

タイ南西部に來襲したスマトラ島地震津波の数値解析

鈴鹿 陽*・高橋智幸**・松富英夫***

2004年12月26日早朝(現地時間), インドネシアのスマトラ島沖を震源とする M9.0 の巨大地震が発生した。この地震に伴う津波はインド洋を取り囲むアジア諸国にとどまらずアフリカ東海岸や南極にまで到達し, 各地に甚大な被害をもたらした。この地震の発生メカニズムについて, 当初は本震付近を起点として北北西方向に約500 km の断層が破壊したと考えられたが, 余震分布より震源域は南北方向に長さ1000 km 程度にも及んだと推測されている。そこで本研究では各調査機関から発表されている断層パラメータを基にして決定した津波モデルで数値計算を実施し, タイ南西部での現地調査結果と比較することにより, 津波発生メカニズムの解析を行った。

1. はじめに

2004年12月26日にインドネシアのスマトラ島北部沖を震源とするマグニチュード9.0の巨大地震が発生した。この地震に伴う津波はインド洋を囲むアジア諸国にとどまらずアフリカ東海岸, 南極にまで達し, 各地に甚大な被害をもたらした。マグニチュード9.0の地震は, 最近100年間に世界で起きた地震の中で4番目に大きいものである。

震源であるスマトラ島沖では, 陸側のユーラシアプレートの下へ, 海側のインド・オーストラリアプレートが南西側から沈み込んでいる。今回のインド洋沿岸諸国に大被害をもたらした巨大地震は, 陸側プレートが一気に跳ね上がって蓄積されていたひずみエネルギーを開放して起きる典型的なプレート境界型地震であり, 2003年の十勝沖地震や懸念される南海・東南海地震などと同じタイプのものである。

今回の地震津波の特徴としては, 余震分布から断層の長さが1000 km 程度と極めて大きかったと推測されること, 現地証言から多くの場所で2波目の津波が大きかったことなどが挙げられる。当初は本震により500 km 程度の断層のみが破壊したと考えられたが, 24時間余震分布や地震波解析の結果から破壊された断層がさらに北側にも存在する可能性が出てきた。

そこで本研究では, 各研究機関から発表されている断層パラメータを基にして決定した津波モデルで数値計算を実施し, タイ南西部での現地調査結果と比較することにより, 今回の津波発生のメカニズムの解析を行った。

2. 現地調査から判明している津波の特徴

地震発生後, 秋田大学, 京都大学, 港湾空港技術研究

所, 電力中央研究所およびタイの研究者により構成された国際合同調査が実施され, 図-1 のような遡上高の分布が得られている(松富ら, 2005)。タイ南西部においては, Khao Lak で6~10 m, Phuket 島西岸で3~6 m, Phuket 島東岸で1~3 m の津波が来襲している。Phuket 島の東方に位置する Phi Phi 島でも4.5~6 m の津波が来襲している。また, 現地での多数の証言により, 最初に引き波が起きていたこと, 1波目よりも2波目の方が高い津波であったことが分かっている。今回の地震はインド洋プレートの沈み込みに伴い発生した低角逆断層のイベントであるため, 震源付近では海底が隆起し, その東側では沈降したと考えられる。したがって, 最初に引き波が起きたという証言はプレートテクトニクスのにも妥当である。

タイ南西部における津波高についてみると, 北部の Khao Lak には10 m を越える津波が来襲している。それも含め Khao Lak には全体的に高い津波が来襲しているが, Khao Lak の南方に位置する Phuket 西岸では最大でも6 m 程度の津波となっている。この津波高の分布がタイ南西部における最も顕著な特徴であり, 本稿の数値解析においても重視すべきものである。

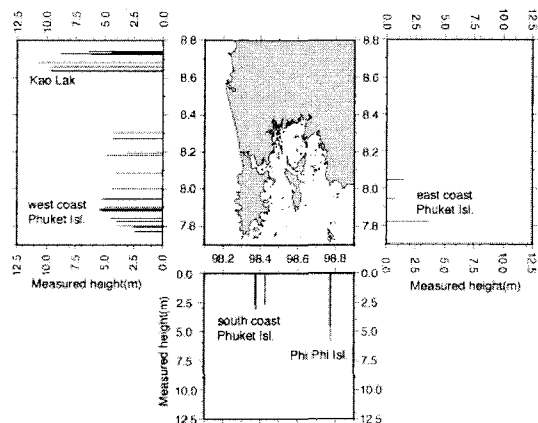


図-1 現地調査結果

* 学生会員 秋田大学工学資源学部土木環境工学科
** 正会員 博士(工) 秋田大学助教授工学資源学部土木環境工学科
*** 非会員 工博 秋田大学教授工学資源学部土木環境工学科

3. 津波に関する数値解析

(1) 計算条件

地形条件はアラスカ大学 GINA (参照2005-5-18) 提供の30秒メッシュの地形データを1分メッシュに修正したものを用いた。本計算で用いた地形条件を図-2に示す。計算範囲は南緯2度～北緯18度、東経85度～100度である。波源はMansinha and Smylie(1971)のモデルを用いて、断層パラメータから計算した。津波の伝播は、球座標上において線形長波理論を Staggered Leap-frog 法によって差分化し、境界条件を陸側が鉛直壁、海側側が自由透過として計算した。時間ステップは5秒、再現時間を6時間と設定した。なお、打ち切り水深は10 m に設定してある。

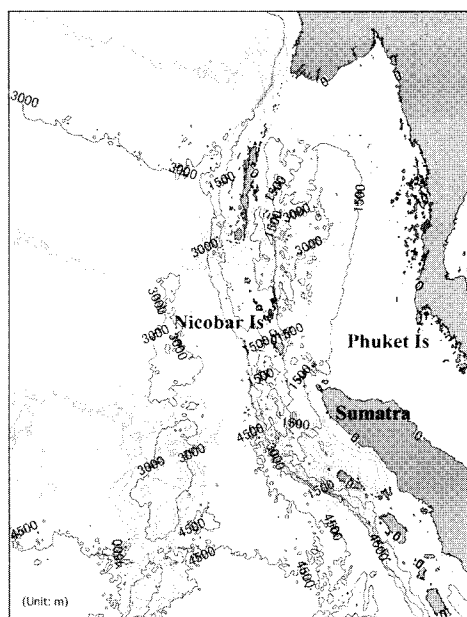


図-2 地形条件

(2) 津波モデル

波源の計算に用いる津波モデルとしては、地震発生直後に発表された Harvard 大学 (参照2005-5-18) の CMT 解を参考にして HEL-1 (図-3(a)) と地震波解析から与えられる情報として現時点でも最も詳細なモデルであるアスペリティを考慮した山中 (2005) による EIC 地震学ノート No.161+ を参考にして HEL-7~HEL-13 を設定した。HEL-1はCMT解の走向、傾斜角、すべり方向、地震モーメントを採用した1枚断層モデルである。一方、HEL-7~13はアスペリティに伴う波源の不均一性を導入するため、東西方向の長さが40 km、南北方向が70 km の小断層の組み合わせで波源域を再現している。小断層の個数としては、HEL-8 (図-3(c)) は東西方向

に6個、南北方向に7個の計42個、それ以外のモデルは東西方向に6個、南北方向に14個の計84個から構成されている。HEL-8は24時間余震分布の Andaman 諸島より南側での破壊を再現しており、当初予想された震源域に相当する。また、HEL-7~13は24時間余震分布の全域での破壊に相当している。また HEL-7 (図-3(b)) は小断層を全て同時に破壊させているが、HEL-9, 10, 11 は本震付近から北方に向かって異なる破壊伝播速度で破壊させている。さらに、HEL-12 (図-3(d))、13は Nicobar 諸島のそれぞれ南側と北側で滑り量を増大させている。

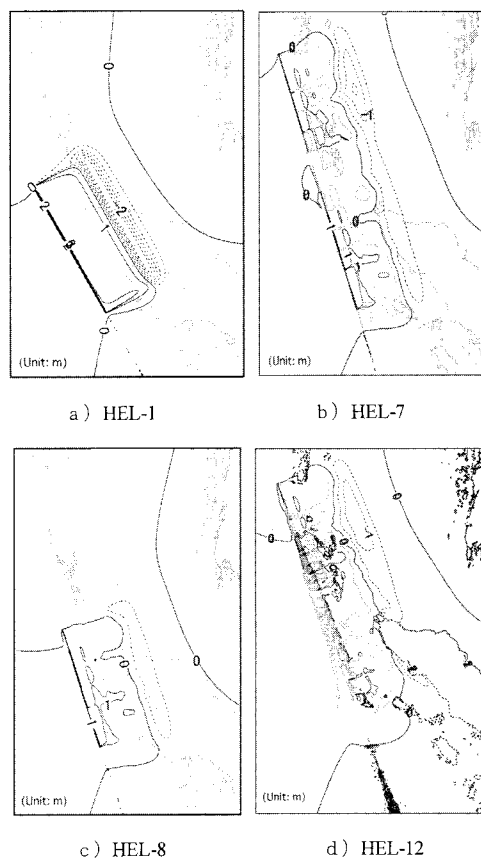


図-3 初期波形

(3) 解析方法

本稿ではタイ南西部での現地調査結果との比較から、以下についての検討を行った。

- (a) 地震直後に発表された地震モデルと現時点で最新の地震モデルによる津波高分布の比較
- (b) 24時間余震分布全域および南側のみが破壊した場合の津波高分布の相違
- (c) 破壊伝播速度の相違が津波高分布へ与える影響
- (d) Nicobar 諸島付近の滑り量がタイ南西部に來襲す

る津波へ与える影響

(e) Phuket 島西岸における時間波形の比較

(f) 現地調査で判明している Khao Lak での局所的に大きな津波の原因

4. 計算結果

(1) 地震直後に発表された地震モデルと現時点で最新の地震モデルによる津波高分布の比較

HEL-1で参考にしてしている Harvard 大学の CMT 解は速報性を重視しているため、その後に判明した余震分布や地震波解析結果は考慮されていない。したがって、HEL-7の方が地震学的な信頼性は相対的に高く、津波の再現性も高いと考えられる。しかし、現在の津波警報システムでは HEL-1のような津波モデルを用いることになるため、本稿ではそれらの比較を行った。

HEL-1と7から計算された津波高の分布を図-4に示す。現地調査で得られている Phuket 島西岸 (3 ~ 6 m) に比べて Khao Lak (6 ~ 10 m) で著しく大きくなるような津波高の分布はいずれのモデルでも再現されていない。しかし、HEL-7では Khao Lak の方が若干高い分布を示しているのに比べて、HEL-1では逆に Phuket 島西岸の方が高くなってしまっている。この相違の原因としては、余震分布の北部における波源の影響が大きいと考えられるため、(2)において議論を行う。

次に各地の津波高について比較すると、HEL-1の方が全体的に高く、調査結果に近い傾向を示した。この相違の原因として、HEL-1におけるスマトラ島北沖での大きな海面上昇が考えられる。すなわち、この海域で発生した津波エネルギーの多くがタイ南西部へ直接来襲していると考えられるため、(4)においてスマトラ島北沖から Nicobar 諸島付近での波源の影響についての議論を行う。

なお、タイ南西部に來襲した津波だけについてみると、上記のように地震発生直後のモデルの方が高くなっている。これは、この付近へ伝播する津波エネルギーの発生している海域に大きなすべり量が配分されていたためであり、インド洋全域についてみると過小評価となる。したがって、津波警報システムにおいては、山中 (2005) が示しているようなより詳細なモデルが必要となるが、解析に時間を要するために地震発生直後の津波予報には使用できないのが現状である。

(2) 24時間余震分布全域および南側のみが破壊した場合の津波高分布の相違

24時間余震分布全域 (HEL-7) および南側のみ (HEL-8) が破壊した場合のタイ南西部における津波高分布の比較を図-5に示す。現地調査によると Khao Lak には Phuket に比べて2倍程度高い津波が來襲して

いるが、HEL-8では逆に Khao Lak の方が Phuket より低くなってしまっている。この傾向は HEL-1と同様のものである。これらの分布の相違より、HEL-1や8のような24時間余震分布の南側のみでの破壊だけではなく、北側での破壊も必要であることが分かる。ただし、HEL-7では Khao Lak が高くなっているが、現地調査結果ほどには大きくなっておらず、地震波解析から推定される以上に北側のすべり量が大きかった可能性を示している。

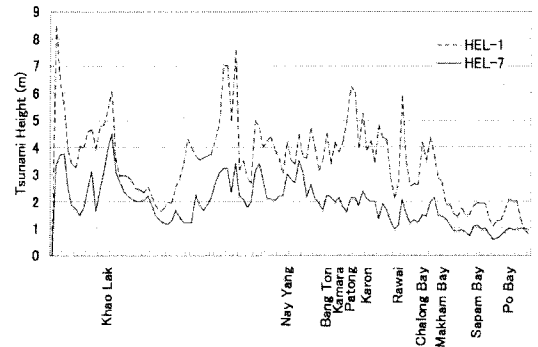


図-4 地震直後に発表された地震モデルと現時点で最新の地震モデルによる比較

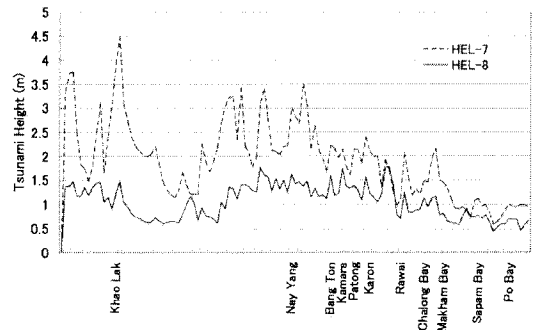


図-5 24時間余震分布全域および南側のみ破壊との比較

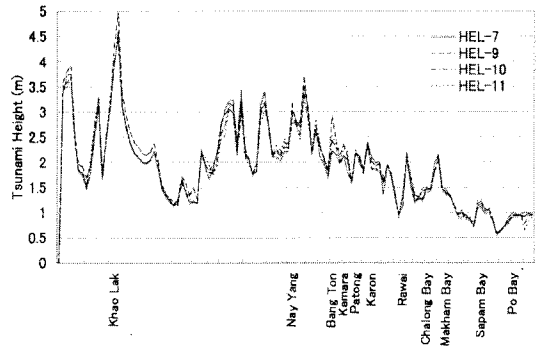


図-6 破壊伝播速度の異なる場合の津波高分布の比較

(3) 破壊伝播速度の相違が津波高分布へ与える影響

全ての小断層を同時に破壊させた(破壊伝播速度を無限大とした)HEL-7, 破壊伝播速度をそれぞれ3.5 km/sと2.4 km/sに設定したHEL-10とHEL-11, 最初に南側半分を破壊させ, その2分後に北側半分を破壊させたHEL-9により計算された津波高分布の比較を図-6に示す。その結果, Khao Lak から Phuket 島西岸にかけて見ると, 津波高の分布に多少のばらつきはあるが, HEL-9が全体的に他のモデルよりも高い津波高の分布を示した。特に, Khao Lak 付近では他のモデルよりも約0.5 m 高くなっている。

しかし, 全体的に見ると, 各モデルの差はわずかであり, Phuket 島東岸ではほぼ一致している。これらのことから, 破壊伝播速度の影響はタイ南西部に襲撃する津波に対しては小さいことが判明した。

(4) Nicobar 諸島付近の滑り量がタイ南西部に襲撃する津波へ与える影響

HEL-7を基準として, Nicobar 諸島の南部のすべり量を1.5倍としたHEL-12と北部のすべり量を1.5倍としたHEL-13から計算された津波高の分布を図-7に示す。両モデルともHEL-7より全体的に津波高が高くなっており, HEL-1以上に調査結果と調和的な計算結果になった。このことはNicobar 諸島周辺で発生した津波エネルギーの多くがタイ南西部に襲撃していること示しており, この付近の波源が同沿岸部に大きな影響を与えていることを明らかにしている。これは(1)においてHEL-1がHEL-7に比べて高い津波高を発生させていた原因を裏付けている。

また, Phuket 島北西部沿岸についてみると, HEL-12よりもHEL-13の方が平均して1 m 程度高くなっている。調査結果によると, この付近とKhao Lakの遡上高の差は2倍程度となっているため, HEL-12の方がこの分布に近い傾向を示している。

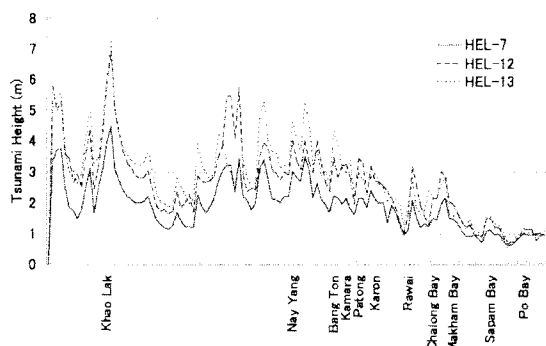


図-7 Nicobar 諸島付近の滑り量がタイ南西部に襲撃する津波へ与える影響

(5) Phuket 島西岸における時間波形の比較

タイ南西部の沿岸の16地点について, 水位の時間変化を出力して解析を行った。その結果, Phuket 島の北部と南部で異なる傾向が見られたので, それぞれを代表する地域として, 北部に位置するNay YangとBang Ton, そして南部に位置するPatongとKaronでの水位の時間波形を図-8に示す。

北部と南部では, 第一波の押し波の継続時間が異なっている。北部では押し波が約1時間程度で続くが, 南部では約半分の30分程度となっている。この相違は, それぞれの地域沖の海底地形と来襲する津波自体の波形に関係するが, 波源に比べてPhuket 島の空間スケールは小さいため, 前者の影響が強いと思われる。

次に, 現地調査から得られている証言について検討を行う。まず, 到達時間であるが, 現地調査により約2時間で津波が来襲したという住民の証言がPhuket 島の多くの場所で得られている。ただし, 時間に関する証言は精度が低くなるため2時間前後と捉えると, いずれの地点でも再現されていると思われる。

また, 住民の証言からは, 多くの場所で引き波が先行したという情報が得られているが, これも計算結果と一致している。プレートテクトニクス的にも, 震源よりタイ側(東側)で沈降が発生していると考えられるので, 妥当な結果である。

他に, 第1波より第2波の方が大きかったという証言もPhuket 島の多くの場所で得られている。しかし, 計

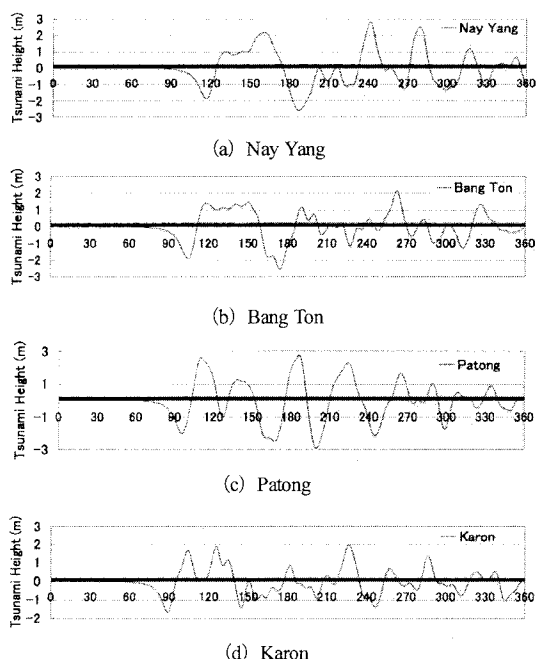


図-8 水位の時間波形

算された時間波形をみてみると、Phuket 島の北部では第2波が大きくなる傾向が現れているが、南部では第1波の方が大きくなっている。南部において、この特徴が再現されていない原因は不明であるが、局所的な地形条件が十分に再現されていない可能性が考えられる。

(6) 現地調査で判明している Khao Lak での局所的に大きな津波の原因

現時点で最も再現性の良い HEL-12を用いて、Khao Lak 付近を中心としたタイ南西部沿岸における詳細な津波伝播の可視化を行い、来襲する津波の挙動を調べた。その結果、Khao Lak 沖にある Similan 諸島周辺の浅い海底地形(図-9)により、津波のエネルギーが捕捉されていることが判明した。

Similan 諸島西方の海底では水深が急に浅くなっており、外洋の深い場所から伝播してきた津波は波速が遅くなるため後方の波が追いつき水位が高くなっている(図-10)。その後、高い水位を維持したまま Khao Lak に来襲するため、Khao Lak 付近で Phuket 島に比べて大きな津波高が発生したものと考えられる。

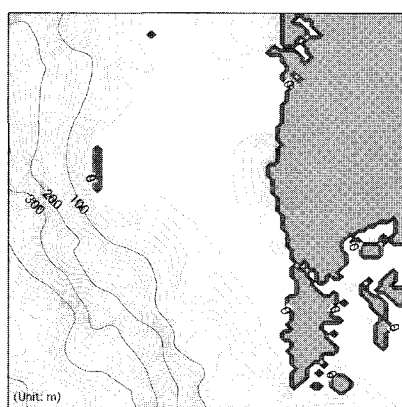


図-9 Similan 諸島周辺の海域地形

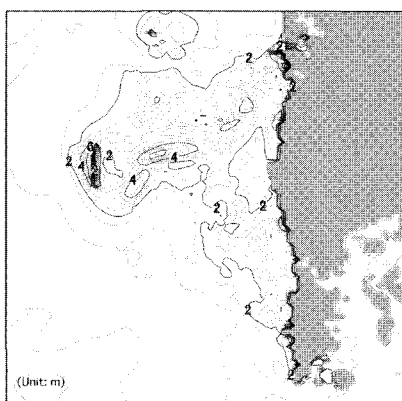


図-10 Similan 諸島周辺での最高水位分布

5. おわりに

本研究で得られた結果は以下の通りである。

(1)HEL-1, 7, 12, 13による津波高分布を比較した結果、スマトラ島北沖から Nicobar 諸島付近の海面変動が Phuket 島に襲する津波へ大きな影響を与えることが判明した。(2)HEL-7と8による津波高分布を比較した結果、現地調査による遡上高の分布を再現するためには24時間余震分布全域での破壊が必要であることが判明した。しかし、Khao lak における10 m を越える遡上高を再現するためには、北側のすべり量をより大きくする必要があることが示された。(3)HEL-7, 9~11による津波高分布を比較した結果、タイ南西部へ襲する津波に関しては破壊伝播速度の影響は小さいことが判明した。(4)Phuket 島西海岸において、到達時間や引き波初動は再現された。第2波が第1波より大きかったという現象は北部では再現されたが、南部では再現されなかった。また、南部に比べて北部では第1波の波長が長かったことが示された。(6)津波伝播の可視化より、Khao lak で局所的に高い津波の原因は、沖にある Similan 諸島周辺の浅海域における津波エネルギーの捕捉であることが判明した。

本稿で行った解析の範囲においては、タイ南西部へ襲した津波を説明するためのモデルとして現時点で最も再現性の良いものは HEL-12である。しかし、本イベントはインド洋全域に襲した巨大な津波であるから、タイ南西部のみの解析だけで、その全体像を決定することは不可能である。今後は、タイ南西部以外の地域での調査データも踏まえたモデルの改良が必要である。

謝辞: 本研究にあたり、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る。

参考文献

- 松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・Seree Supartid(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, 印刷中。
- 山中佳子(2005): 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/EIC161a.html, 参照2005-5-18。
- Geographic Information Network of Alaska, Univ. of Alaska : <http://www.gina.alaska.edu/>, 参照2005-5-18。
- Harvard Seismology: Centroid Moment Tensor Catalog, <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>, 参照 2005-5-18。
- 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.