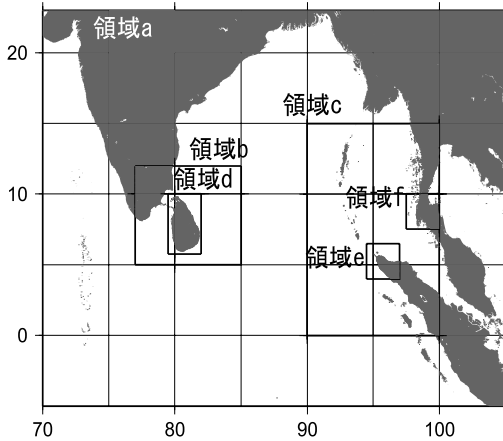


図 2 計算領域とネスティングした各領域

表 1 ネスティングした各領域範囲

領域	格子幅	経度		緯度	
a	3 分	70E	105E	5S	23N
b	1 分	77E	85E	5N	12N
c	1 分	90E	100E	0	15
d	20 秒	79.5E	82E	5.75N	10N
e	20 秒	94.5E	97E	4N	6.5N
f	20 秒	97.5E	100E	7.5N	10N

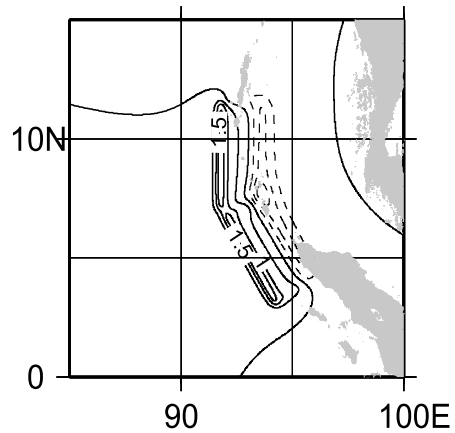


図 3 津波の初期条件となる海底地形変動
コンターラインは 0.5m 間隔, 点線は負 (沈降域)

4. 数値計算結果

4.1 タイ沿岸

図4 (a), (b) にタイ沿岸の津波高さについて、実測結果(河田ら, 2005)と数値計算結果をそれぞれ示す。プーケット島西岸については、最大高さは、いずれも西岸中央部の北緯7.8~8度付近に現われており、6m程度の高さで、両者はよく一致する。プーケット島北部からカオラックへ向かうにしたがって、津波の高さは両者とも5m以下になる。カオラック付近では、再び両者の津波高は大きくなり、計算結果は最大8m、実測結果は9~10mになる。以上のように、カオラック付近での最大津波高さに違いは見られるものの、計算結果は実測結果ときわめて調和的なものとなった。

次に、水位変動について、図4 (c) に示す。津波はまずプーケット島南端 (f22,24) に地震後1時間30分に到達し、引波から始まっている、引き波の継続時間は30分程度あり、地震後2時間で押波に転じた。そして、津波は海岸沿いを北へ順番に到達した。この特徴は証言から得られた津波の到達の特徴とよく一致している。カオラック付近 (f05,f09) では、プーケット島南端より1時間程度遅れて津波は到達している。押波の継続時間は、20分から40分であり、浸水域では津波による流れが数分以上は継続したことが示唆される。また、押波の第2波目以降に最大水位となる場所が f02, f09, f13, f19 と4箇所みられる。特に、f19 は地震後4時間半後に最大水位を記録した。

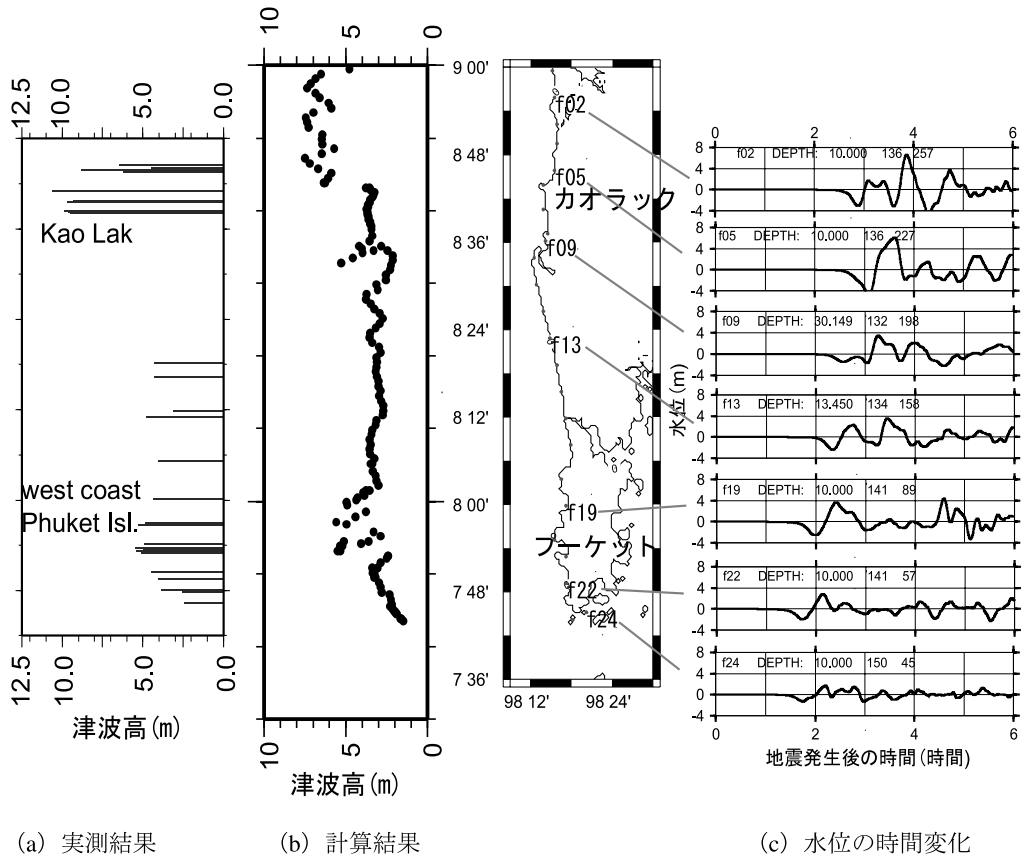


図4 タイ南部沿岸における津波高の実測結果、数値計算結果、および数値計算による水位の時間変化

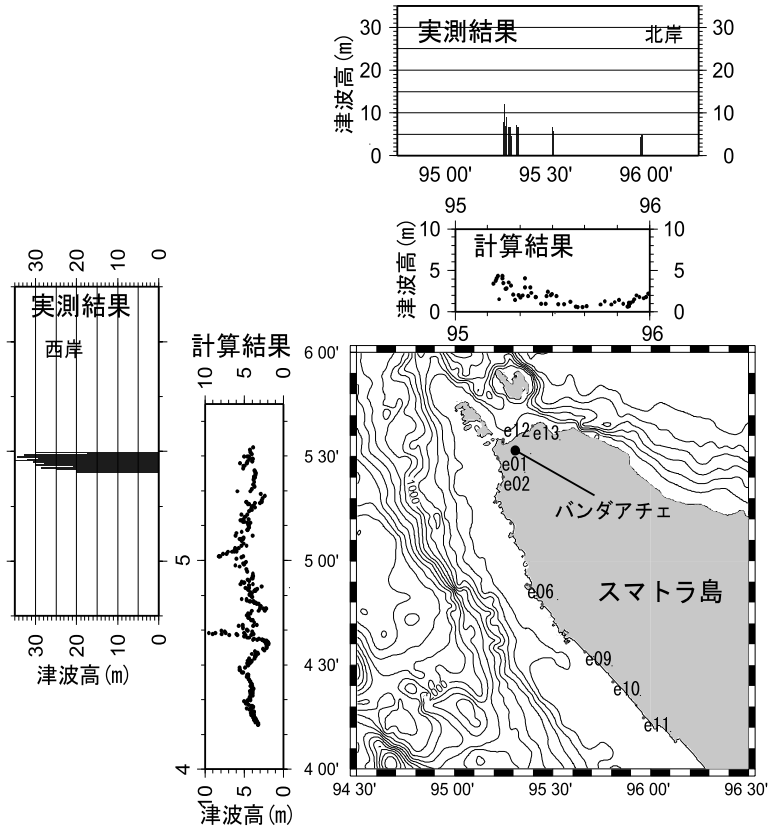


図 5 スマトラ島北部の津波高に関する実測結果と数値計算結果

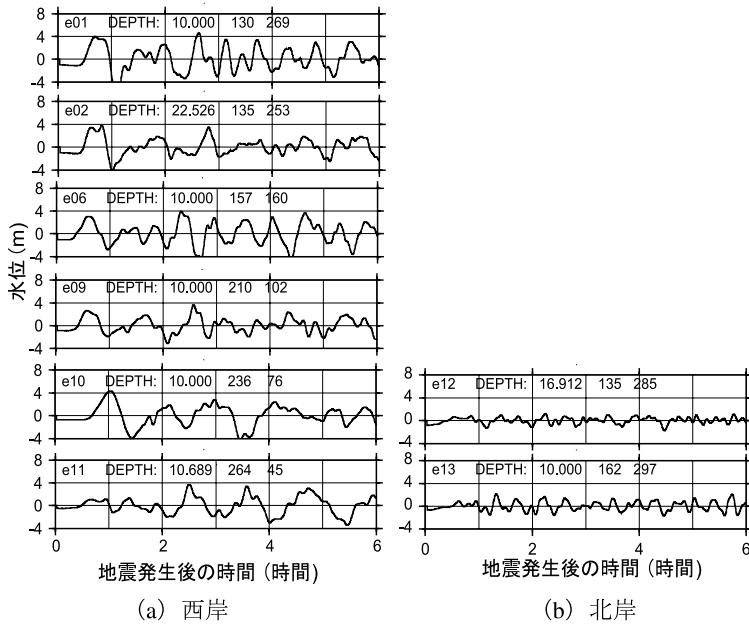


図 6 スマトラ島北部の津波による水位変動 (数値計算)

4.2 スマトラ島北部

図5にスマトラ島北部の津波高さについて、実測結果（河田ら，2005）と数値計算結果をそれぞれ示す。スマトラ島北岸の津波高については、計算結果ではバンダアチェ付近で最大約4m、西に行くにしたがって、その値は小さくなり、東経96度付近で約2.2mとなる。一方、実測結果においては、バンダアチェ付近で平均的に6～7m程度であり、やはり西へ行くに従って小さくなり、東経96度付近では、約5mである。このように津波高の海岸沿いの分布は同じ傾向を示しているが、計算結果は実測結果の40～50%程度である。スマトラ島西岸については、北緯4.2～5.5度の範囲で平均的に約5mであるが、2点で大きくなる場所があり、北緯4.6度付近と北緯5度付近で、それぞれ約10m、約8mである。一方、実測結果はこの範囲のごく一部ではあるものの、西岸北端の北緯5.5度付近で20～30mと、計算結果の4倍以上と圧倒的に大きい。このように、数値計算結果は実測結果と比較して著しく小さい。数値計算の波源モデルは、500km×200km断層を2枚であり、最大海底地形鉛直変動も2m弱である。しかし、実際にはスマトラ島北部近傍の波源は不均一性が大きい可能性が高い。山中（2005）の地震波の解析結果によると、スマトラ島北端西方沖に大きなアスペリティがあり、今後はこの情報を取り入れた数値モデルを行う必要がある。

次に、水位変動について図6に示す。北岸（e12, e13）では、地震とほぼ同時に海面も低下し、約30分後に押波の第一波が到達し、その後も津波による水位変動が繰り返されている。西岸（e01～e11）でも地震とほぼ同時に海面も低下し、約30分後に押波の第一波が到達、押波の継続時間は約30分である。その後最大引波が20～30分継続し、その後も何度も押波と引波を繰り返した。押波と次の押波の間隔は1時間程度有り、西岸が30分程度あることに比べて長い点も特徴的である。

4.3 まとめ

2004年スマトラ沖地震津波について、地球座標系の線形長波理論に基づき、沿岸では20秒の解像度で数値解析を行った。断層モデルは500km×200kmのものを2枚設定して実施したところ、波源から約500km離れたタイ南部沿岸の津波高分布に調和的な結果が得られたが、スマトラ島北部については、実測結果を大きく下回った。この結果より、スマトラ島北部西方においては、断層の不均一性が大きいことが示唆された。今後は断層の不均一性を取り込んで、断層モデルを改良する予定である。

本研究については、文部科学省特別研究推進費（代表：河田恵昭 京都大学教授）の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表す。また、図面や地形データの編集において、GMT（Generic Mapping Tools）を使用しました。開発に携わった方々に謝意を表します。

<参考文献>

- 後藤智明・小川由信：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学土木工学科資料，1982，52p.
- 今村文彦・後藤智明・首藤伸夫：1964年アラスカ津波の外洋伝播計算，第33回海岸工学講演会論文集，1986，pp.209-213.
- 河田恵昭ら（インド洋地震津波災害調査研究グループ）：2004年12月26日インド洋地震津波災害，2005，<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/index-j.html>.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie：The displacement fields of inclined faults., Bulletin of Seismological Society of America, Vol.61, No.5., 1971, pp.1433-1440.
- 山中桂子：12月26日のインドネシアの地震（Ms9.0），EIC地震学ノート No.161+, 2005，http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC161a.html.