ミャンマー国エーヤワディ地域における地震・津波のリスク評価 EARTHQUAKES AND TSUNAMI RISK ESTIMATION IN AYEYAWADY DELTA OF MYANMAR

櫻庭 雅明 *・佐藤 誠一 **・石見 和久 ***・木村 健太郎 *** Masaaki SAKURABA, Seiichi SATO, Kazuhisa IWAMI and Kentaro KIMURA

Myanmar is at a high risk from natural disasters such as floods, cyclones, earthquakes and tsunami. Thus, it is necessary to estimate the damage risks of natural disaster in advance. This paper presents earthquake and tsunami risk estimation in Ayeyawady Delta of Myanmar. In this study, recent epicenter and magnitude of earthquake data was collected. Analysis of earthquake frequency in Myanmar was carried out as well as tsunami damage estimation by

numerical simulation. The results present the frequency and the tsunami scale in the typical area of Ayeyawady Delta in Myanmar.

Keywords: Ayeyawady Delta, Earthquake, Tsunami, Numerical Simulation

1. はじめに

ミャンマーは、人口 6,242 万人、国土は日本の 1.8 倍で主 要産業が農業の国である。ミャンマーは 2011 年 3 月の軍政 から民政への移行で世界の注目を集め、その経済発展の潜 在能力の高さから今後大規模かつ急速な開発が見込まれてい る。一方、ミャンマーはその地形的特性から、国内に活断層 をいくつもかかえ、これまで多くの地震による被害が生じている。 また、さらにエーヤワディ管区の沿岸にあるアンダマン海はス マトラ沖から南北に断層が貫いている。図-1 に検討対象位 置図を示す。2004 年 12 月に来襲したスマトラ沖地震によるイ ンド洋津波により被害が生じた。さらに、2008 年のサイクロン Nargis では強風および高波・高潮により死者行方不明者約 14 万人という甚大な被害が生じたことが知られている¹⁾。

ミャンマーは、被害規模の記録が残っている最近 60 年程 度では、洪水およびサイクロンの頻度が高い²⁰。また、頻度 は少ないが発生の際には甚大な被害が予想されるのは地震 および津波である。ミャンマーに発生した地震は、1912 年に シャン州で発生したマグニチュード 8 が記録上最大であるが、 1839 年、1930 年にもマンダレー管区とヤンゴン管区で大地 震があり、それぞれ被害が生じた。また、2004 年のスマトラ 沖地震によるインド洋津波ではエーヤワディ管区で死者 61 人、 負傷者 42 人、被災者 2,592 人、倒壊家屋 601 棟の被害が 生じている²⁰。

ミャンマーでは、前述のとおり、沿岸部に断層があり、西 側を抜けているが、近傍で地震は発生しておらず地震エネ ルギーを保存しており、今後巨大地震が発生する危険性が ある。さらに、ミャンマーのデルタ地域(エーヤワディ管区) は標高の低い地域が広がり津波の来襲による甚大な被害が 懸念される。

本検討では、ミャンマーのエーヤワディ管区周辺における 地震および津波の被害想定を行ったものである。地震の検 討は、過去に発生した地震の震源および規模(マグニチュー ド)から沿岸部で発生する地震の発生頻度と確率を算定した。 また、津波に寄与する断層を設定して、発生頻度の高い津 波(レベル1津波)および最大クラスの津波(レベル2津 波)を想定した。これらの津波条件に対して津波シミュレーショ ンを実施して、エーヤワディ管区全域およびモデル地域であ る Labutta の浸水想定を行った。この結果からレベル1、2 津波に対する浸水被害規模について考察を行った。

なお、本研究はJICA プロジェクト「ヤンゴン港・内陸水運 施設改修プロジェクト」の成果の一部をまとめたものである。





^{*} 技術本部 中央研究所 総合技術開発部

^{**} コンサルタント国内事業本部 流域・都市事業部 地盤環境部

^{***} コンサルタント海外事業本部 アジア推進事業部 アジア事業推進室

2. 現地調査

(1) 津波被害の状況

2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ沖地震による津波は ミャンマーのデルタ地域まで来襲しており、一部で浸水被害が 生じている。現地の浸水深や浸水範囲について詳細に報告さ れた事例は少ないが、エーヤワディ東部の一部集落(Aing Hlaing village)で浸水が生じた事例がある。図-2 にその 浸水被害の写真を示す。家屋の一部が損壊しており、1m 程 度の浸水が生じていることが分かる。

(2) 現地踏査

地震・津波の検討に先立ってエーヤワディの西側にある Ywe川およびその上流の集落であるLabuttaの現地踏査を 行った。なお、踏査の際に現地ヒアリングを行って、被害状況 を推定するための基礎資料とした。なお、被害については津 波被害のみでなく、Nargis 来襲時の高潮による浸水状況も合 わせて行っている。ヒアリング実施の状況は図-3に示すとお りである。ほぼすべての地域でサイクロン Nargis で 1m 前後



図-2 インド洋津波によるデルタ地域の浸水被害



の浸水が見られているのに対して、津波による被害は殆ど見ら れていない。Ywe川および Labutta はエーヤワディのやや 西側の地域であり、当時の津波の規模が比較的小さかったた めであると考えられる。

3. エーヤワディ地域における地震発生頻度の評価

(1) ミャンマー国周辺の地震の発生状況

次にミャンマー全域における地震の発生状況を検討した。 図-4にミャンマー近傍における地震の発生状況(震源分布) を示す。これまでミャンマーでは多くの地震が発生しており、 1900年からマグニチュード 4.8以上の地震が合計で 760回 記録されている。この図では、スマトラ沖周辺で数多くの記録 が見られているが、ミャンマー国内でも高い頻度で発生してい ることが分かる。

(2) 地震の確率的評価

USGS の地震データベースより、インド-オーストラリア プレートで発生した過去の地震記録(1973 ~ 2012 年)を 抽出した。このデータベースから抽出した地震の震源分布を 図-5 に示す。また、マグニチュード 5.0 以上の発生状況を 示したもの(1973 年以降を抜粋)が図-6 である。この結 果から分かるように、2004 年のスマトラ沖地震以降にマグニ チュード 8.0 以上の地震が多数発生していることが分かる。

本検討では、ミャンマーのエーヤワディ沿岸における津波の 来襲・浸水規模について検討することを目的としている。地震 および津波の規模は、日本の津波レベルの考え方と同様に位 置づけるものとした。具体的には以下の2種類とした。



- 発生頻度の高い津波(レベル1津波、以下L1津波) に対しては、可能な限り構造物で人命・財産を守り切る「防災」を目指すもの。
- 発生頻度は低いが沿岸域への影響が甚大な最大クラスの津波(レベル2津波、以下L2津波)に対しては、 最低限人命を守り、被害をできるだけ小さくする「減災」 を目指す。

なお、日本ではL1 津波は設計津波、L2 は想定最大クラ スの位置づけになるが、ミャンマーにおいて日本と同等の対策 施設の整備は現実的でない。ここでいうL1、L2 津波はその 発生頻度に対する津波浸水想定の把握を目的として位置づけ た。地震の発生頻度の設定は、USGS の地震データを用いて、 地震規模と発生確率の関係を求めた。地震規模と発生確率の 関係を求めるにあたっては、グーテンベルグ・リヒター式を用 いた。グーテンベルグ・リヒター式は、データの対象期間にお ける地震規模別の地震発生回数から年発生回数を求め、この 逆数をとることにより、地震規模ごとの発生確率を統計的見地 から算出するものである。図-7 に地震規模 (マグニチュード) と地震発生回数の関係を示す。この結果をグーテンベルグ・



0 250 500 750 1000



リヒター式に当てはめる。また、図-8に示すような断層をL2 津波の条件として想定した場合に、断層規模とモーメントマグ ニチュードの関係から Mwを求めると9.4と推定できる。なお、 L1 は後述のとおり Mw=9.0としている。これより当該プレート 境界部において L1 津波、L2 津波を生じさせる規模の地震発 生確率をグーテンベルグ・リヒター式から算定すると以下のと おりとなる。



図-7 地震規模と地震発生回数の関係



図-8 ミャンマー沿岸を想定した断層モデル(緑色:2004年 スマトラ沖地震、赤色:本検討で追加) 出典:USGS

- L1 津波(Mw=9.0):年間想定発生回数:0.0217回(約 45年に一度発生する確率)
- L2 津波(Mw=9.4):年間想定発生回数:0.0113回(約 90年に一度発生する確率)

上記の結果より、L1とL2の発生頻度が2倍程度と小さい。 日本周辺におけるグーテンベルグ・リヒター式の算定結果によ れば M9.4 クラスで 300 年に一回程度と推定できたが、イン ドーオーストラリアプレートを対象とした場合、発生確率が非常 に高くなる。これは2004年スマトラ沖地震以降、当該プレー トの活動が非常に活発であることによる。日本で想定されるL1 およびL2の発生頻度とは違いが生じているが、震源の位置 により津波の規模が異なり、次に示す断層モデルにより最終的 な条件を設定した。

(3) 断層モデルの検討

津波の来襲・浸水予測を検討するにあたり、断層モデルを 検討した。断層モデルの基本として、2004年スマトラ地震津 波の断層モデルを用いた。なお、ミャンマーでの津波規模が 大きくなることを想定して、北部空白域も連動することを仮定 した(図-8緑色のセグメント参照)。北部空白域では、スマ トラ地震の余震はほとんど発生していないが(図-8の黄丸 が余震震源)、地震そのものが発生しない区域ではないため、 将来的に連動した地震が発生する可能性がある。なお、当該 地域では過去約3000年に4回の活動が900年間隔で発生 していることが地形や堆積物年代測定調査で明らかとされてい る(西海岸 ManAung 島)。既往最大津波に加え、科学的 知見を持って考えうる可能性を考慮した最大クラスの津波(L2 津波)を設定する必要があることから、ミャンマー国西部のサ ブダクション構造も津波断層として考慮し、断層モデルを設定 した。なお、宍倉ら³⁾によれば、ミャンマーの西方沖には、 2004年スマトラーアンダマン地震の震源域から連続する沈み 込みプレート境界が横たわっている。ミャンマー西方沖の沈み 込み境界でインドプレートがビルマプレートに対して年間約10 mm/年の速度で、北北東に沈み込みつつあると推定され、 数百年間隔で海溝型プレート間地震が発生していると考えられ ているとされている。地震の発生間隔は数百年と考えられてい るが、前述のとおり、スマトラ沖地震以降の地震活動の活発化 により発生頻度は短くなる。また、2004年スマトラ沖地震津波 の断層とインド洋津波の断層+ミャンマー西部サブダクション 構造を含めた断層のそれぞれモーメントマグニチュードは9.0 および 9.4 と推定されるが、対象とする地域の到達する津波の 規模は断層の存在する位置に依存する。このことから、2004 年スマトラ沖地震津波(当該地域における既往最大津波)を L1 津波、インド洋津波の断層 + ミャンマー西部サブダクション 構造を含めた断層をL2 津波にすることで概ね津波規模を説 明できると仮定して採用している。

4. 津波リスクの検討

(1) 計算条件

前述の地震・断層モデルの検討結果から、L1 津波および L2 津波の条件を設定した。断層パラメータは表-1に示すと おりである。なお、この断層パラメータは、2004年インド洋津 波における断層パラメータを東北大4)が設定したものであり、 L2 津波の条件はそれを拡張したものである。津波の来襲・浸 水状況の検証・予測にあたっては、津波シミュレーションを採 用した。津波シミュレーションのモデルおよび計算方法は、「津 波浸水想定設定の手引き」5) に示されたものと同等のものを 用いているため、説明は割愛する。計算条件は、表-1に示 すとおりであり、計算格子は対象とする計算範囲の格子間隔を 徐々に細かくするネスティング手法を採用した。なお、今回の 検討では、Ywe 川上流 30km 程度に位置する Labutta に 着目している。計算範囲は図-9に示すとおりであり、広域 はベンガル湾およびアンダマン海を包括できるようにしている。 最小メッシュ幅は10m であり、Labutta 周辺を包括している。 津波シミュレーションに必要となるメッシュごとの粗度係数は、小 谷らの手法を基本とするが、それに必要となる土地利用は「ミャ ンマー国 国家復興開発計画のための地理情報データベース

表-1 津波シミュレーションの計算条件

項目	内容
計算格子間隔	$1800m \Rightarrow 600m \Rightarrow 200m \Rightarrow$ $50m \Rightarrow 10m の格子を接続して、水位・流量を境界条件として与えた。$
計算時間間隔	1.0 秒
計算時間	地震発生から16時間
計算格子の測地系	WGS 1984
計算格子の座標系	UTM 54N
基本方程式と解法	非線形長波理論式 Leap-Frog 差分法
沖側境界と接続境界	沖側境界は自由透過とし、接続境 界は水位と流量を接続
遡上境界条件	陸域では小谷ほか(1998)の遡上 境界条件とし、他は完全反射。
地震断層モデル	2004IndianOceanEarthquake (東北大モデル)北部空白域も上記断層パラメータを参考に設定
潮位条件	1.44m(L2 津波、満潮位)
地盤変位条件	沈降は考慮し、隆起は考慮しない
底面摩擦モデル	Manningの粗度係数を土地利用に 応じて設定
構造物モデル	200m、50m、10m 領域において、 YWE 川右岸のみ設定

構築調査(2004年8月)」の報告に従った。また、この報告 で得られない範囲の土地利用は、衛星画像(Landsat-7)で 補足した。図-10に土地利用の分布を示す。また、Ywe川 の堤防高を設定にあたっては、現地調査の結果を反映した。

(2) 河川の地形モデルの設定

エーヤワディのデルタ地帯は、図-10の土地利用から判 断できるように、大小の河川が非常に多くあることが分かる。 津波の来襲の状況を推定するにあたっては、これらの河川を 考慮する必要がある。しかしながら、ほぼ全ての河川は縦横 断測量の成果が存在しないことから、地形データとして作成す るためには工夫が必要となる。本検討では、すべての河川の 測量を行っていないため、YWE川で行われた縦横断測量、 Pathein川および Pya Ma Law川で行われた縦断測量の成 果を用い、河道の類型設定を行い、その他の河川に対して川 幅から設定できるようにした。具体的には、図-11に示すよ うな河道に対して左右岸、中央に流路があるケースに分類し、 川幅から水深を設定した。なお、本検討に用いたメッシュデー







図-10 土地利用状況



タは Ywe 川周辺以外は 200m メッシュとなっているため、解像度はそれ以下として評価されないため、上記方法は概略で はあるが、水深データの得られない地域としては十分であると 判断した。最終的に作成したメッシュ(河道内標高分布)を 図-12 に示す。

(3) 2004 年インド洋津波による検証(L1津波の検討)

津波シミュレーションの妥当性を検証するために、2004年 インド洋津波の再現計算を行った。エーヤワディ全域の最大 津波高さの分布を図-13に示す。エーヤワディデルタ周辺は 複雑な海岸線を有しており、水深は非常に浅い地域となって いる。この地形特性の影響により、最大津波高は各地で局所 的に異なるが、概ね 3m 程度となる。なお、検討対象とした Labuttaでは 2m 程度の高さとなった。なお、2004年のイン ド洋津波は、当該地域では観測記録・痕跡記録は存在しない。 計算の整合性を確認するためには、現地でのヒアリング結果に 基づき、各地点の河川水位が堤防や船着き場の天端近くまで 上がったという証言に基づき比較した。図-14に水位観測地 点(目視観測の BM があるのみ)の標高と本計算の最大水 位の比較を示す。当該地区は浸水しない結果であり、シミュレー ションも同等の結果となった。







(4) 最大クラスの津波における想定(L2津波の検討)

次に、前述の断層モデルの検討で設定した L2 津波について検討した。断層モデルは図-8に示したとおり、ミャンマーの西岸を抜ける条件となっており、2004 年インド洋津波に比べてミャンマー全域に厳しい条件となっている。この条件でエーヤワディデルタ周辺および Labutta 沿岸における津波最大水位分布および津波の時間変化を図-15~図-16 に示す。Ywe 川河口での最大津波高は 4.3m、Labutta で 3.0mの津波が来ることが予測される。また、Pathein 川では約 30分で 6m 近い津波が来襲することが予想され、エーヤワディ西側で津波が高くなることがこの結果より分かる。

(5) 津波アニメーションによる防災啓発

本検討で実施した津波シミュレーションをできるだけ関係者 にわかりやすく見せることを目的として、津波動画(アニメー ション)を作成している。津波動画の作成にあたっては、レ ンダリングソフトの Pov-Ray⁶⁾を用いて、津波計算結果のコ マ撮りからアニメーションを作成している。また、現地の状況 はオルソ画像を重ねて表現している。広域の計算から津波 の伝播状況が分かるように広域、エーヤワディデルタ全域、 Labutta 周辺のそれぞれにおける鳥瞰図をベースとしてアニ メーションを作成した。アニメーションのスナップショットを 図-17 に示す。この結果より予想される L2 津波の条件では エーヤワディデルタの広い範囲で浸水が生じることが見て取 れ、Labutta 周辺でも広い範囲で浸水することが分かる。

5. おわりに

本研究では、既存資料からミャンマーにおける地震の発生 頻度および確率を算定した。また、現地ヒアリング・測量の結 果を用いて津波リスクに関する検討を数値シミュレーションを用 いて行った。その結果、最大クラスとして想定した津波に対し てはエーヤワディデルタのほぼ全域で浸水し、場所によっては 地震発生後1時間以内で津波が来襲することが確認された。 今後、ミャンマーにおける津波規模の定義、浸水想定および 防災啓発のための基礎資料およびツールとして本成果は活用 できるものと考えている。



図-15 L2 津波における最大水位分布



図-16 各地点における津波高時刻歴(上図:Pathein 川河口、 下図: Labutta 周辺)



図-17 津波アニメーションのスナップショット(左図:第1波 Labutta周辺来襲時、右図:第2波エーヤワディ来襲時)

参考文献

- 1) DMH, DRR et al.: Hazard Profile of Myanmar, 2009
- 田平由希子、川崎昭如、市原裕之:民政移行後のミャンマー中 央政府の防災体制と今後の課題、地域安全学会論文集、No.21、 pp.189-198、2013
- 3) 宍倉正展・岡村行信・藤野滋弘:ミャンマー西海岸古地震調査 報告、活断層研究センターニュース、No.76、pp.1-3、2007
- 4) 木村健太郎・石見和久・佐藤誠一・福田忠弘・三上勉・菊池茂: スマトラ沖地震津波被害実態調査に基づく波源モデルの検証と建物 被害関数の提案、海岸工学論文集、Vol.53、pp.301-305、2006
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室・国土交通省国土技術 政策総合研究所河川研究部海岸研究室:津波浸水想定設定の手 引きver2.0、2012
- 6) Pov-Ray ホームページ:http://www.povray.org/