

## 21. スリランカにおける高潮危険予測

柴山 知也<sup>1</sup>・高島 知行<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

<sup>2</sup>早稲田大学大学院創造理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

\* E-mail: tomo-takabatake@akane.waseda.jp

強大なサイクロンが来襲した経験が少ないことから、これまでスリランカでは高潮災害の危険性が指摘されることは少なかった。一方で、2008年にミャンマーを襲ったナルギスに代表されるように、環境変動の影響で想定外の進路を通るサイクロンが観測されるようになった。本研究ではスリランカ海岸部を対象として様々な経路でサイクロンを通過させ、各地域における水位上昇を調べた。その結果、スリランカ北部では2mを超える水位上昇が算定され、高潮の危険性も高いことが分かった。スリランカ北部地域は、2009年まで続いた国内紛争の影響で防潮堤などインフラ整備が遅れている地域が多いため、被害が大きくなることも懸念される。

**Key Words :** storm surge, Sri Lanka, developing country

### 1. はじめに

高潮災害は、日本を含め世界各地で大きな被害を引き起こしてきた。近年では、バングラデシュを襲ったサイクロン・シドル、アメリカ合衆国を襲ったハリケーン・カトリナなどによる高潮被害がある。

これまでスリランカでは、高潮災害の危険性が指摘されることは少なかった。サイクロンの来襲自体が数年おきであったこと、また来襲しても規模が小さく、被害が少なかったことがその理由として挙げられる。

ところが最近、2008年にミャンマーを襲ったサイクロンナルギスや2007年にイランを襲ったサイクロンゴヌのように、強大なサイクロンがこれまでにない進路を通過してインド洋沿岸を襲う場合がある。そのため、今後高潮災害がスリランカで発生する可能性は無視できない。スリランカは、国内紛争の影響で防災施設を始めとするインフラ整備が遅れている地域も多いため、大規模な高潮が発生した場合、甚大な被害が生じることが懸念される。

本研究では、環境の変動により強化したサイクロンが、スリランカ主要海岸部に来襲した場合の高潮危険性を、数値シミュレーションにより解析した。計算はモデルサイクロンを設定し、気圧分布をMyersの式を用いて推定するとともに、高潮については非線形長波方程式をLeap-frog法により差分化することで行った。

### 2. 解析モデル

#### (1) モデルサイクロンの気圧分布

高潮計算における主要な外力は、気圧傾度力と海上風による水表面への接線応力である。従って、対象となるサイクロンに関して、その気圧分布と風速分布の正確な算出が必要である。サイクロンモデルの気圧分布式としてはいくつかのモデルが提案されているが、本研究では波浪の数値計算を行う上で適しているMyersの式を採用した。

$$P = P_0 - \Delta P \cdot \exp \left( - \frac{r_{\max}}{r} \right) \quad (1)$$

ここで、 $P_0$ : サイクロンの中心気圧、 $\Delta P$ : 気圧深度、 $r_{\max}$ : サイクロン中心から最大風速が発生する地点までの距離である。

#### (2) 高潮の支配方程式

本数値計算では、2 レベルモデルを用いた高潮計算を行った。2 レベルモデルでは固定された内部境界面を考え、吹送流が生じている上位層、吹送流を考慮しない下位層に分け、その境界面をせん断力で接続し、計算を行う。2 レベルモデルによる高潮偏差の計算は土屋ら(1981)によって導入され<sup>1)</sup>、柴山ら(1990)により従来の1 レベルモデルよりも精度の高い計算モデルであることが

示されている<sup>2)</sup>。非線形長波は式(2)~(6)で与えられる。連続方程式と運動方程式は以下である。

(i) 連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(M_1 + M_2) + \frac{\partial}{\partial y}(N_1 + N_2) = 0 \quad (2)$$

(ii) 上位層における運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M_1^2}{H_1}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{M_1 N_1}{H_1}\right) \\ = -gH_1 \frac{\partial \eta}{\partial x} + fN_1 - \frac{H_1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{ix}}{\rho_w} - (uw)_i \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M_1 N_1}{H_1}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N_1^2}{H_1}\right) \\ = -gH_1 \frac{\partial \eta}{\partial y} + fM_1 + \frac{H_1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{iy}}{\rho_w} - (vw)_i \end{aligned} \quad (4)$$

(iii) 下位層における運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M_2^2}{H_2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{M_2 N_2}{H_2}\right) \\ = -gH_2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + fN_2 - \frac{H_2}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{ix}}{\rho_w} + (uw)_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M_2 N_2}{H_2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N_2^2}{H_2}\right) \\ = -gH_2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + fM_2 - \frac{H_2}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_2}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{iy}}{\rho_w} + (vw)_i \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\eta$  : 静水面からの水位変動量,  $M_1, N_1$  : 上位層の  $x, y$  方向の線流量,  $M_2, N_2$  : 下位層の  $x, y$  方向の線流量,  $H_1, H_2$  : 上・下位層の厚さ,  $f$  : コリオリのパラメータ,  $\rho_w$  : 海水の密度,  $\tau_s, \tau_b$  および  $\tau_i$  : 海面, 海底面および境界面に作用するせん断応力である。また,  $(uw)_i, (vw)_i$  : 境界面における運動量流束,  $A_h$  : 水平混合係数である。これらの基礎方程式を Leap-frog 法を用いて離散化し、計算を行った。

### 3. 高潮数値計算

#### (1) 計算対象領域

本研究で高潮予測の対象とした地域を、図-1 に示す。四角で囲んだ箇所が計算対象領域であり、トリンコマリー、カルムナイ、ゴール、コロンボ、ジャフナ、ポイント・ペドロの周辺海を選定している。これらの箇所を選んだ理由を述べる。トリンコマリー、カルムナイ、ポイント・ペドロはサイクロンの来襲しやすい東部、北部に位置しているためである。ジャフナは近海が吹き寄せ効果の影響が出やすい浅海域であるためであり、コロンボ、ゴールはスリランカの主要都市であり被害を受けた場合の社会的影響が大きいと予想されるためである。

水深データは GEBCO が提供している水深データを用いており、計算対象領域の格子間隔と計算条件は全ての地域において共通である(表-1)。初期条件としては、計算開始時の初期水位変動は全て 0 とした。また、高潮は陸上に遡上しないものとし、陸地と海の境界は完全反射を仮定した。外洋と接続される沖側境界は透過境界とし、ここでの水位  $\eta$  は気圧による吸い上げ効果により、

$$\eta = 0.991 \Delta P \quad (7)$$

で与えた。

表-1 計算条件

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| 格子間隔       | 900(m)                   |
| タイムステップ    | 3(s)                     |
| 水平混合係数     | 100.0(m <sup>2</sup> /s) |
| マンニングの粗度係数 | 0.026                    |

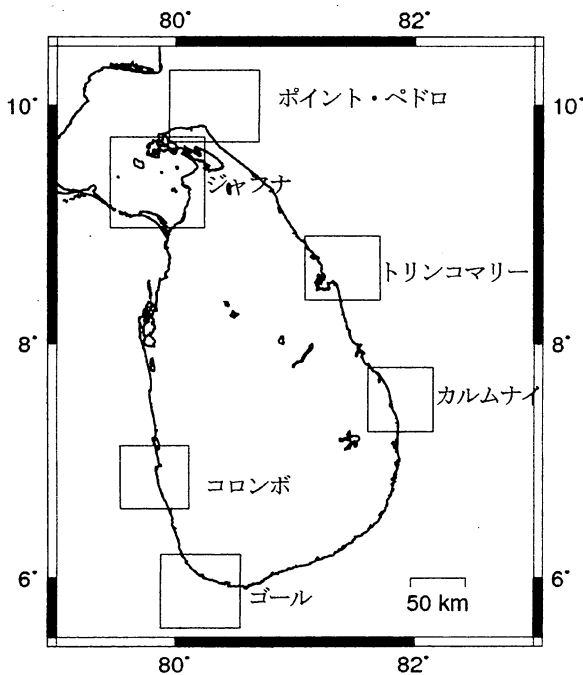


図-1 計算対象領域

表-3 サイクロンパラメータ

| 中心気圧      | 気圧深度     | 最大風速半径    | 移動速度      |
|-----------|----------|-----------|-----------|
| 940 (hPa) | 69 (hPa) | 72800 (m) | 20 (km/h) |

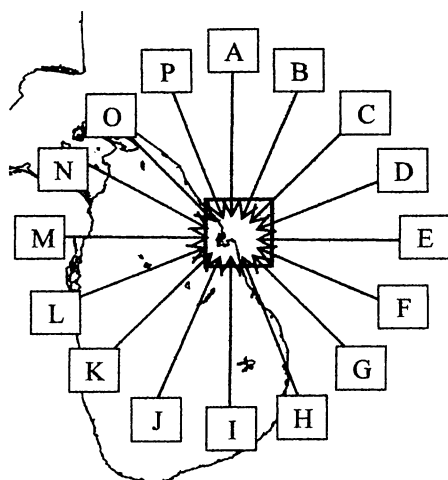


図-2 サイクロンの進路図

## (2) モデルサイクロンの規模

モデルサイクロンには、インド洋で過去発生したサイクロンの中で規模の大きいものを利用した。用いたのは、2007年にバングラデシュを襲ったシドルと同程度の大きさのサイクロンである。モデルサイクロンのパラメータを表-3に示す。最大風速半径は加藤(2005)の台風を用いた経験式から算出し<sup>3)</sup>、移動速度は過去スリランカ周辺を襲ったサイクロン移動速度の実測値を平均した。なお、サイクロンは発生から概ね20時間後に水位を評価する地域に達し、40時間後に消滅することと設定した。

## (3) 最高水位の算定方法

各計算対象領域内の高潮の危険性を評価するため、様々な方向からサイクロンが動くことでその領域内で生じる最高水位を求める。

ここでは各計算領域に向けて16方向からサイクロンが動くことでその算定を行った。図-2、図-3に進路の概略を示す(トリンコマリーの場合を例として示す)。図-3に示すように、各方向におけるサイクロンの進路は、水位評価点の真上を通る進路から、サイクロンの最大風速半径(72.8km)に達するまで15kmずつ変化させた。つまり、16方向から各9進路ずつ、計144進路における水位変化を算出し、その中で最高水位を各計算対象領域において生じる最高水位と選定した。一般的に、スリランカが位置する低緯度地域では、貿易風の影響で東から西にサイクロンが進行することが知られている。実際、過去スリランカを襲ったサイクロンの進路は概ねこの原則に則っている。しかし前述したように近年ではナルギスを

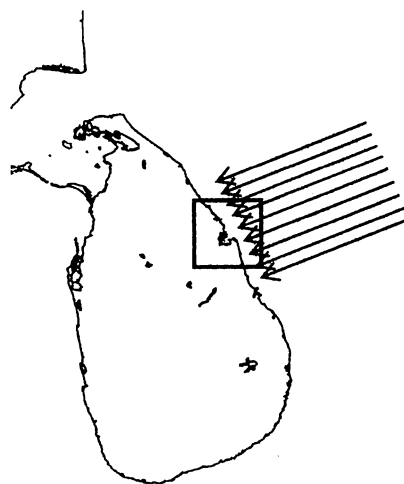


図-3 サイクロンの進路図(方向Dの場合)

代表とし、想定外の進路を通るサイクロンが観測されているため、本研究においてはこの原則にとらわれず16方向からサイクロンを動かした。また、陸部を通過する場合、サイクロンの規模は小さくなるのが普通だが、今回は最悪のケースを想定するためその影響は考慮しなかった。

## 4. 高潮数値計算結果

数値計算により算定した潮位偏差の時間的变化を図-4に示す。算定の結果、トリンコマリー、カルムナイ、ゴール、コロンボでは最高潮位偏差が1m以下と大きな水位上昇は生じなかった。天文潮位変動による水位変化を考慮しても、各地域での最高水位は1.5m程度であるため、これらの地域では高潮の危険性は高くないといえる。これに対し、ポイント・ペドロ、ジャフナといったスリランカ北部地域では1mを超える水位上昇が生じることが分かった。特にジャフナでは最高潮位偏差が2.69mとなり、他地域に比べて生じる最高潮位偏差が高いことが分かった。これに天文潮位変動による水位上昇分を考慮すると、ジャフナ近海で発生しうる最高水位は3.44m～3.57mに達し、高潮の危険性が高いことが分かった。

この結果は、スリランカの海底地形から説明できる。スリランカの周辺海は、北部には浅瀬が広がる一方、それ以外の海域は急峻な地形をしている。一般に、浅瀬が広く続く海域の方が、吹き寄せの効果が強く働くため高い水位上昇が生じやすい。そのため、急峻な海底地形をしているトリンコマリー、カルムナイ、ゴール、コロンボの周辺海では高い水位上昇が生じず、浅瀬が広がるジャフナやポイント・ペドロの海域では高い水位上昇が発生したのだと考えられる。

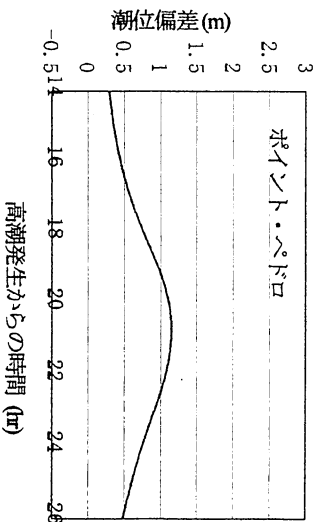
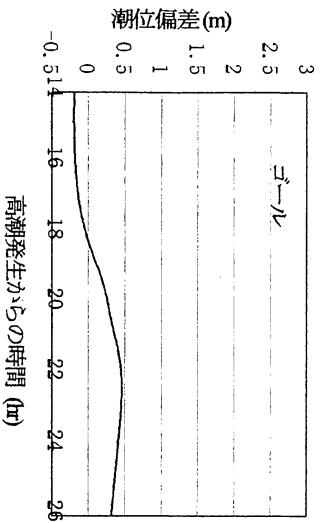
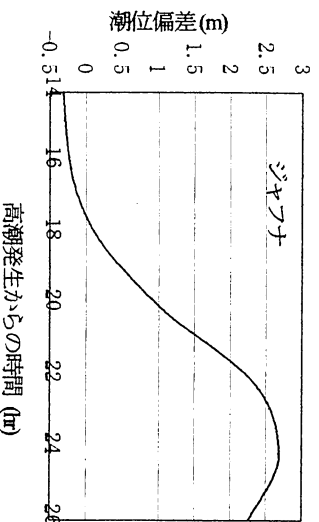
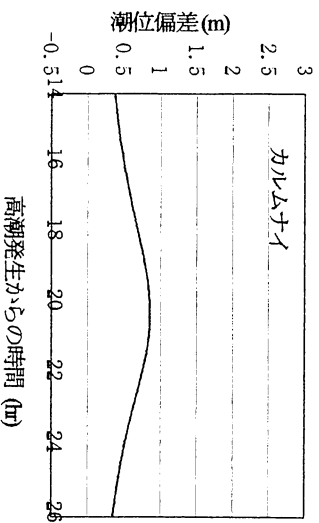
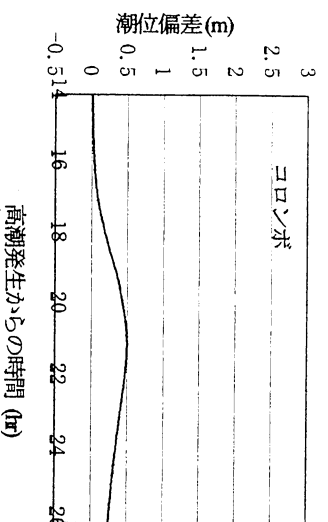
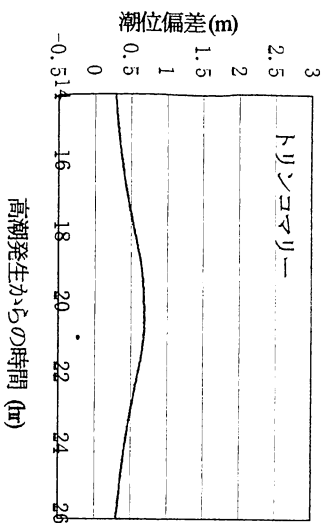


図4 潮位偏差の時間的变化

## 5. まとめ

スリランカ海岸部に強大なサイクロンが来襲した場合、トリンコマリ、カルムナイ、ゴール、コロンボなどの地域では高い潮位偏差が生じないため高潮の危険性は低いことが分かった。これに対し、ジャフナやポイント・ペトロなどスリランカ北部地域では最高潮位偏差が比較的高く、危険性も高いことが分かった。スリランカの北部地域は2009年まで続いた国内紛争の影響で、防潮堤などのインフラ整備が遅れている地域が多く、そのことが被害を拡大することが懸念される。

**謝辞：**スリランカ現地の情報を提供して下さった Rufuna大学のNimal博士に謝意を表する。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤(B) No22404011 (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。

| 地域       | 最高潮位偏差 (m) |
|----------|------------|
| トリンコマリ   | 0.69       |
| カルムナイ    | 0.86       |
| ゴール      | 0.42       |
| コロンボ     | 0.50       |
| ジャフナ     | 2.69       |
| ポイント・ペトロ | 1.16       |

表5 各地域における最高潮位偏差

## 参考文献

- 1) 土屋義人・山下隆男・岡扶樹：2レベルモデルによる高潮の追算-台風7916号による大阪湾の高潮，第28回海岸工学論文集，pp.54-58, 1981
- 2) 柴山知也・岡安章夫・土岐道夫：2レベルモデルを用いた東京湾の高潮計算，海洋開発論文集 Vol.6, pp.77-82, 1990
- 3) 加藤史訓：高潮危険度評価に関する研究，国総研資料，第275号，pp.10, 2005