

サイクロンNargisによるイラワジ河デルタ地帯の高潮被災・浸水調査

Survey of Storm Surge Induced by Cyclone Nargis in Ayeyarwaddy Delta

岡安章夫¹・下園武範²・Myo Minn Thein³・Toe Toe Aung⁴・松林由里子⁵

Akio OKAYASU, Takenori SHIMOZONO, Myo Minn Thein, Toe Toe Aung and Yuriko MATSUBAYASHI

A field survey of the storm surge inundation induced by Cyclone Nargis was conducted in Ayeyarwaddy Delta, Myanmar in a period of July 3rd to July 7th, 2008. Inundation heights were measured at five townships, Kungyangon, Dedaye, Pyapon, Bogale and Labutta. After tidal correction using a tidal chart provided by Myanmar Port Authority, it was found that the storm surge anomaly had been up to 4.7 m at Labutta where the cyclone had had a landfall. It became less than 2 m around Bogale Area, but again showed a large value of nearly 4 m in Kungyangon Area, south of Yangon. Disagreement of inundation conditions were found in some areas, such as Labutta and Bogale with previously obtained inundation maps composed from satellite images.

1. はじめに

サイクロンNargisは2008年5月2日夕刻(現地時間)にミャンマー南西部に上陸後、イラワジ河デルタ地帯を横断、主にその高潮により、死者・行方不明者約14万人(UNISDR 国連国際防災戦略, 2009)に上る同国史上最大規模の災害被害をもたらした。

IMD (India Meteorological Department インド気象局)の発表およびJTWC (Joint Typhoon Warning Center 合同台風警報センター)のベストトラック・データ (Joint Typhoon Warning Center, 2008)によると、2008年4月27日午前3時(協定世界時)にインド洋ベンガル湾で発生した熱帯性低気圧は、4月28日午前0時にインド、Chennaiの東550kmの海上でサイクロンNargisとなった。Nargisは29日未明には1分間平均風速160km/hの非常に強力なサイクロンに発達し、バングラデシュまたはインド南部に上陸するものと予想されたが、その後東向きに転じ、5月2日未明には風速215km/hのカテゴリー4(サファ・シンプソン・スケール)サイクロンとなり、2日正午にミャンマーのイラワジ地方に上陸した。上陸後イラワジ河デルタ地帯を東北東に横断する形で河口デルタ地帯に大規模な高潮をもたらし、3日0時にYangonの東25kmを風速130km/hの勢力で通過、その後北東に向け進行、ミャンマー-タイ国境付近で消滅した。

JTWCによれば、Nargisは2日18時(協定世界時)にデルタ地帯中央部のBogaleの北東25kmをカテゴリー3となって通過している。ミャンマー標準時は協定世界時に対

して+6時間半であるので、現地時間ではNargis上陸が5月2日の夕刻、イラワジ河デルタ地帯の通過が2日の夜から3日早朝にかけてとなり、この夜間のサイクロン襲来が多大人的被害をもたらした大きな要因の一つであると考えられる。

高潮災害の早期被害予測や救援には、迅速な浸水域の評価が必要となる。近年リモートセンシング技術の向上に伴い、衛星画像等の解析によってこれら高潮災害評価を行う例が増加している。たとえばUNOSAT(国連衛星プロジェクト)はサイクロンNargisによる浸水についてNASAの衛星画像データを用いた早期の浸水域評価を行い(UNOSAT, 2008)、災害援助に役立てている。

しかしながら、的確な被害の要因分析や今後の高潮防災対策を検討するためには、もたらされた高潮偏差や浸水高の精度良い評価が不可欠である。衛星画像解析等のリモートセンシングからでは、ほとんどの場合浸水深に関するデータは得られない。また、浸水域についても、衛星画像によるものは、早期に水が引いた領域や樹林帯などで正確な値が得られず、ピーク浸水高の推算や高潮追算などの検証に支障を来す。

正確な浸水高や高潮偏差の評価には、実地調査が欠かせないが、Nargisによる高潮災害については、被災地での交通手段が未発達であり、またミャンマーの国情とあいまって、調査が非常に困難であった。その中で、平石(2009)や柴山ら(2008)はYangon港やYangon河周辺で精力的に調査を行ったが、被災地の中心部での調査は行われていない。そこで本研究では、Nargisによる高潮災害の被災地域の広い範囲で、被災状況の検分と浸水状況の調査、測量を行った。これにより、イラワジ河デルタ地帯の広範な地域に渡って、高潮による被害実態の調査、浸水深の整理、高潮偏差の正確な評価を行い、あわせて衛星画像解析結果との齟齬について検討を行った。

1	正会員	工博	東京海洋大学教授 海洋科学部
2	正会員	博(工)	東京海洋大学助教 海洋科学部
3		修(工)	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科
4			東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科
5		修(工)	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科

2. 被災状況と浸水高調査

2008年7月3日～7日の期間に、被災地域の広い範囲を踏査し、被災状況の調査と浸水深の計測を行った。この期間、当該地域では外国人の立ち入りが厳しく制限されており、現地踏査チームはミャンマー人のみの構成となった。以下に、調査地点、調査方法の概略と各所における被災状況と浸水高調査の結果を示す。

(1) 調査グループと調査行程

限られた日程においてより広い範囲調査が行えるよう、著者らのうちの各1名がリーダーとなる現地調査班を2グループ（Group IおよびII）組織し、被災地域の踏査を行った。各調査班の構成員数は調査行程により2名から4名で、著者以外の構成員はMyanmar Maritime University（ミャンマー海事大学）のスタッフまたは地元建設会社の技術者である。これら調査班はYangonを拠点とし、Yangonに常駐する本隊と携帯電話により随時連絡をとり、調査行程・地点の選定や、調査地点での対象の抽出等を協議しながら踏査を行った。

調査においては、計測地点の緯度・経度をGPSにより計測し、地盤高・浸水高は水準器および測量スタッフによった。このとき、高さの基準は計測時の海面または近隣の河川水面とした。あわせて、被害の様子をデジタルカメラ等で記録した。図-1に調査行程と、潮位補正前の浸水高計測結果の代表値を示す。図中細い一点鎖線がサイクロンの軌跡である。詳細については次節以降に記述する。

(2) 調査地点での被災状況と浸水高計測の詳細

各行程における調査の概要と浸水高の計測結果（潮位

補正前）について以下に記述する。浸水高の計測は各所で行ったが、高潮浸水調査においては、平均水面の変化と波浪の重合により適切な浸水高の判定が難しい。特に今回調査領域では、サイクロン襲来が夜間であったことや、家屋の流出と多数の犠牲者により信憑性の高い痕跡・証言が少なく、以下には多くの計測から信頼のおける代表的計測についてのみ記述する。

a) Kungyangon, Latkhotekone

7月3日の調査初日はYangon市内での事前調整の後、2つのグループ合同でYangonの南、Kungyangon地域にて調査を行った。Kungyangon市においては、高潮による顕著な被害が見られ、 $N16^{\circ}25'57''$ 、 $E96^{\circ}00'59''$ の地点では、浸水が地盤上2m、調査時の河川水面上2.46 mにもおよんだことがわかった。

その後のAndaman海に面したLatkhotekone Beachで海岸から内陸部への2断面において計測を行った。図-2にそのうちの1カ所（ $N16^{\circ}20'22''$ 、 $E94^{\circ}9'59''$ ）の海岸からの縦断地形と計測した浸水高を示す。図中の水位は計測時海面からの高潮痕跡高であり、カッコ内は潮位補正後の高潮偏差を表す。この海岸における浸水高は、大潮時の高潮面を0.5mほど上回っただけであり、背後の集落における浸水深は地盤上1m程度であった。この海岸地帯ではさほど大きな被害は生じていない。また、付近に前面がマングローブに覆われた海岸があり、そこでも同様の浸水高計測を行ったが、マングローブ林の浸水高への影響はほとんどなかったことが分かった。

b) Dedaye

7月4日Group IIはYangonの南西約50kmのDedaye市周辺にて調査を行った。まずDedayeからイラワジ河の支流

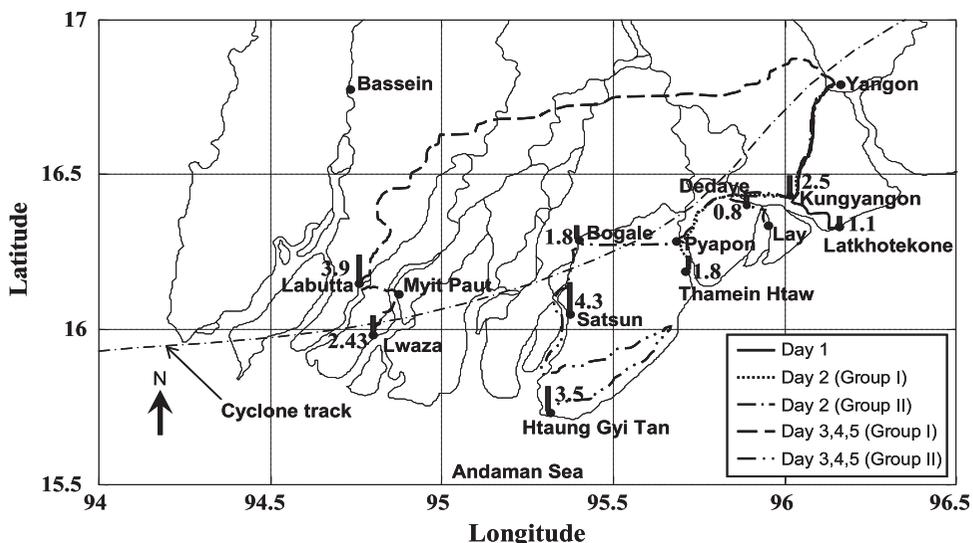


図-1 調査行程と潮位補正前の浸水高さ（単位：m）

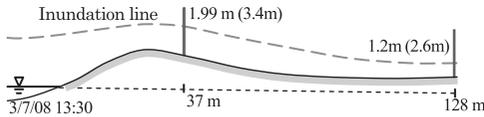


図-2 海岸の砂堆を越えて浸水した高潮の計測時海面からの浸水高 (カッコ内は潮位補正後の値, Latkhotekone Beach)



写真-2 浸水高を指し示す住民 (Bogale市街)



写真-1 破壊されたパゴダ (Lay村)

のToe河沿いにボートで南下し, Lay村 (N16° 20' 35", E95° 57' 03") にて被災の状況を検分した. Lay村においてはすべての家屋が浸水し, そのほとんどの家屋とパゴダおよびレンガ造りの学校が破壊された. 浸水高は調査時の水面から2.3m (潮位補正後の高潮偏差は1.8m) および2.0mであった. 写真-1に破壊されたパゴダを示す.

Lay村からの帰路, Dedaye市内のToe河畔にて浸水高の計測を行った. 調査時にはほぼ満潮であったため, 水面から計測した家屋の浸水跡までは0.81m (潮位補正後の偏差2.11m) であった.

c) Pyapon, Thamein Htaw

7月4日 Group IはYangonの南西約75kmのPyapon市周辺にて調査を行った. Pyapon市周辺は非常に平坦で, 地盤高は通常の高潮位から1m程度である. 図-3はPyapon河から少し離れたAphaung支流沿いのThamein Htaw村 (N16° 10' 45", E95° 41' 35") の浸水状況の模式図 (カッコ内は潮位補正後の値) である. 左端の河川支流から海水が流れ込んできたことが見て取れるが, 図左端の橋付近の計測高が大きいので, 支流からのスプラッシュを計測している可能性がある.

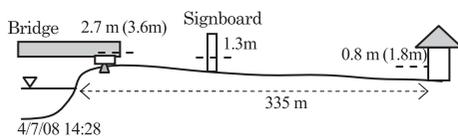


図-3 河川の支流から氾濫したと思われる地域の浸水状況 (Thamein Htaw村)

d) Bogale, Htaung Gyi Tan

Group IIは今回の高潮被害の最も大きかった地域の一つである, Yangonの南西約100kmのBogale市周辺を7月5日から3日間かけて調査した. Bogale市はBogale河河口から約65km上流の地点にあるが, 激しい風と高潮のため, 市内の90%近くの家屋が倒壊した. 港近くの調査ポイントでの計測では浸水高は1.75m (潮位補正後の高潮偏差は1.85m) であった. 写真-2はBogale市街であるが, UNOSATによる衛星画像解析ではBogale周辺に湛水領域は認められず, 画像解析と今回の実地調査結果とが大きく食い違っている.

Bogale市からボートによりBogale河を南下し, 途中Bogale河左岸のSatsan村付近 (N16° 03' 28", E95° 22' 09") で4.3m (潮位補正後の偏差1.5m) の浸水高を計測した. この村は対岸 (西側) のMein-ma-hla島によって部分的に遮蔽されており, 対岸に比ベ木々の損傷が明らかに小さかった.

Bogale河は非常に広く, 調査時の波浪も大きかったため, その後は支流を進み, Bogale河口近くHtaung Gyi Tan村の海岸 (N15° 42' 58", E95° 17' 34") で浸水高の計測を行った. ここは地盤高が比較的高く, 高潮はそれほど大きくはなかったとの住民の証言が得られた. ここでの浸水高は3.45m (潮位補正後の偏差は2.55m) であった.

e) Labutta, Lwaza

Group Iは7月3~5日の3日間, Yangonの西南西約165kmのLabutta市からさらに南側の地域の調査を行った. この地域はサイクロンが上陸直後に通過し, 甚大な被害をもたらした. 陸路での移動がほとんど不可能なので, ここでも移動にはボートを利用した.

写真-3はPyan-ma-law河の左岸 (東側), Labuttaの東南東15kmに位置するMyit Paut村 (N16° 06' 25", E94° 52' 35") での浸水高のイメージである. ここでの浸水高の計測値は2.65m (潮位補正後の高潮偏差4.05m) であった.

写真-4はLabutta市の南約20km, Lwaza村 (N15° 58' 53", E94° 47' 57") 北側の僧院跡の写真である. この僧院



写真-3 Myit Paut 村での浸水高のイメージ



写真-4 高潮により破壊された僧院の跡（Lwaza 村）



写真-5 200m近く移動したコンクリート製貯水槽（Lwaza 村）

は村で最も堅牢な建物であったため、高潮来襲時に多くの村民が避難していたが、基礎を残して倒壊し、500名近くが犠牲となった。また写真-5では、矢印に示したとおり、直径2.5mのコンクリート製貯水タンクが飛ばされ、高潮の猛威が伺える。また、Labutta市内の船着場付近(N16°08'45", E94°45'41")で行った計測では、3.9m(潮位補正後の偏差4.7m)の浸水高を計測した。

3. 潮位補正および衛星解析データとの比較

(1) 潮位の補正

計測した浸水高から高潮偏差を得るには、浸水高計測時の潮位と高潮来襲時の潮位の差を勘案した潮位補正が必要である。実測潮位記録が入手できれば、少なくとも潮位記録点での高潮偏差が求められるが、Yangon河口も含めミャンマー国内に設置されている潮位計は1990年

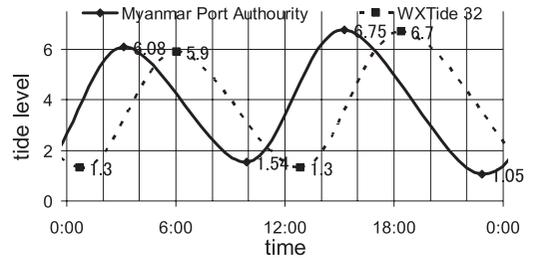


図-4 ミャンマー港湾局潮位表を補間して得たElephant Pointでの予測潮位とWXTide32による計算潮位の比較

代以来稼働していない。また、ミャンマー南部が面するAndaman海の北端、Martaban湾は非常に勾配が緩く浅いため、潮汐の振幅と位相が場所により大きく変化する。従って本調査での対象領域全域で精度よく高潮偏差を評価するためには、比較的広い範囲での天文潮の推算が必要である。

そこで、まずSatakeら(2006)と同様、全球規模で潮位推算ができる計算ソフトウェア、WXTide32を用いて潮位の計算を行った。図-4はYangon河口のElephant Pointにおける2008年7月3日のWXTide32による計算潮位とミャンマー港湾局が作成している同地点での潮位表から補間した潮位変化の比較である。図から両者の振幅はよく一致しているものの、3時間程度の位相差があることが見て取れる。

Yangon港はミャンマーの主要港で国際港湾であり、またYangon港南と河口のElephant Point沖には浅瀬があり、喫水の大きい船舶は潮位を勘案しないと通行できない。このことと、Elephant Pointに近いLatkhotekoneでの現地踏査時の潮位情報も検証した結果、ミャンマー港湾局作成による潮位表が信頼できるものと判断した。イラワジ河デルタ全域については、調査時の満潮時刻の情報などを用いて、デルタ南岸に沿って位相差を線形に補間した。ただし、デルタ内の河川の水深は不明であるので、河川上流部の潮位については誤差があるものと考えられる。

(2) 高潮偏差と衛星画像解析データとの比較

上記による潮位補正を行った後の高潮偏差の代表値を、衛星画像解析による浸水域データ(図中のグレーの部分、UNOSAT作成図から転記)と併せて図-5に示す。対象地域では潮位振幅が大きいため、図-1では浸水高にばらつきが見られたが、図-5からは系統的な高潮偏差の分布が見取れる。すなわちNargisによる高潮偏差は上陸直後の、Labutta市周辺で4.7m程度と極めて大きく、その後デルタ中部のBogale市付近ではやや小さくなるものの、Yangon市の南に位置する海岸付近で再び3.5mから4m近い値となっている。このことは、サイクロンの勢力が若干衰えてもかなり大きな高潮偏差があったことを示

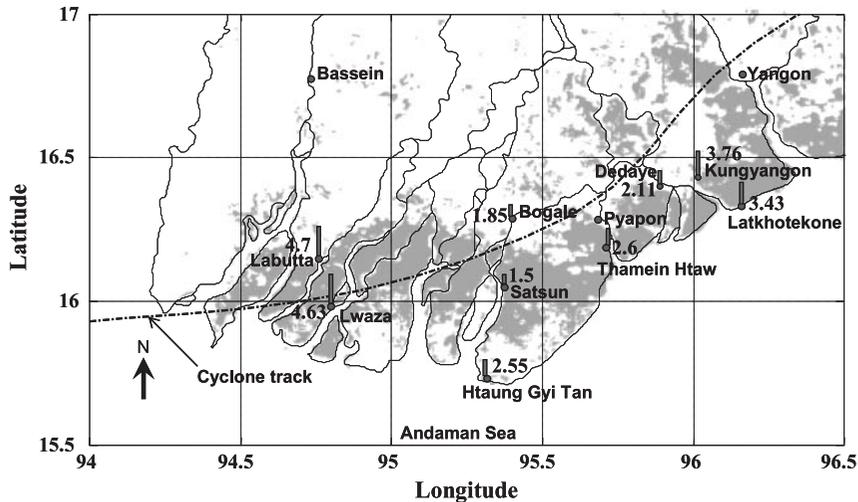


図-5 潮位補正後の高潮偏差 (単位: m) と衛星画像解析による浸水域 (グレーの領域; UNOSAT図より転記)

すとともに、風向きや地形の影響が大きかった可能性を示唆するものと考えられる。

また、図中のグレーの部分との比較で見ると、Labutta市、Bogale市のほか、南部海岸のHtaung Gyi Tan村などでも、衛星画像解析からは判断できない大きな高潮偏差が得られており、この結果は今後行われる高潮推算検証時の貴重なデータとなると考えられる。

4. おわりに

本研究では、実地の調査がほとんど行われなかったサイクロンNargisによる高潮の被災および浸水調査を、イラワジ河デルタ地帯の広範な領域で行った。これにより各所での浸水高を確定すると共に、ミャンマー港湾局潮位表を用いて高潮偏差を推算した。

今後、これらのデータを用いた高潮推算の検証や防災対策の検討が重要と考えられるが、この地域においては、潮位記録や波浪データ、水深マップや地盤高データなどの基礎的なデータの多くが入手困難であり、広範な協調体制のもとデータ収集に努める必要があると思われる。

また、サイクロン来襲前後の衛星画像から得られる湛水域の解析データは、踏査データと大きく食い違う場合があり、衛星画像解析は初期救援には大きな効果を発揮するものの、その後の被災評価や高潮推算の検証データとして用いる場合には注意が必要であると考えられる。

最後に、本調査に協力いただいた、Myanmar Maritime UniversityとPemco Construction Companyの各位、現地の

状況について貴重なご助言いただいたJICAミャンマー事務所の梅崎路子所長に謝意を表す。また、本研究は東京海洋大学の緊急調査研究費によるものであることを付記する。

参考文献

- 柴山知也・高木泰士・Hnu Ngun (2008) : 2008年サイクロンNargisの被災状況調査報告, 自然災害科学, Vol.27, No.3, pp.331-338.
- 平石哲也 (2009) : ヤンゴン港における2008年高潮被害に関する現地調査, 港湾空港技術研究所資料, No.1192, 16p.
- Joint Typhoon Warning Center (2008) : JTWC tropical cyclone best track data, Northern Indian Ocean, 2008_1001, URL http://metocph.nmci.navy.mil/jtwc/best_tracks/2008/2008s-bio/bio012008.txt.
- Satake, K., Than Tin Aung, Y. Sawai, Y. Okamura, Kyaw Soe Wing, Wing Swe, Chit Swe, Tint Lwin Swe, Soe Thura Tun, Maung Maung Soe, Thant Zin Oo and Saw Htwe Zaw (2006) : Tsunami heights and damage along the Myanmar coast from the December 2004 Sumatra-Andaman earthquake, Earth Planets Space, Vol.58, pp.243-252.
- UNISDR/United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2009) : 2008 disasters in numbers, URL <http://www.unisdr.org/eng/media-room/facts-sheets/2008-disasters-in-numbers-ISDR-CRED.pdf>.
- UNOSAT/United Nations Institute for Training and Research Operational Satellite Applications Programme (2008) : Flood assessment for Cyclone Nargis affected Ayeyarwady Division, Myanmar, International Charter Space and Major Disasters, Product ID: 1173 - 6 May, 2008 - English, URL http://unosat.web.cern.ch/unosat/freeproducts/Myanmar/CycloneNargis/UNOSAT_Myanmar_CycloneNargis_MODISFloods5May2008_Highres_v1.pdf.