ツバル国フナフチ環礁ラグーンの流動特性に関する数値計算

Numerical Simulations of Characteristics of Lagoonal Currents in Funafuti Atoll, Tuvalu

佐藤大作¹・横木裕宗²・有田正光³

Daisaku SATO, Hiromune YOKOKI and Masamitsu ARITA

Numerical simulation of the lagoonal currents and virtual particles advection was conducted in order to estimate the characteristics of the water pollution in the lagoon of Funafuti Atoll, Tuvalu. Comparison of the calculated current velocity and water surface elevation and the observed data showed good agreement. The calculated lagoonal currents showed that surface currents were driven by wind. On the reef-flat, the currents were formed by combined influences with wind and tide. Numerical simulation of virtual particles advection indicated that the particles which were installed in the nearshore of Fongafare Island were transported to the west-side of the atoll through a year. In the non-trade-wind season, the high retention of installed particles was calculated in the lagoon.

1. 序論

ツバル国フナフチ環礁では、近年、人口の集中するフォンガファレ島のラグーン沿岸における水質汚濁が問題となっている。フォンガファレ島では生活排水は地下の浄化槽へ貯留されるが、効率化のためボトムレスの構造となっているため、未処理の生活排水が潮汐に伴う地下水変動に応じて海域へと流出していることが指摘されている(藤田ら, 2012)。根本的な問題解決には水質汚濁の原因である生活排水の処理方法の改善が必要であるが、技術的・経済的理由から早急な改善は期待できないのが現状である。沿岸部から海域に流出した汚濁物質の挙動については検討されていないが、閉鎖的なラグーン海域に流出した汚濁物質の挙動は今後の対策を検討する上で重要な知見である。

一般的に、海域に流出した汚濁物質は海洋中の流れ場によって運ばれる(移流)とともに、汚濁物質の濃度勾配や乱流の効果によって拡がる(拡散)と考えられ、主にこれら二つの作用(分散)によって汚濁物質の挙動は決定されると考えられるが、ラグーン内の汚濁物質の挙動は主に移流によると考えられる。Damlamian (2008)はフナフチ環礁におけるラグーン内流動場に対して二次元流動モデル(MIKE21)を適用して数値計算を実施し、ラグーン内流動場の検討を行っているが、詳細な議論をするには至っていない。そこで、本研究ではフナフチ環礁を対象にラグーン内の流動場特性を数値計算により明らかにするとともに、算定された流動場に応じて移流される汚濁物質の移流特性を明らかにすることを目的とした。

2. フナフチ環礁の地形特性と海水汚染の状況

フナフチ環礁は太平洋西南部に位置するツバル国の首都である(図-1)。フナフチ環礁は一般的な環礁と同様の地形的特徴を有しており、サンゴ礁でできた環状の基盤上に有孔虫やサンゴ片から成る州島が形成されている。島幅は狭く、環状のサンゴ礁の内側に形成されるラグーンの水深は最深部でも40m程度であり、水深1000m以上となる外洋と比較すると極端に浅い地形となっている。

藤田ら(2012)はフォンガファレ島ラグーン沿岸において、海海底質および沿岸水の調査を実施し、沿岸水から最大で日本の環境基準の27倍の大腸菌が検出されたことを報告している。さらに、生活排水が潮汐変動に伴って沿岸の海底部から流出していることが沿岸水の汚濁要因であることを明らかとした。沿岸から流出した汚濁物質は、ラグーン内の流れや波によって分散し、希釈されると考えられるが、ラグーン内の流動特性は未知な部分

図-1 (a)ツバルの位置、(b)フナフチ環礁、図中の白抜き部分はリーフ、塗りつぶし部分は州島を示す。

1 正会員 博(工) 東京電機大学助教授理工学部理工学科建築・都市環境学系
2 正会員 博(工) 茨城大学教授工学部都市システム工学科
3 正会員 工博 東京電機大学教授理工学部理工学科建築・都市環境学系

が多く、汚濁物質の挙動に対する定量的な理解には至っていない。

3. ラグーン内流動場の算定方法

(1) 数値モデル

本研究ではBlumbergら(1987)により開発されたPOM(Princeton Ocean Model, Ver. 4.7.1)を使用して流動場の算定を行った。POMは自由表面を持つ σ 座標における静水圧近似を仮定した準3次元ナビエ・ストークス方程式系を採用し、鉛直渦動粘性および拡散係数の算定には2.5次元の乱流モデルが採用された流動モデルであり、湾や干潟などの浅水域に多くの適用例がある。なお、POMでは水温・塩分も変数として取り扱うことが出来るが、フナフチ環礁では河川流入などの恒常的な淡水流入が無いため、海域の塩分濃度は一定として取り扱った。また、日中、夜間および季節的に水温の急激な変化は生じないため水温についても一定として取り扱った。

(2) 海底地形データ

海底地形データは衛星画像および2分メッシュの全球標高・水深データ(ETOPO2)より作成し、0.003度メッシュ($\approx 333\text{m}$)のグリッドデータを作成した(図-2)。データの存在しない外洋部は境界部の水深を使用して拡張した。水平方向のメッシュ数は 154×54 とし、鉛直方向の分割数は5分割とした。

(3) 水位境界条件

開境界で与える水位境界条件には国立天文台より提供されている短周期海洋潮汐モデル(NAO.99b)(Matsumotoら, 2000)から得た6s間隔の水位変動を使用した。環礁周辺の数点の緯度経度を与えて得た水位変動を比較したところ大きな相違は確認できなかったため、開境界全域で同一の値を与えた。

(4) 風場条件

最大水深が数十メートルと浅いラグーンでは、風による吹送流の影響も大きいと予想される。そこで、オーストラリア気象局にアーカイブされているフナフチ環礁で観測された1時間毎の風速・風向値の過去5年分のデータから月平均風速および風向を算出して使用した。また、計算精度の検証では1時間毎の風速・風向値を与えた。なお、風速場は計算領域に一樣に与えた。

(5) 計算条件

現地観測結果と比較するため、計算対象は2010年の1年間とした。なお、風場の境界条件については、流動場計算結果の妥当性の検証では1時間毎の結果を用い、汚濁物質の挙動に関する検討では、月平均の値を用いた。流速場を算定するInternal modeでの計算間隔は6sとし、水位変動等を算定するExternal modeの計算間隔は0.6sとした。水温 29°C 、塩分濃度35psuで一定とし、計算の実施

図-2 計算領域と水深データ

に当たっては、1か月間の助走期間を設けた。

4. ラグーン内流動場の計算結果

(1) 流動場の計算精度の検証

計算された流速と水面変動を現地で観測された結果と比較し、計算結果の妥当性の検証を行った。使用する現地観測データは2010年4月2日から2010年8月9日に電磁流速計によって海底面(水深約8m)で観測された結果を使用した(観測地点は図-1(b)参照)。観測は毎正時20分間、サンプリング周波数は2Hzで行われ、取得したデータを1時間毎のデータに平均処理して用いた。

図-3に水面変動と流速の計算値と実測値の比較結果を示した。同図より水面変動は実測値と観測値でほぼ同一の変動となっていることが分かる。同図中に示した水面変動誤差は0.2m以下であり、ラグーン内の水位変動を精度良く計算出来ていることが確認された。また、流速についても実測値に見られる変動を良く再現していると考えられた。流速変動の実測値は、潮位変動よりも同図下部に示した風速変動に対応しており、風場によって生じる吹送流が支配的な流動要因となっていると予想された。6月初旬や7月初旬で流速の計算値が大きくなっているが、同期間の風速の観測値に突発的に大きな風速が生じていることが分かる。計算では1時間毎に一定の風速値を1時間作用させているため、流速値が大きくなり計算され実測値との差異が大きくなったと考えられた。こうした差異はあるものの、潮位変動および風が作用して生じた流れを捉えた観測値を計算結果は良く再現していると考えられた。

(2) ラグーン内流動特性

フナフチ環礁ラグーン内の流動特性について代表的な流動場を取り上げて検討を行った。図-4は小潮における上げ潮・下げ潮時の流速分布を示しており、同図 (a)

および (b) は表層の流速分布を示している。7月は南東方向からの貿易風が卓越する時期であり、流動場はその影響を強く受け、北西方向の流れが発達していることが分かる。一方、同図 (c), (d) に示した底層での流速分

図-6 仮想粒子の移流計算結果(1月)

布には貿易風の影響は明確には確認できず、ラグーン中央部分では北東方向に向かう弱い流れが生じていた。上げ潮時にはラグーン内の水位上昇と比較して外洋の水位上昇が速くなると考えられるため、流れの向きは外洋からラグーンへの方向が卓越すると予想されるが、底層部の流速ベクトルは逆向きとなる結果となった。

図-5は大潮における上げ潮・下げ潮時の流速分布を示している。同図 (a), (b) に示した表層の流速分布より、小潮時と同様に南東からの貿易風の影響を強く受けていることが分かる。さらに、外洋の水位変動が大きくなるため、外洋-ラグーン間の水変化も大きくなり、リーフ上で生じる外洋-ラグーン間の流入・流出流が顕著に現れていることもわかる。小潮の下げ潮時には確認できなかった環礁北部および南東部リーフ上での流出流が顕著に生じているが、その流れは局所的であり、ラグーン全体に影響を及ぼすものではないことが分かった。図-5 (c), (d) に示した大潮時の底層におけるラグーン内流速ベクトルは小潮時の流動場と同様の傾向を有しており、潮汐変動が大きくなっても底層の流動場に大きな変化は生じていなかった。リーフ上での潮位変動に応じて生じる往復流自体は大潮時には大きくなるが、表層の流速と比較すると微小であり、また、局所的な流れでラグーン内の流動場に大きな影響を与えるものではないと予想された。

他の月も同様に、表層では風による吹送流が支配的であり、リーフ上では潮位変動に伴う流れが局所的に生じていた。また、フォンガファレ島沿岸では年間を通して流速が小さく、活発な流動は生じないことが分かった。

5. 仮想粒子の移流解析

(1) 仮想粒子の計算方法

フォンガファレ島沿岸から流出した汚濁物質の移流過程を明らかとするため、仮想粒子を用いた移流解析を行った。汚濁物質と仮定する仮想粒子は体積・質量を無視し、その場の流速に応じて移流されるものと考えた。初期仮想粒子として、フォンガファレ島沿岸の海底部に28,000個の仮想粒子を均等に配置した(図-6 (0日初期))。また、仮想粒子は各月の初めに配置し、各1ヶ月間の移

流を算定した。

仮想粒子の移動はその場の流速に応じて生じると考え、1時間毎に出力した流動場の諸量を利用し、仮想粒子位置を10分間隔で求めた。なお、島境界および水面・底面を越える仮想粒子の移動が生じないように処理を行った。また、流動場の算定によって得られた流速値はメッシュ上で定義されているため、任意の点における流速値を仮想粒子の周囲4点の流速値から内挿して求めた。

(2) 仮想粒子の移流特性

図-6にフォンガファレ島沿岸部に投入した仮想粒子の1月の流動場における移流状況の計算結果を示した。同図よりフォンガファレ島沿岸に配置した仮想粒子の多くはラグーン西側へと移流され、5日程度でラグーンの中央部付近まで運ばれていることが分かる。その後も西側へと運ばれ、20日後以降に環礁西部のリーフ上から外洋側へと流出する結果となった。また、一部の仮想粒子は1ヶ月後においてもフォンガファレ島沿岸部に残存することが確認された。こうした沿岸部での仮想粒子の残存は他の月における計算結果でも確認されたことから、フォンガファレ島沿岸から流出した汚濁物質の一部は沿岸部に滞留しているものと予想された。

図-7は各月における代表的な仮想粒子の移流軌跡を図示したものである。同図より1, 2月では他の月と比較してやや北寄りに移流され、2月は環礁北西部も含む比較的広範囲に広がっていることが確認された。また、5月や6月など南寄りに移流される時期もあるが、全ての月で仮想粒子は最終的に環礁西～西南西部に運ばれ、外洋側へと流出していることが分かる。以上より、フォンガファレ島ラグーン沿岸では恒常的に西向きの流れが存在し、季節的に北寄り、南寄りにその流れがシフトする特徴があることが分かった。

ところで、フナフチ環礁西部は保護区に指定されており、サンゴ礁環境の保全が行われている地区である。こうした地区に恒常的に汚濁物質が移流される可能性があることを示唆する結果であるが、現実的には汚濁物質は拡散現象によって薄まりながら移流される。汚濁物質のより詳細な分散現象の把握は今後の課題である。

図-7 各月の仮想粒子の移流軌跡

図-8 仮想粒子のラグーン内残留率(a)1～6月, (b)7～12月

図-8は仮想粒子のラグーン内残留率を月ごとに示したものである。同図より、月によってラグーン内残留率が大きく異なることが分かる。6月や10月では残留率が増加に転じている期間があるが、これは潮位変動に伴う往復流の作用によって、一度、ラグーン外へ出たものが、再度ラグーン内に流入したためである。また、2、5、11月ではラグーン内残留率が高く、ラグーン内に仮想粒子が滞留していることを示している。風場との対応を考慮すると、南東からの貿易風が弱まる11月から3月の時期にラグーン内に滞留しやすくなると考えられた。

6. 結論

本研究ではツバル国フナフチ環礁ラグーンを対象に、潮汐変動および風場に伴う流動場の数値計算を実施し、ラグーン内の海水流動特性に関する検討を行った。流動場の計算結果については、現地観測結果との比較を行い、

良好な一致が得られた。年間を通してラグーン内の流動場は風による影響を大きく受けるが、外洋とラグーンを繋ぐリーフ上では潮汐変動に伴う流れが局所的に発生することが明らかとなった。汚濁物質の移流を想定した仮想粒子の移流解析からは、フォンガファレ島沿岸からラグーン内へ移流される過程が明らかになるとともに、風場条件によってはひと月程度の間、仮想粒子がラグーン内に滞留し、その一部はフォンガファレ島沿岸に残存することが分かった。また、南東からの貿易風が弱まる11月から3月の時期にラグーン内残留率が高くなりやすい状況となることが明らかとなった。今後は汚濁物質の拡散も含めたより詳細な検討を進める予定である。

謝辞：本研究の一部は、JST-JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業（SATREPS）の支援を受けて行われたものである。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 藤田昌史, 井上龍太郎, 佐藤大作, 桑原祐史, 横木裕宗 (2012): ツバル国フナフチ環礁のラグーン海岸における生活排水の流出機構, 土木学会論文集G (環境), Vol.68, No.5, pp. I_121-I_125.
- Blumberg, A.F., and G.L. Mellor (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Vol. 4, edited by N.Heaps, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp.1-16.
- Damlamian, H. (2008): Hydrodynamic model of Funafuti: Water circulation and applications, EU EDF-SOPAC Project Report, 133, pp.1-25.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, Journal of Oceanography, 56, pp.567-581.