

# Hurricane Irmaを対象とした 海洋上の離島における高潮水位の算定手法 Hindcasting and calculation for storm surge due to Hurricane Irma on isolated island ocean

17N3100034E 羽賀 拓人 (海岸・港湾研究室)

Takuto HAGA/ Coastal engineering Lab.

**Key Words** : storm surge, isolated island, Hurricane Irma, STOC

## 1. はじめに

高潮は主に気象の擾乱に伴い発生する現象で、高潮増幅機構として基本的に考慮されている要素は、気圧低下による「吸い上げ効果」、海上風による「吹き寄せ効果」、更に波浪による「Wave setup」の影響が支配的であることがこれまでの研究で示されている。

そのような高潮災害リスクの予測について多方面から研究が行われているが、長期的には、地球温暖化に伴う気象擾乱の局地化に伴う高潮偏差の増大を適切に評価することが重要である。一方、短期的な高潮即時予測では、気象擾乱が予測された段階で、それを外力条件として各地点でどの程度の潮位変化が発生するか高精度且つ短時間で計算を行う事が必要とされている。

現在、そのような高潮即時予測を行う有力な手法の一つとして数値モデルによる高潮推算が用いられている。一般的な高潮推算では、水平方向の流れ場の挙動が鉛直方向に比べて卓越しているため、水深積分された長波方程式 (2Dモデル) を基礎方程式としたモデルが用いられ、その有用性が検証されてきた。このモデルは鉛直方向を静水圧近似した式を用いている為、計算速度が比較的速いという特徴を持つ。

一方、複雑地形の流速分布など、物理過程の中には水深積分モデルでは再現できないものがあり、3次元流速を取り扱うモデル (3Dモデル) の重要性が増しているが、2Dモデルと比較し計算に時間がかかる。

これらのことから、高潮即時予測を高精度且つ短時間でを行う場合2Dモデルと3Dモデルの併用が必要となり、それぞれのモデルの適用範囲・条件を明確にする事が重要となる。

高潮被害は従来、気象擾乱時に湾奥で発生する事例が多い為、その検討に重点が置かれてきた。例えば、Weisberg・Zheng (2006) は、2Dモデルおよび3Dモデルを用いてハリケーンIvanに伴う高潮解析を行い、3Dモデルの方が鉛直積分流速がやや大きくなることを示している。

一方島嶼部では、地形の特徴上湾奥と比較し、気象

擾乱時に大きな潮位偏差が発生しづらいが、海流や常時波浪などの要因による平面的な流速場の推算に論点が置かれ検討が行われている。例として白木ら (2015) は、水深が数千mとなる外洋から数mとなる沿岸域までの水深差が極めて大きくなる領域を効率良く計算を行う為に、鉛直方向にシグマ座標系を用いた手法を開発しその有用性を示している。

しかし、2017年に発生したハリケーンによりカリブ諸島で異常潮位が発生し、島嶼部での気象擾乱時を対象とした高潮推算手法について検討する重要性が示されたが、検討例は殆ど無い。

よって本研究では、2017年にカリブ諸島を中心に高潮被害をもたらしたHurricane Irmaを対象に2Dモデルと3Dモデルを用いて高潮解析を行いその適用性について検討する。さらにハリケーン通過に伴う三次元流速場が潮位に与える影響に着目した検討も行った。

## 2. 対象気象擾乱と対象地域

対象とする気象擾乱は、2017年8月30日-9月15日(UTC)の期間に大西洋で発生したHurricane Irmaである。このハリケーンはカテゴリ-5まで発達し、最大風速は81.9m/s、最低気圧は914hPaであり、また、本研究で対象とする地域は、ハリケーンが通過し冠水被害が著しかった、カリブ海北東に位置するヴァージン諸島とプエルトリコ周辺とする。図-1に本研究で対象とするカリブ海周辺地域でのHurricane経路・観測地点図を示す。また、図-2には対象地域周辺の海底地形図を示す。また、観測された潮位偏差のなかでもBarbuda島での値が著しく大きく、2.4mを記録した。図-3に代表してBarbudaの観測潮位偏差を示す。

## 3. 外力条件と高潮推算モデル

### (1) 地形条件

入力地形条件はGEBCOにより提供される緯度経度座標系30秒ごとに与えられているGridded bathymetry dataを利用する。

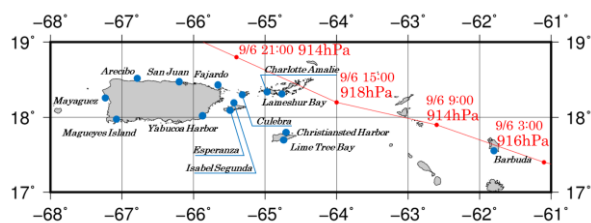


図-1 Hurricane経路・観測地点図

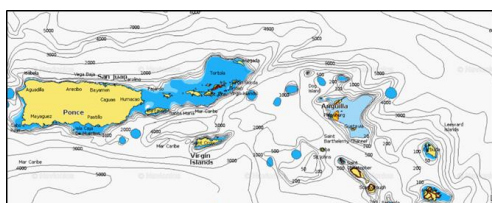


図-2 海底地形図

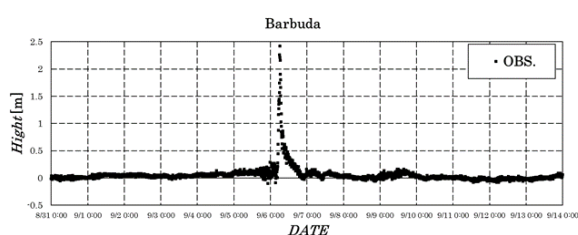


図-3 Barbudaの観測潮位偏差

## (2) 気象条件

高潮推算の外力条件としての気象場は、経験的二次元気圧分布モデル(Myers and Malkin, 1961)と経験的二次元風速分布モデル(Mitsuta and Fujii, 1986, 1987)を用いて作成する。これらの気象場モデルには入力条件として、NOAAのNational Hurricane Centerにより提供されるハリケーントラックデータを用いる。最大風速半径については、Quiring(2010)により提案された最大風速-最大風速半径の関係式を基に、観測値を用いてフィッティングを行った。観測値と計算値の比較をBarbudaを代表として図-4に示す。

## (3) 高潮推算モデル

高潮推算を富田ら(2005)が開発した高潮津波シミュレータSTOC(Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal areas)を用い潮位偏差を推算する。STOCは、3次元の連続の式、運動量保存式を基礎式とするSTOC-IC(3Dモデル)、また、それらの鉛直方向に静水圧近似を用いたSTOC-ML(2Dモデル)で構成される。海面抵抗係数は本多・光易(1980)による式を用いる。また、海底面抵抗係数はマニング粗度の計算式を用いる。wave setupによる潮位変動分の推算はDelft工科大学が開発した第三世代波浪推算モデルSWAN(ver41.10)を用いる。

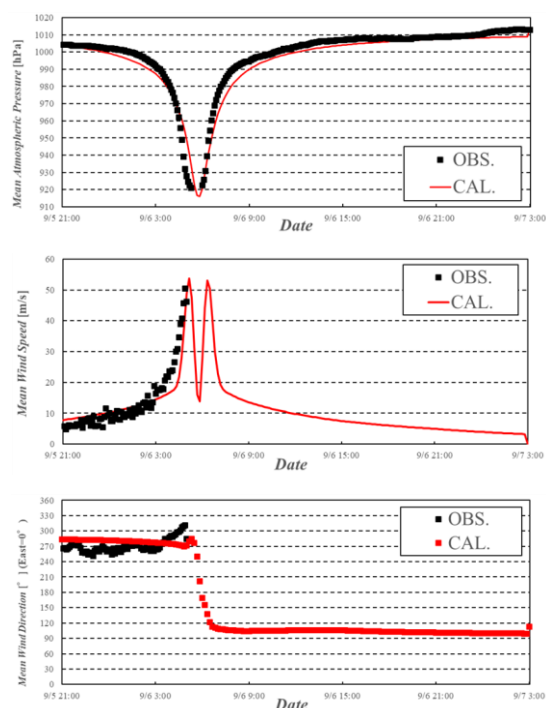


図-4 Barbudaにおける気象観測値の比較

(上)海面更正気圧 (中)海上平均風速 (下)海上平均風向

## 4. 高潮推算結果

### (1) 2D・3Dモデルによる推算潮位偏差と観測潮位偏差の比較

本節ではまず、鉛直方向に着目した検討を行う際の対象地点を抽出する為に、2Dモデルと3Dモデルそれぞれで計算を行い、各観測地点での観測潮位偏差と推算潮位偏差の比較を示す。3Dモデルの推算ケースは最小領域のみ3Dモデルを用い、最小領域の水平格子サイズは1000mとする。鉛直層は水深100mまでを0.5m毎に等分割、それ以深を等比刻みで計算格子を設定した。ほぼ全地点の比較から確認できる特徴としては、2Dモデルと3Dモデルの推算結果は同程度の時系列変動となっている事、またそれらの推算結果は観測値とよく符合している事、さらに2Dモデルで確認できる潮位の細かい振動が3Dモデルでは抑えられている事が挙げられる。しかし他地点と比較し大きな潮位偏差が発生したBarbudaのグラフからは、2Dモデルの結果は観測値と比較し過小評価となり、3Dモデルの結果は観測値に近づいた事が確認された。図-5に代表してBarbuda観測地点における観測潮位と推算潮位の時系列比較を示す。よって次節からは、Barbudaに着目して検討を行っていく。

### (2) 各高潮増幅要因による潮位偏差への影響

本節以降では、前節で比較的顕著な潮位偏差の差異が確認されたBarbuda周辺に着目して検討を行う。本節では、各高潮増幅要因による潮位偏差への影響を確認

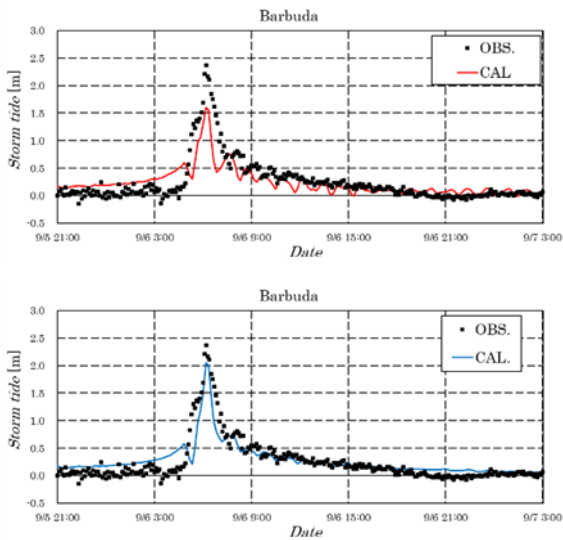


図-5 Barbudaにおける観測潮位と推算潮位の時系列比較  
(上)2Dモデル (下)3Dモデル

する為、2Dモデルを用いて気圧低下による「吸い上げ効果」、海上風による「吹き寄せ効果」、更に波浪推算モデルによる「Wave setup」の潮位変動量を個別に求める。Barbuda周辺で詳細な計算を行う為に、前章から更にもう1段階のネスティングを用い最小領域の水平格子サイズを500mとする。計算から得られた各高潮増幅要因による潮位変動量を図-6に示す。吸い上げ効果について着目すると、観測潮位のピーク発生前に計算潮位のピークが発生している事が確認される。これは図-4示した気象値と比較すると、Barbudaに中心気圧が近づき気圧が最も低下した時点で潮位が上昇している事が確認できる。一方、吹き寄せ効果とwave setupに着目すると、観測潮位のピーク発生時点で潮位計算のピークが発生している事が確認できる。これは気象値と比較すると、気圧中心がBarbuda通過直後に風向きが南になった時点で潮位計算のピークが発生している事が確認できる。

### (3) 鉛直層条件と推算潮位偏差

本節では、鉛直層の条件が推算潮位偏差へ与える影響を確認する為、2Dモデル、3Dモデルを用いて鉛直層の格子サイズを変化させてそれぞれ計算を行う。3Dモデルでは水深100mまでの鉛直層の格子サイズを100m, 50m, 20m, 10m, 5m, 1m, 0.5mの10ケースに設定し、100m以深はそれぞれ等比分割を行った。計算結果から得られた鉛直分割サイズに毎の最大潮位比較を図-7に示す。図より、鉛直層格子サイズを小さく設定するに比例して、推算潮位と観測潮位の差が小さくなる傾向が確認できる。その中でも、10m以下からその傾向が顕著に見られる。これは、図-2の海底地形図から観測地点周辺は15~20m程度の水深が広がっていて、観測地点周辺

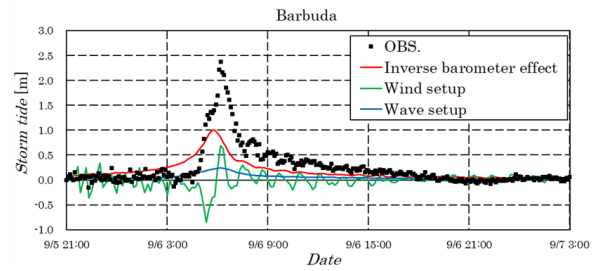


図-6 各高潮増幅要因による潮位変動量

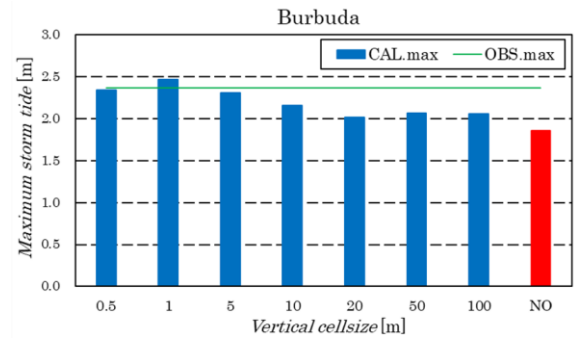


図-7 鉛直分割サイズに毎の最大潮位比較

において流体を含むセルが鉛直方向に多層となることによって推算潮位に影響があると確認できる。本節と4章1節で3Dモデルを用いて鉛直層条件を多層にする事により推算潮位が大きくなったこと、また、4章2節で吹き寄せによる推算潮位のピークと観測潮位のピークの発生時点が符合した結果から、Barbudaでの潮位上昇について吹き寄せ効果が大きく付与しているのではないかと推測できる。

### (4) 鉛直層条件と推算潮位偏差

本節では、鉛直層の条件が推算流速へ与える影響を確認する為、前節の計算から得られた流速を用いて検討を行う。2Dモデルと3Dモデルによる計算により得られたBarbuda島周辺、潮位偏差・表層流速分布を図-8に示す。図より、2Dによる計算結果と比較し3Dによる計算結果では、島の南側に位置する観測地点周辺で、表層流が岸側に向いている事が確認される。

## 5. まとめ

本研究では、2017年にカリブ諸島を中心に高潮被害をもたらしたHurricane Irmaを対象に2Dモデルと3Dモデルを用いて高潮解析を行い、ハリケーン通過に伴う三次元流速場が推算値に与える影響に着目し検討を行った。主要な結論を以下に示す。

4章1節による検討では、2Dモデルと3Dモデルの推算結果は同程度の時系列変動となっている事、またそれらの推算結果は観測値とよく符合している中、大きな潮位偏差が発生したBarbudaのグラフからは、2Dモデル

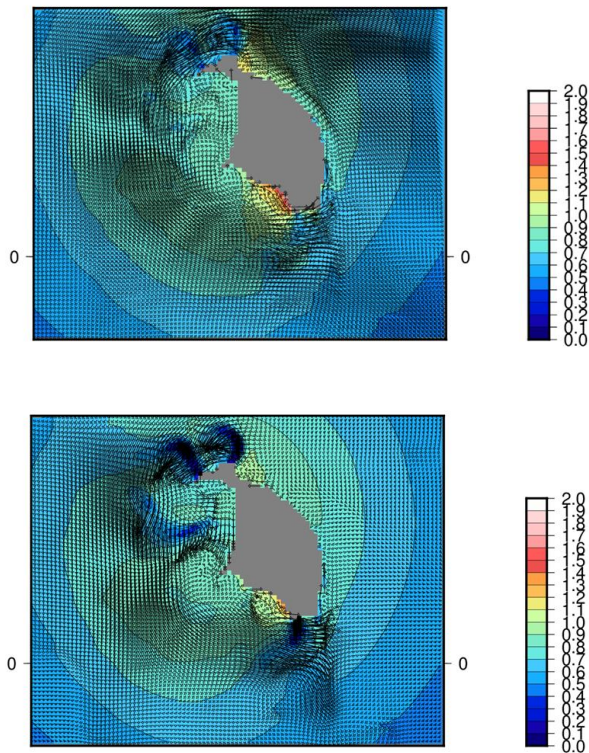


図-8 Barbuda島周辺、潮位偏差・表層流速図  
(上)鉛直多層 (下)鉛直単層

の結果は観測値と比較し過小評価となり、3Dモデルの結果は観測値に近づいた事が確認された。

4章2節による検討では、吸い上げ効果に着目すると計算潮位のピーク発生時点のタイミングは観測潮位のピーク発生時点と差異がある事が確認できる。一方、吹寄せ効果と wave setupに着目すると、観測潮位のピーク発生時点で潮位計算のピークが発生している事が確認できる。これは気象値と比較すると、気圧中心が Barbuda通過直後に風向きが南になった時点で潮位計算のピークが発生している事が確認できる。

4章3節による検討では、鉛直層格子サイズを小さく設定するに比例して、推算潮位と観測潮位の差が小さくなる傾向が確認できる。その中でも、10m以下からその傾向が顕著に見られる。これは、図-3の海底地形図から観測地点周辺は15~20m程度の水深が広がっていて、観測地点周辺において流体を含むセルが鉛直方向に多層となることによって推算潮位に影響があると確認できる。

4章4節による検討では、2Dによる計算結果と比較し3Dによる計算結果では、島の南側に位置する観測地点周辺で、表層流が岸側に向いている事が確認される。これらの結果から、Barbudaでの潮位上昇について吹寄せ効果が大きく付与しているのではないかと推測でき、

それを再現する為に三次元モデルを適用する事が重要である事が確認された。

#### 参考文献

- 1) Weisberg, R. and L. Zheng : Circulation of Tampa Bay driven by buoyancy, tides, and winds, as simulated using a finite volume coastal ocean model, *J. Geophys. Research*, 111(C1), C01005, 2006.
- 2) 白木喜章, 鈴木勝之, 井手善彦, 柴木秀之, 金城賢, 新城光雄, 古川哲己: 沖縄海域に適用可能な流動シミュレーションモデルの構築, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.71, No. 2, I\_397-I\_402, 2015.
- 3) National Hurricane Center in NOAA : Hurricane IRMA Advisory Archive, (<https://www.nhc.noaa.gov/archive/2017/IRMA.shtml>), 2017.
- 4) The Center for Operational Oceanographic Products and Services in NOAA : Tides & Currents, (<https://tidesandcurrents.noaa.gov/>).
- 5) Navionics : Chart Viewer (<https://webapp.navionics.com/>).
- 6) GEBCO(General Bathymetric Chart of the Ocean) : Gridded bathymetry data, (<https://www.gebco.net/>).
- 7) Myers, V. A. and Malkin, W. : Some properties of hurricane wind fields as deduced from trajectories, U. S. Weather Bureau, *National Hurricane Research Project*, Report 4, 1961.
- 8) Mitsuta, Y. and Fujii, T. : Analysis and synthesis of typhoon wind patters over Japan, *Bulletin Disaster Prevention Res. Inst., Kyouo Univ.*, Vol.37, Part4, No.329, pp.169-185, 1987.
- 9) Quiring, S., Schumacher, A., Labosier, C. and Zhu, L. : Variations in mean annual tropical cyclone size in the Atlantic, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, 2011.
- 10) 河合弘泰: 高潮数値計算技術の高精度化と気候変動に備えた防災への適用, 港湾空港技術研究所資料, No.1210, 97p, 2010.
- 11) 本多忠夫, 光易恒: 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.90-93, 1980.
- 12) 村上智一, 河野裕美, 下川信也, 水谷晃: 西表島網取湾における最大瞬間風速50m/sを超える台風時の流速・波浪観測, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No. 2, I\_469-I\_474, 2016.