サイクロンNARGISによる高潮調査と氾濫挙動の分析

FIELD SURVEY AND ANALYSIS OF FLOOD BEHAVIOR OF STORM SURGE DUE TO CYCLONE NARGIS IN MYANMAR

柴山知也[1]・青木陽平[2]・高木泰士[3]
Tomoya SHIBAYAMA, Yohei AOKI, Hiroshi TAKAGI,

[1]フェロー　工博　早稲田大学教授　理工学術院（社会環境工学科）
（〒160-8555 東京都新宿区大久保３丁目4-1）
[2]正会員　修(工)　日本工営株式会社　コンサルタント海外事業部
（〒160-0004 東京都千代田区麹町5-4）
[3]正会員　博(工)　国際協力機構　（〒102-8012 東京都千代田区二番町5-25）

Field surveys were performed in the Yangon River Basin to learn lessons out of severe disasters due to Cyclone NARGIS. It was found that the tide due to the storm surge was about 2m in around 50 kilometers upstream of the river mouth of Yangon River. According to interviews with the local residents, it also appears that significant flooding took place at inland areas as a result of the upsurge through the tributaries or channels from the main river. Based on the results of the investigation, the behavior of the storm surge and the flood on the Yangon port were calculated with the use of numerical model, which could achieve the reproducible results around Yangon. After the reproducibility of the numerical model was confirmed, by the same method, the prediction which considered the water rise caused by tide or the surge of the cyclone or rain was calculated. In a high-risk case including all of three factors, a part of Yangon city will be flooded except the hill side placed on west of Yangon city.

Key Words : *NARGIS, storm surge, Myanmar, developing country, disaster prevention, field survey*

１．はじめに

2008年5月に発生したミャンマー南部の沿岸域（イラワジ川，ヤンゴン川の下流域）での高潮災害では，家屋や田圃に甚大な被害が生じ，多くの人命が奪われた．本論文では，日本の土木学会とミャンマーの農業灌漑省灌漑局の協力の下に5月11日から15日に行われた高潮災害の調査[1)]について紹介するとともに，これを参考にして行った数値解析による高潮挙動の定量的評価について報告するものである．

サイクロンNARGISの来襲は5月2日夕方から翌3日の早朝であったため，人々の多くは家にとどまっていた．そこにイラワジ川河口からヤンゴン川河口にかけて高潮が押し寄せてきた．南よりの風が強く，特に吹き寄せの効果が大きかったと考えられる．調査結果から，高潮偏差はヤンゴン川本流部で2m程度であったと考えられる．高潮は河口から河道をさかのぼり，農業灌漑用水路なども通過して各所で氾濫し，特に地盤高の低いところで大きな被害をもたらした．サイクロンが接近していることは天気予報を通じてヤンゴン市内にも，イラワジ河口域にも一応伝わっていたと考えられる．ただ，この地域の人は大きな高潮にみまわれたことが数十年にわたってなかったため，人々はサイクロンの接近によりどのようなことが起こるのかについて，具体的なイメージがなかったものと思われる．本研究で行った調査では，河川や農業用水路を遡って水位が増幅し氾濫することで，各地で大きな被害が生じたことが分かった．このような被害に対しては，より詳細に特定の領域において高潮の挙動を分析することが必要であることから，本研究では広域での高潮計算とともに，局所的な氾濫計算を用いて被害の定量的評価を行う．

２．被災地の調査[1)]

(1) 調査の概要

ミャンマー南部の海岸地形および周辺水深分布を図-1に示す．NARGISの進行経路も図-１にともに示してある．ここで，進行経路はUNISIS[2)]，等深浅図についてはUniversity of Alaska[3)]のデータをそれぞれ利用して作成した．ミャンマー南部はヤンゴン，イラワジ両河川のデルタを中心に平均海面からの標高が3m以下である地域が広範囲に広がっている．本調査では，高潮による被害が甚大で，政府の立ち入り規制が必ずしも厳しくなかったヤンゴン川流域を

調査対象地域とする．調査に当たっては，GPSを用いて調査地点の場所を記録するとともに，各所において浸水痕跡高の計測，住民への口頭での質問調査を行った．現地での目撃証言を収集するとともに，そこでの高潮の高さを，レーザー距離計を用いた測量で計測した．

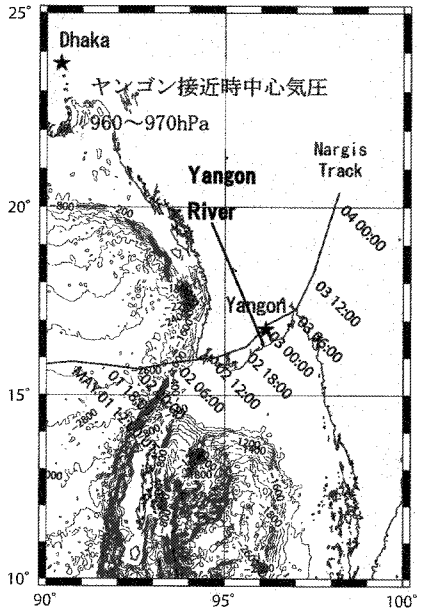

図-1 ミャンマー南部の海底地形とNargisの進路

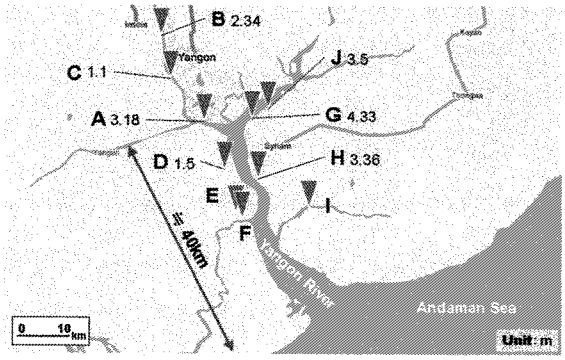

図-2 ヤンゴン川流域の計測点の分布と浸水痕跡高[1)]

(2) 調査結果

図-2には，浸水高さを計測した地点の空間分布と，そこでの調査時の河川水面からの浸水高さを示す．高潮後の連日のスコールのために痕跡が洗われてしまったために，これらの浸水深の計測結果の多くは，目撃証言に基づいている．多くの証言は高潮と同時に起こる波による水位の変化を含んでいると考えられる．以下では，図-2に示した調査地点からA地点ヤンゴンフェリー乗り場の調査結果について紹介する．

ヤンゴン市内の船の渡し場では，護岸を1.2m超える高潮が押し寄せた．ヤンゴン川の河口から約50kmのヤンゴン市内（N16度46分5.2秒，E96度9分43.5秒）で，高潮の計測を行った．夜を徹して状況を見ていた渡し守の証言によると，サイクロンの最中に水位が急上昇し，堤防を越えて地面から1.2mのところまで水位が上がった．多くの船が岸に打ち上げられ，また周辺の水底に沈んだ．常時よりも高い水位はほぼ4日間続き，その後，平水位に戻っている．

写真-1 ヤンゴン・フェリー乗り場

サイクロンの最中，ヤンゴンではあまり雨が降っていなかったという証言がある．この川の上流にある灌漑用の貯水池では，サイクロン直後に水位が30cm上がり，すぐに元に戻ったとのことで，降雨による水位上昇は少なかった可能性がある．5月14日の潮位（13:19）がサイクロン来襲時に似ているという情報を基に測りなおしたところ3.18m程度の高潮の高さとなった．

調査結果のまとめとしては次のようなことが言える．全ての地点で顕著な高潮が発生していた．但し，高潮偏差は場所ごとに異なり，ヤンゴン中心部周辺では2m程度の高潮が出現した可能性がある．サイクロン通過時は波も高く，川の支流においても2m以上の波の打ち上げ高が出現したという証言を得ている．雨季の時期には同程度の潮位が出現するということもあり，高台に逃げ込んだという証言は少なかった．高潮水位がひざ下程度であっても，風波によって家屋等が損傷したケースがある．またヤンゴン川では，各地で4～5m程度の潮位差が見られ，満潮と高潮が重なった時間帯に大きな被害が出た可能性がある．

(3) 過去のサイクロン経路との比較

ミャンマー周辺における過去のサイクロン発生状況を分析するため，JTWCのベストトラックデータ[4)]を利用して，1980年から2007年までのサイクロン進行経路を描画した結果が図-3である．これにより以下のような事項を指摘することができる．

1) ミャンマーの南岸部には，過去においてもサイクロンは来襲している．しかし，その経路は，海岸線をほぼ直角に進行する経路やアンダマン海を東から西へと抜けるパターンが多く，NARGISの経路は非常に稀である．

2) ミャンマー周辺におけるサイクロンの接近数

はバングラデシュ周辺と比較すると圧倒的に少ない．その頻度は，平均して10年間に2回前後と考えられる．したがって， NARGISがミャンマーに過去最悪の被害をもたらした最大の物理的要因は，その進行経路と地形的特性の2点によって説明可能である．それらに加えて，ミャンマーにおいて過去50年以上同規模の高潮被害が発生していないという過去の経緯がハード・ソフト両面での高潮対策の欠如，ひいては未曾有の災害へとつながったという点も重要な要因と考えられる．この点は，過去に度重なる深刻なサイクロン被害を経験し，サイクロンシェルターが急速に整備され，また住民の高潮への防災意識も高いバングラデシュの状況[5]とはきわめて対照的である．

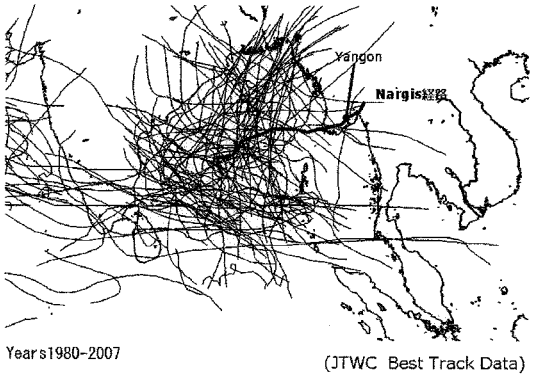

図-3 過去のサイクロン経路の比較[1]

3．NARGISによる被害の再現計算

(1) 計算の概要

調査の結果を基に，高潮推算モデルを用いてヤンゴン港における水位変動の追算を行うとともに，氾濫計算によってヤンゴン市内への氾濫挙動の再現を試みた．広域計算には，GEBCOの1.85 kmメッシュデータを使用し，台風データはJTWCベストトラックデータ[4]の中心気圧と経路，台風半径については加藤[6]の経験式，高潮モデルには水層を上層と下層に分けて計算する2レベルモデルを用いている．表-1にサイクロンNARGISの諸元を，2007年にバングラデシュを襲ったSIDRとの比較として表示する．

表-1 NARGIS と SIDR の概要

サイクロン	発生年月	最低中心気圧(hPa)	最大風速(m/s)	死者・不明者数 (人)	被災者数 (人)
NARGIS	2008年5月	937	59	138,373 ※1	≧2,000,000 ※
SIDR	2007年11月	918	72	4,234 ※2	8,923,259 ※2

※1 EMDA
※2 バングラデシュ国災害管理局

またヤンゴン近海では，一年を通して天文潮の差が大きく，最高で6m程度の潮位変化が一日の中で生じる．NARGIS来襲当時も高い天文潮位があったとみられ，単純に高潮偏差のみでは評価ができず，潮汐差を考慮に入れた潮位偏差の挙動を評価する必要がある．本研究ではヤンゴンにおける2008年天文潮位観測データを基に正弦補間を行い，災害当時の天文潮の推測を行った．この結果と高潮偏差を足し合わせることでヤンゴン港の水位変動を予測した．

広域計算で得た水位変動を初期氾濫水位として護岸の境界に与え，ヤンゴン港から市内を対象に平面二次元流の氾濫計算を行った．計算領域における地形データについては一般に公開されている衛星データであるASTERの30mメッシュデータ，およびSRTMの90mメッシュデータを用いるが，建物や木の高さが標高として読み込まれているほか，河川の標高が陸地よりも高く表示されるなどの難点がある．そこでGoogle Earth画像との照合により，データの中から空き地や広場，農業用地など土地の標高が確からしい点のみを抽出し，GISによる内挿解析を行ったうえで，図-4に示すように新たに地形データを作成している．また計算に使用する全メッシュに対してマニングの粗度係数を与えた．小谷[7]を参考に，航空写真から判断した土地利用条件に従って粗度係数を設定している．

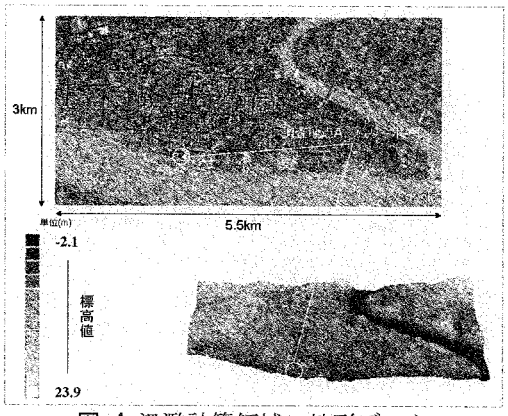

図-4 氾濫計算領域の地形データ

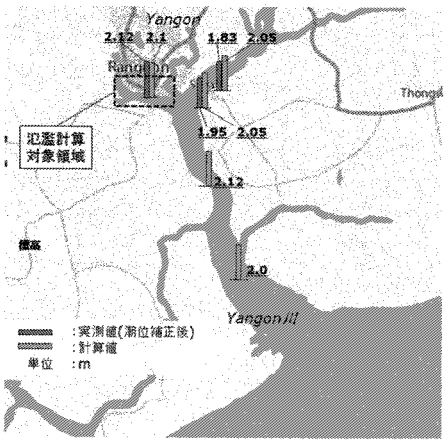

図-5 計算結果と実測値の比較

(2) 計算結果と考察

図-5に広域における高潮偏差推算結果と現地調査による実測値との比較を示す．表示した実測値は，ヤンゴン港における潮位表を基に測量結果を潮位補正したものである．ヤンゴン港周辺でのみデータが得られ，補正が可能であったため，この3点との比較のみを示した．また図-6には地点A（ヤンゴン港フェリーポート）における計算結果の時系列グラフ

に護岸高さを合わせて表示したものを示す．ヤンゴン港においては，計算結果として妥当な推測値が得られたといえる．現地調査の結果である潮位補正後の高潮偏差の2.12mに対し，計算結果では2.1mと実測値と近い値が得られた．さらにフェリーポートの護岸上1.2m程度まで水位が上昇したという調査結果であったが，高潮偏差+潮汐のグラフでは護岸上1m程度まで水位が上昇しており，実測値に近い推算ができたといえる．

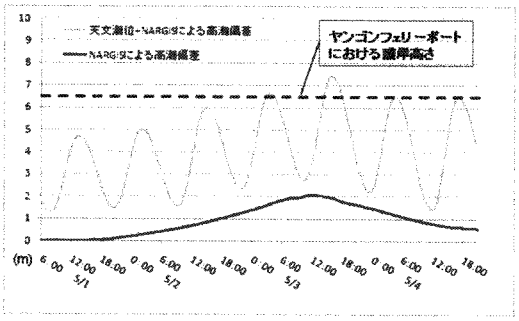

図-6 NARGIS来襲時のヤンゴン港における高潮偏差と潮汐を考慮に入れた水位変動

天文潮位と高潮偏差との関係から，高潮偏差が最大となる時間と満潮時との間に数時間のズレがあることが確認できる．この時間が重なったケースを想定すると，さらに数十cm水位が上がっていた恐れがある．このことと高潮の長時間にわたる発生継続時間を考えると，場所によっては前後の満潮時と複数回重なることで護岸を越える水位が発生していた可能性も考えられる．

高潮偏差の時系列グラフを見ると，水位が上がり始めてから下がるまでが2日間以上もあり，長く継続する高潮となっている．これに関しては地形的条件が影響しており，川幅が狭くなる部分において，水位が低下しにくいためであると考えられる．この点については勾配が緩やかなことを考慮し，また地形を精緻化し，さらに，急変部をスムージングするなどの操作を行い，予測結果への影響を確認する必要がある．

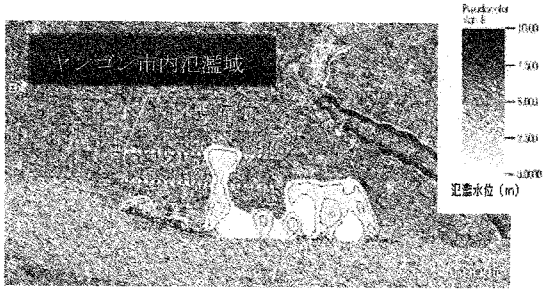

図-7 NARGIS来襲時のヤンゴン市内における氾濫範囲と水深分布

図-7はヤンゴン市内における氾濫計算の結果である．図の中央部フェリーポート付近で氾濫が起こり，500～700m程度陸上に氾濫した．これは特定の「道路まで水が来た」という証言と概ね合致している．氾濫域の水深は1m程度であることから，ヤンゴン市内では建物へ避難すれば人的被害は免れる程度といえる．

計算の再現性に関しては，様々な詳細データの入手が困難であることから十分な検証が行えていない．例えば広域計算については，ヤンゴン港以外の地点における現地観測データと計算値との比較を行うために，各地点での天文潮位データが必要となる．氾濫計算では，衛星データより作成した地形の再現性の検証が必要となる．作成した地形には，周辺と比較して標高の低い部分があり，計算ではそこに水が流れ込むという現象が生じてしまうため，このような場所を中心にいくつかの地点に対し現地で測量を行うことで，より精度の高い地形を再現する必要がある．

4．特定のケースを想定した被害の推算

(1) 想定ケースの概要

再現計算と同様の計算手法を用いて，以下の3つのケースを想定して予測計算を行うことで被害程度の予測と今後の課題を抽出した．

a) 高潮が年間最高潮位と重なる場合

ここでは，ミャンマー海軍が発行した2008年潮位表より，年間最高となった10/16の6.67mという潮位を抽出し，高潮偏差のピークと重なるように10/14～10/17までの天文潮位と高潮偏差を重ねた．

b) より強力なサイクロンが来襲した場合

a)の条件に加え，サイクロンのパラメータのうち最低中心気圧について，2007年にバングラデシュを襲ったサイクロンSIDRのものを採用し，より強力なサイクロンとして条件を設定した．SIDRの最低気圧については，前述の表-1で記した値を用いる．サイクロンの経路についてはNARGISのものが最悪のケースであるとして，NARGISの経路を与えている．

c) a)b)に加え降雨による水位上昇を考慮した場合

ここではサイクロンが雨期に降雨を伴ってヤンゴンへ来襲した場合を想定する．ヤンゴン港近傍では毎年雨期の満潮時，降雨によりしばしば河川が氾濫するという証言を得ている．本研究ではこの証言より，ヤンゴンの護岸の高さが，雨期の降雨時の河川水位程度に設定されていると仮定し，この時の水位は護岸の高さと同程度であるとした．この水位(＝護岸の高さ)から雨期(6月～10月)の平均満潮位(5.5m)を差し引くことで降雨による水位上昇分を1m程度と仮定し，b)の水位変動に加算した．

図-8にヤンゴン港における護岸高さと水位の関係を示す．図のような関係に基づいて計算を行っている。

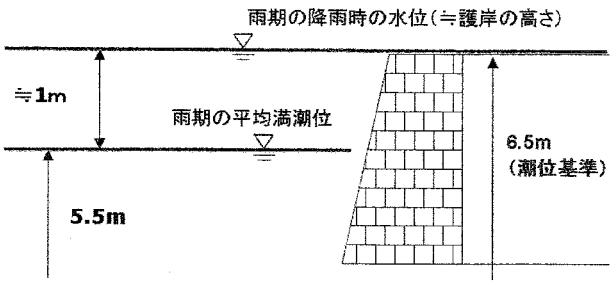

図-8 ヤンゴン港における護岸高さと水位の関係

(2) 計算結果と考察

広域計算結果として図-9～図-11に，ケースa)～c)のヤンゴン港における水位変動と護岸高さを比較したグラフをそれぞれ示す．氾濫計算の結果についてはピーク時の氾濫範囲図を図-12～図-14に示す．a)ではヤンゴン港護岸上2.5m程度，b)では3m程度まで水位が上昇した．広域計算で得た高潮偏差が緩慢な挙動を示すため，前後の複数の満潮と重なることにより2日間で計4回水位が護岸を上回り氾濫するということとなる．これに対して避難警報を行う場合

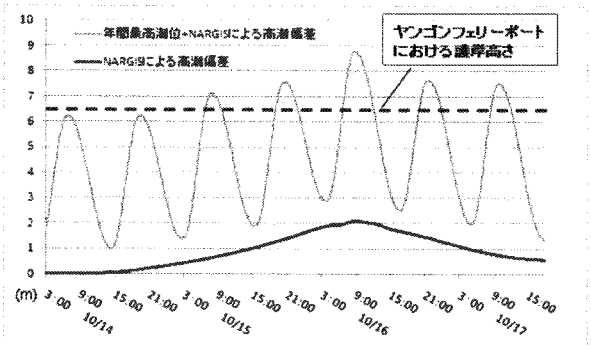

図-9 ヤンゴン港における高潮偏差と潮汐を考慮に入れた水位変動(ケースa))

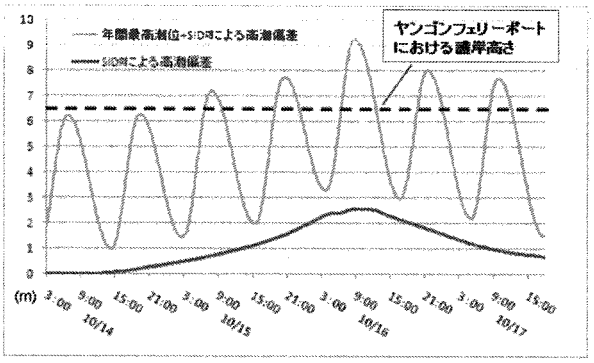

図-10 ヤンゴン港における高潮偏差と潮汐を考慮に入れた水位変動(ケースb))

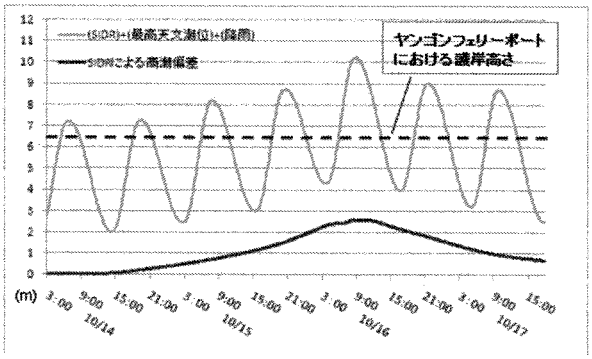

図-11 ヤンゴン港における高潮偏差と潮汐,降雨を考慮に入れた水位変動(ケースc))

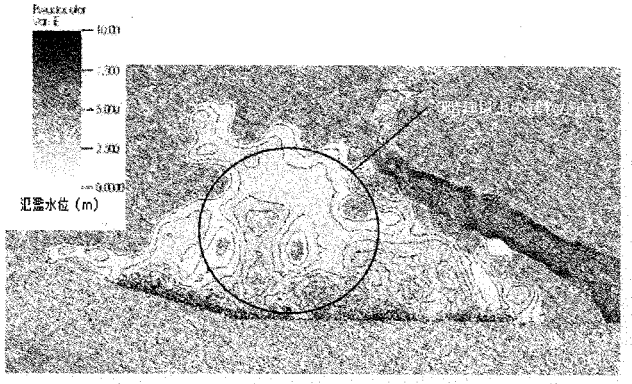

図-12 ヤンゴン市内における氾濫範囲と水深分布(ケースa))

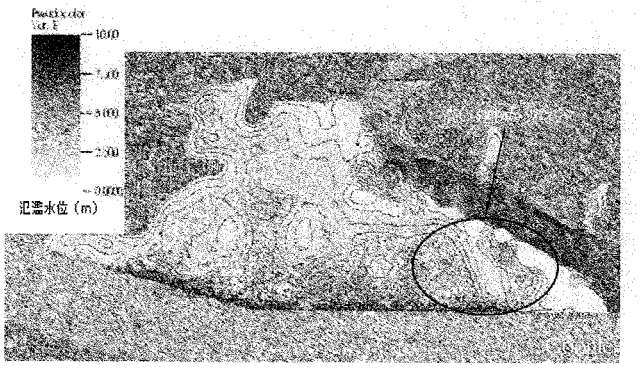

図-13 ヤンゴン市内における氾濫範囲と水深分布(ケースb))

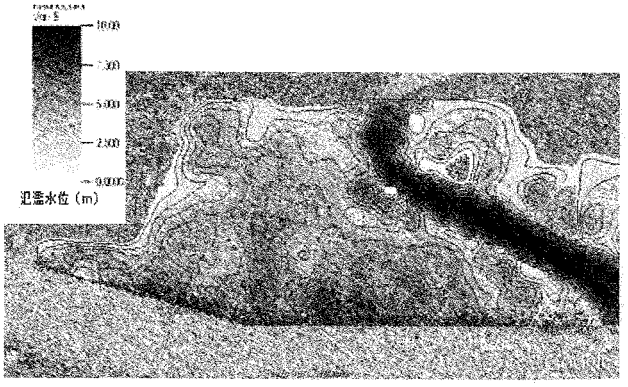

図-14 ヤンゴン市内における氾濫範囲と水深分布(ケースc))

は，サイクロン来襲前後の満潮時の水位上昇を考慮し，早期に対応する必要が出てくる．このケースでは高潮のピークより約24時間前から護岸を越える水位が発生し，ピーク以降も高い水位が続く結果となった．

氾濫計算の結果から，a)では護岸から北へ最大2.5kmまで遡上し，市街地の大部分が浸水した．川を挟んだ右岸側には氾濫が見られないが，これは左岸側に水が流入したことで水位が頭打ちとなるからである．各地で2m前後の浸水深が見られ，港付近では4m程度の浸水も生じている．b）についても大部分で浸水が起こる結果となった．標高が比較的低い場所に水が流入し，深いところで5m程度の水深となった．このようなケースでは，一階部分は浸水し，2階部分も風波による被害を受ける可能性があるため，3階以上に避難する必要が出てくる．**写真-2**のようにヤンゴン市内には3階建以上の建物が点在しており，このような建物も避難場所として検討できる．一方ヤンゴン南東部Strand Rd.周辺は高い建物が少ないことから，浸水時にはより危険度が高いといえる．

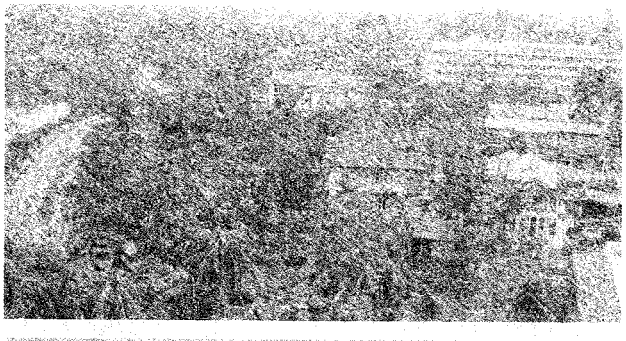

写真-2 ヤンゴン市内の建物の様子（２か所）

c)では，降雨の影響を加算することで最大で護岸上4m程度まで水位が上昇するという結果を得た．この場合，背後地への氾濫を防ぐための対策として，護岸の高さを4m以上嵩上げする方法が考えられるが，ヤンゴンにおける港の利用状況や費用の面から，現実的とは言えない．ヤンゴンの場合には，氾濫をある程度許容し、避難経路の確保等，避難を促す対策を行うことが妥当な対策案として考えられる．避難警報についてはサイクロン来襲前後の天文潮位を予め予測し，気象情報から降雨による水位上昇を把握したうえで高潮の来襲に備える必要がある．また，天文潮位と降雨の影響のみで既に護岸を越える水位が発生していることから，ヤンゴン港の水害に対する防災対策が現状で不十分であることが分かる．

いずれのケースにおいても西部の丘陵地帯までは水位の遡上が見られない．従って高潮に際して，この位置まで避難することが望ましいと考えられる．

５．おわりに

本研究で得られた結論は以下の通りである．

１）測量とヒアリングによる高潮被災調査を行い，被災時の現象を全体として把握するとともに，被災の程度に局地的な差異が見られた理由を考察した．
２）データの入手が困難な中，一般に公開されている衛星データを用いて，GIS により詳細な地形を推定し再現した．
３）被災当時の高潮挙動の追算を行い，ヤンゴン港における水位変動，氾濫挙動について再現性のある結果を得た．天文潮位の影響を大きく受けていたことが分かり，高潮と満潮が重なることで複数回護岸上に氾濫した可能性を示した．
４）ヤンゴン港において天文潮位や降雨による水位上昇を考慮に入れ，水位変動と護岸高さの関係を把握するとともに，ヤンゴンにおいて最も危険であると考えられるケースの水位変動を推定し，氾濫挙動を示すことでそれぞれのケースにおいて避難方法を提案した．

謝辞：本調査は，(社)土木学会，ミャンマー国の農業灌漑省の協力のもとに実施した．記して謝意を表する．本研究は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤（B）No.22404011（代表者:早稲田大学　柴山知也）による研究であることを付記する．

参考文献

1) 柴山知也，高木泰士，ヌン・ヌウ，青木陽平：サイクロン NARGIS による高潮被害の調査,海岸工学論文集第56巻 p1376-1380, 2009 年
2) Jan-Hwa Chu and Charles R. Sampson: The Joint Typhoon Warning Center Best-Tracks 1980-2000 https://metocph.nmci.navy.mil/jtwc/TC_bt_report.html/
3) University of Alaska: Geographic Information Network of Alaska, http://www.gina.alaska.edu/, 2008 年
4) JTWC: Tropical Cyclone Best Track Data , http://metocph.nmci.navy.mil/jtwc/best_tracks/, 2008 年
5) 柴山知也,田島芳満,柿沼太郎,信岡尚道,安田誠宏,ラクイブ　アフサン,ミザヌール　ラフマン,シャリフル　イスラム：サイクロンSidrによるバングラデシュ海岸・河川高潮災害の現地調査,海岸工学論文集第55巻，1396-1400, 2008年.
6) 加藤史順：高潮危険度評価に関する研究,国総研資料第 275 号 p10, 2005 年
7) 小谷美佐：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法,海岸工学論文集,第 45 巻 p356-360, 1998 年