

フィリピン・ミンドロ島プエルトガレラにおける 海水流動と水質環境特性について

飯塚広泰*・田村 仁**・Maria Cecilia D. Rubio***・灘岡和夫****
Miguel D. Fortes*****・Rochelle L. Balitaan*****・Randell E. Villanueva*****

フィリピン・ミンドロ島プエルトガレラ周辺海域は、UNESCOの生物圏保存地域に指定されている貴重な自然環境を有する海域であるが、最近、観光開発の進展等によって環境破壊が進行している。本研究では、環境保全・改善策を講じていく上で基礎となる同海域の物理環境特性、特に海水流動特性を明らかにするべく、現地観測およびネスティング手法を活用した海水流動シミュレーションを行った。その結果、湾奥部の水質悪化に対する構造的脆弱性と、同海域全体での特徴的な海水流動パターンの存在を明らかにするとともに、この海水流動パターンの形成要因について考察した。

1. はじめに

フィリピン・ミンドロ島北端に位置するプエルトガレラは、図-1に示すように周りを島々に囲まれた閉鎖性海域を有している。その小さく静穏な湾内には、サンゴ礁・マングローブ・海草をはじめとする生物多様性に富んだ自然環境があり、生物・植物調査のサイトとして、また良好なダイビングスポットとして古くから親しまれてきた。1977年には本海域がUNESCOのMAB (Man and Biosphere) 計画による生物圏保存地域に認定され、本海域の自然環境が世界的に見ても、非常に貴重なものであることが国際的に認められた。しかしながら近年、(1)観光開発の急速な進展、(2)社会インフラ整備の遅れと、地元住民の生活様式の変化に伴う生活雑排水の本海域への直接流入量増加、(3)砂州(図-1)形成による湾内水の外海との海水交換の低下、などの人為的負荷の増大とそれが蓄積しやすい地形特性に起因して、湾内の著しい水質低下などの環境破壊が急速に進行している。これを受けて現在、地元自治体において砂州の除去を含む水質改善策が検討されている。

本海域に関しては、生物・植物調査は現在まで盛んに実施されているものの(Trono, 1972; Fortes, 1975)、自然保護・改善策を講じる上で必要不可欠となる物理調査に関しては、実施された例が少なく(例えば、San Diego-Mcglone ら, 1995)、その海水流動機構まで考察

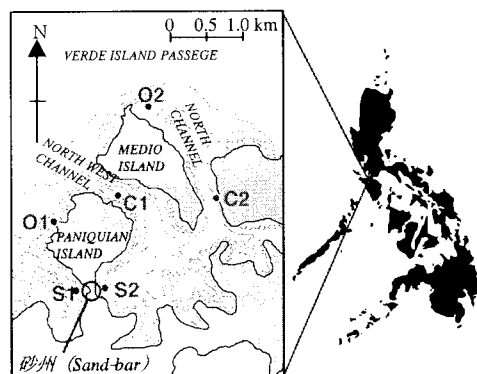


図-1 プエルトガレラの位置と定点観測地点

した例は見当たらない。

そこで、本研究では、この海域の基礎的な物理環境を把握し、その流動機構を解明することを目的として、現地観測を行うとともに、対象海域の海水流動シミュレーションを実施することにより、流動場の特性格解明を試みた。

2. 現地観測

(1) 現地観測概要

現地観測は、2004年9月14日から20日までの6日間に、海水流動計測、水位・波浪計測、水温計測を主体として行った。これらは基本的に、電磁流速計(アレック電子株, COMPACT-EM)、圧力式波高計(アレック電子株, COMPACT-WH)、小型水温計(Onset Computer Corp., HOBO Water Temp Pro)を係留ブイまたは海底に固定して行った。また、観測期間中の、9月15日の上潮・満潮・下潮・干潮の4期間に、多項目水質計(アレック電子株, AAQ1183)によって水温・塩分・濁度・Chla等の鉛直分布を計測することで、時空間的水質分布特性の把握を試みた。

電磁流速計は1秒間隔で5分間、30分毎の設定で測定し、また、圧力式波高計は0.5秒間隔で10分間、30分毎の設定、水温計は10分毎の設定で測定した。

*	東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程
** 正会員 博(工)	(独)海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター研究員
***	Master of Arts 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 博士課程
**** フェロー 工博	東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
*****	Professor of University of Philippines Marine Science Institute
*****	Marine Science Institute University of Philippines

定点連続観測は、図-1に示す湾内外を結ぶ2本のチャネル内の2地点(C1, C2)と砂州近傍の2地点(S1, S2), および湾外2地点(O1, O2)の合計6地点で行った。各地点での観測項目を表-1に示す。水質調査は図-2に示す湾内外の合計13地点で行った。

表-1 各地点の観測項目

地点	水深(m)	設置深さ	観測項目
S1	2.0	底層	流向・流速/波高/水温
S2	6.0	底層	流向・流速/波高/水温
C1	20.0	表層	流向・流速/水温
C2	10.0	表層	流向・流速/水温
O1	7.0	底層	水位
O2	8.0	底層	水位

*水温に関しては係留ブイでの水温計の鉛直アレイによって鉛直分布を測定した。

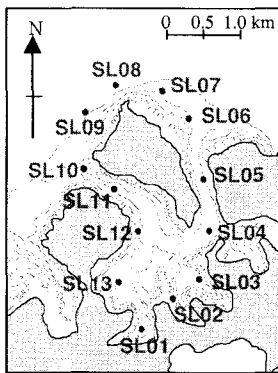


図-2 水質調査地点

(2) 観測結果および考察

a) 海水流動および水位・水温変動特性

観測期間中の気象条件はきわめて静穏であったことから、流動場は基本的に潮汐によって支配されていたものと考えられる。観測期間内の2日間の、湾外2地点(O1, O2)における10分間平均水位とチャネル部の5分間平均流ベクトルを図-3に示す。これから、この海域では、上げ潮のときに2つのチャネルでともに流入、下げ潮のときにともに流出、といった単純なパターンになっていないことがわかる。しかも、詳細に見ると、下げ潮後半から満潮にかけての相対的に長い期間、C1では湾に対して流入方向、C2では流出方向に流れが現れているのに対して、満潮から下げ潮前半にかけての比較的短い期間のみ流向が逆転して、C1では流出方向、C2では流入方向となっていることが確認でき、きわめて非対称性の強い特徴的な海水流動パターンが存在することがわかる。このことは、C1側のチャネルから流入しC2側のチャネルから流出するという、顕著な潮汐残差流パ

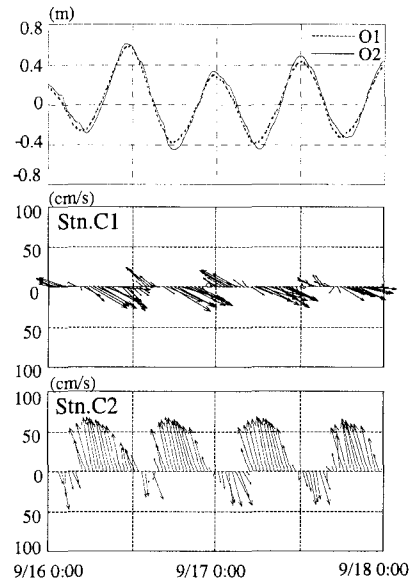


図-3 O1・O2平均水位とC1・C2平均流ベクトル

ターンが存在することを意味している。このような海水流動パターンの形成には、後で具体的に述べるように、プエルトガレラを含むこの海域一帯の複雑な地形特性が関与しているものと考えられる。

図-4は、観測期間内の3日間における、C1・C2での主軸方向流速と水温変動の時系列変化を示したものである。このうち主軸方向流速に関しては、湾に対して流入

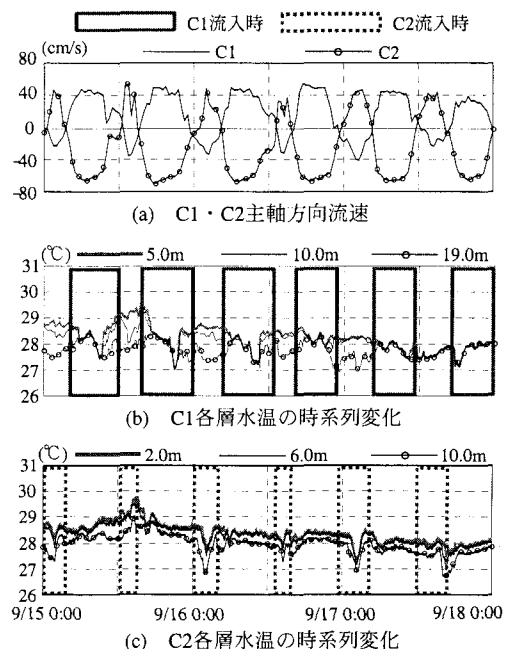


図-4 C1・C2主軸方向流速と水温時系列

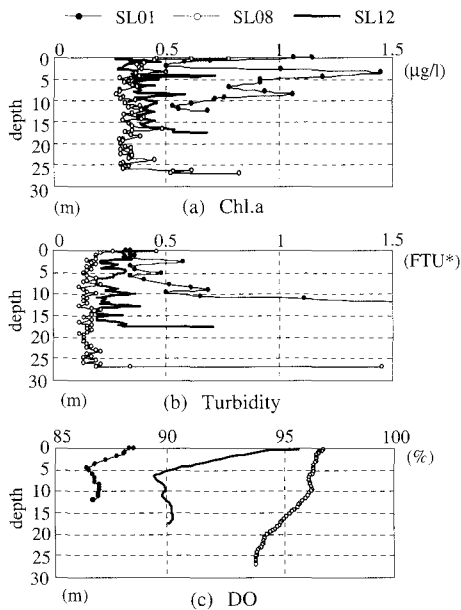


図-5 SL01・SL08・SL12でのChl.a, 濁度, DO
 *Formazine Turbidity Unit
 1 FTU とは水1 l 中にホルマジン1 mg を含む時の濁りに相当。
 1 FTU=1 NTU (Nephelometric Turbidity Unit)

方向への流れが正として表している。この図から、各々の地点において、互いに異なる流入位相時に、湾内に比べて冷たい湾外水塊の侵入によるものと思われる水温低下が全層にわたって現れていることが確認できる。これは、前述の海水流動パターンと符合する結果になっている。

b) 水質特性

図-5 は、SL01・SL08・SL12の3地点でのChl.a・濁度・DOの鉛直分布をそれぞれに関して比較して示したものであり、湾奥部ほど水質が悪化していることを示す結果となっている。これは、プエルトガレラの観光開発地域が湾奥部沿岸にあることから、そこが人間活動の影響を最も受けている海域であることと、後で述べる湾奥部の低い海水交換特性に起因しているものと考えられる。

3. 海水流動シミュレーション

現地観測によって得られた、特徴的な海水流動パターンの形成機構を解明することを目的として、平面2次元潮流計算による検討を行った。

(1) 数値モデル概要

基礎方程式系は連続式および浅水方程式とした。また、ここでは、プエルトガレラ湾外での流動場を把握した後、プエルトガレラにおける局所的な流動構造を再現する必要があったために、大きさの異なる2つの計算領

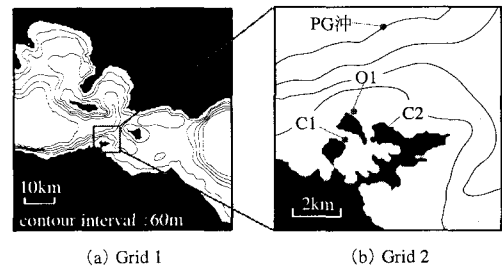


図-6 計算領域

表-2 計算条件

	Grid 1	Grid 2
領域サイズ	85 × 100 km	10 × 10 km
格子数	170 × 200	100 × 100
格子幅	500 m	100 m
計算時間刻み幅	2.0 s	0.4 s

域を設定し、ネスティング手法により両者をつなぐ形の平面2次元計算を実施した。

ネスティング計算法としては、上位領域の計算結果を下位領域の開境界条件として与える1-way手法を採用し、上位領域から下位領域へ各変数を受け渡す際、線形補完を適用した。また、領域間の計算誤差を抑制する必要性から、上位領域と下位領域の計算格子幅比は5:1とした。計算領域は、図-6に示すように、広域スケール領域としてルソン島とミンドロ島間を東西に横断するVerde Island Passage 全域を計算対象としたGrid 1 (計算格子幅: 500 m)、局所スケール領域としてプエルトガレラ周辺海域を計算対象としたGrid 2 (計算格子幅: 100 m)の2つの計算領域を設定した。各計算領域でのその他の計算条件を表-2に示す。

Grid 1の境界条件としては、領域内の流れの駆動力となっている東西境界での水位変動を、国立天文台の潮汐予測システム (<http://b50a.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/>) から得た水位データを主要四分潮に調和解析することにより与えた。流速に関しては放射境界条件を用いることで開境界条件とした。南北境界に関してはslip壁条件とした。なお、上記の国立天文台の水位データの空間分解能は緯度・経度ともに30分間隔で、かなり粗いことから、水位変動に関する境界条件値は内挿補完する形で与えている。したがって、そのための誤差が計算結果にある程度影響を与える可能性があることに留意する必要がある。

(2) 数値計算結果と考察

a) 本計算モデルの妥当性の検証

図-7は、Grid 2の数値計算によって得られたO1での水位の時系列変化を現地観測結果と比較したもので、概

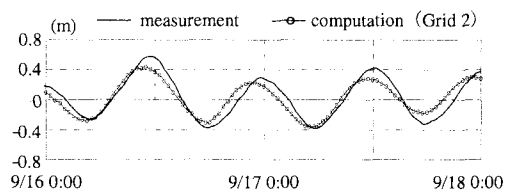


図-7 O1における水位変動の観測値と計算値の時系列

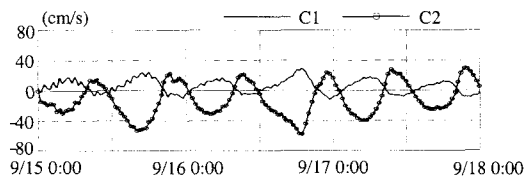


図-8 C1・C2主軸方向流速計算値

ね水位変動を再現できていることが確認できる。水位変動の振幅や位相に若干差が見られるのは、上記の水位の境界条件データに関する空間解像度の粗さに起因するものと考えられる。

図-8に、Grid 2の計算結果によって得られたC1・C2での主軸方向流速の時系列変化を示す。図-4(a)と同様に、湾に対して流入方向を正としている。これから、現地観測結果に見られたような非対称性の強い流速変動パターンが、この数値計算により再現できていることがわかる。C2における流入流速の出現のタイミングやC1・C2双方における流速変動振幅についての観測値と計算結果との若干の相違は、前述の水位変動振幅と位相のずれに起因しているものであると考えられる。

以上から、本数値計算モデルによって、この海域の海水流動の特徴を概ね再現できていることが確認できた。

b) 湾内の流動パターン

図-9は、Grid 2での、ある1潮汐間のC1での流入流速最大時の流速ベクトル分布を表したものである。これから、C1側のチャネルからC2側のチャネルへ向かう強い流れが生じていることがわかる。その他の期間を観察しても、この図で見られるように、プエルトガレラ湾内の流動パターンは湾外の流れの変動パターンと概ね連動していること、湾奥部の流速レベルが非常に低いことが特徴として挙げられる。湾奥部の流速レベルが低いことは、湾奥部は海水交換率が低く、水質汚染を受け易い状況にあることを示唆しており、先述の水質調査結果と整合するものである。

図-10はGrid 2の計算における、5潮汐間の流速の平均値として得られた潮汐残差流を計算したものであり、現地観測結果から示唆されたC1側のチャネルへ流入しC2側のチャネルから流出するという残差流パターンの

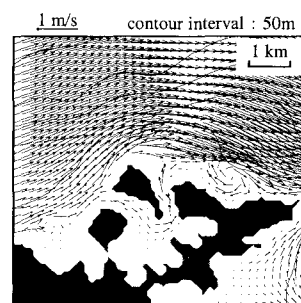


図-9 C1流入流速最大時における流速ベクトル

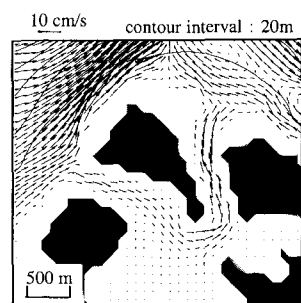


図-10 潮汐残差流パターン (Grid 2)

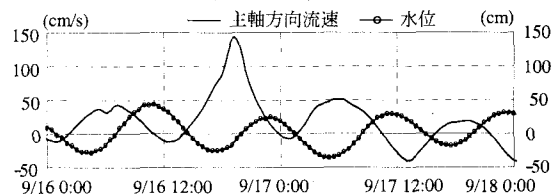


図-11 プエルトガレラ沖での水位と主軸方向流速 (Grid 2)

存在が明瞭に示されている。

c) 海水流動機構の解明

図-11は、Grid 2の計算におけるPG沖(図-6)での水位と主軸方向(ほぼ東西方向)流速の時系列変化を表したものである。主軸方向流速は東向きの流れを正として表している。これから、満潮から下げ潮前半にかけての期間のみ流向が逆転しているのが確認でき、PG沖においても、湾内と同様の流動パターンが表れていることがわかる。

図-12は、Grid 1での5潮汐間流速平均値としての潮汐残差流を表したものである。プエルトガレラ周辺の外洋域(図中枠内)に注目すると、東向きの強い残差流が形成されているのが確認でき、プエルトガレラ周辺外洋域に関しても、湾内と同様の非対称な流動パターンが存在することがわかる。

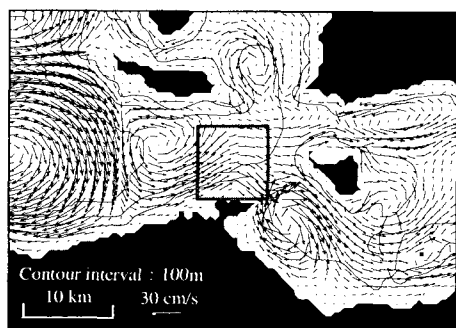


図-12 潮汐残差流パターン (Grid 1)

以上より、湾内で見られた非対称性の強い流動パターンはプエルトガレラ周辺の外洋域の流動パターンを反映

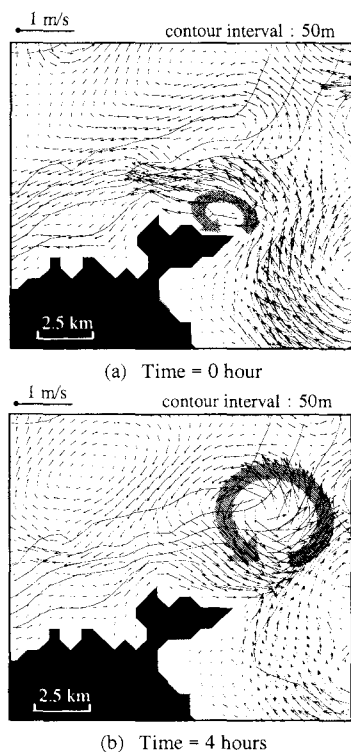


図-13 西向き流れ卓越時における流速ベクトル

したものであることが明らかになった。

図-13 は、Grid 1での、西向き流速が生じている期間前半とそこから4時間後におけるプエルトガレラ周辺の流速分布を示したものである。ここから、プエルトガレラの地形により、半時計回りの循環流が形成されていく様子が確認できる。この循環流の発達により、図-13 (b)においては、プエルトガレラ周辺の外洋域においては、東向きの流れが生じている。

このようなプエルトガレラを含むこの海域の複雑な地形特性が、プエルトガレラ沖において東向きの流れが卓越するという現象を引き起こしているものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、フィリピン・ミンドロ島プエルトガレラにおいて、現地観測調査と海水流動シミュレーションを実施した。その結果、プエルトガレラ湾奥部が容易に水質が悪化する環境にあること、プエルトガレラを含む海域に非対称性の強い流動パターンが存在することを明らかにするとともに、その形成要因を考察した。今後、より本格的な3次元密度流計算や数値実験等を実施することによって、より詳細な力学過程の内容を明らかにするとともに、湾内水質の変動過程や砂州除去の有効性を検討していく予定である。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A (1) (海外学術調査) (研究代表者：灘岡和夫、課題番号：15254002) を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- Fortes, M. D. (1975) : Algal Associations of Mangrove Communities in Puerto Galera, Oriental Mindoro, M.S. Thesis, University of the Philippines, 185p.
- San Diego-McGlone M. L., C. L. Villanoy and P. M. Alino (1995) : Nutrient mediated stress on the marine communities of a coastal lagoon (Puerto Galera, Philippines), Marine Pollution Bulletin, Vol. 31, Nos 4-12, pp. 355-366.
- Trono, G. C., Jr. (1972) : The marine benthic Chlorophyta of Puerto Galera, Oriental Mindoro, Philippines, Univ. Philipp. Natur. Sci. Res. Center Tech. Report No. 1, pp. 1-26.