

51. 水平拡散を考慮したことによる フナフチ環礁ラグーンの流動場特性の変化

朝原 大貴^{1*}・江口 三希子¹・佐藤 大作²・横木 裕宗³

¹茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程都市システム工学専攻（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

²東京電機大学理工学部建築・都市環境学系（〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂）

³茨城大学工学部都市システム工学科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

* E-mail: 14nm802x@vc.ibaraki.ac.jp

環礁の地形的特徴から、ラグーンは外洋から隔離されており閉鎖性が高く、海水交換が活発に行われにくい。そのため、ラグーン内に汚濁物質が滞留する可能性があることから、ラグーン内の流動場特性の把握が重要である。本研究では、ツバル国フナフチ環礁を対象とし、水平拡散を考慮した解析を行った。その上で、水平拡散係数は既往の研究から値を6ケース定め、水平拡散を考慮しない場合と比べて、ラグーン内の流動場特性がどう変化するかを解析した。その結果、流速ベクトル、流速分布、水位変動、残差流ベクトルに変化が生じ、境界上の流速は小さくなることがわかった。残差流ベクトルよりラグーン北西の入射境界から時計回りに真西の入射境界へと流れる傾向があることがわかった。

Key Words : Funafuti atoll, tidal residual current, horizontal mixing, enclosed coastal seas

1. はじめに

環礁州島とは環礁上に形成された細長い島のことであり標高が低い。そのため、利用可能な土地と資源が限られており、環境変動に対する脆弱性が高いとされる。中でも、熱帯の環礁上に成立する小島嶼国（ツバル、キリバス共和国、マーシャル諸島共和国、モルディブ共和国など）では、土砂を継続的に供給する河川もなく、国土のほぼすべてがサンゴ礁起源の砂（主に有孔虫）から形成される¹⁾。

近年、環礁州島において人口の増加や経済成長に伴う環境への負荷の増大が問題視されている。中でも、生活排水や処理施設の整備不足により州島陸域から発生した生活排水が、地中を通じてラグーン海岸に流出していることが明らかとなっている²⁾。流出した汚濁物質は、有孔虫の生息環境の変化や共生している藻類との関係に悪影響を及ぼす。そのため、国土形成を担っているサンゴ礁の劣化を引き起こし、国土の喪失につながる恐れがある³⁾。

汚濁物質による海水汚染は、環礁内の流動場と深い関係がある。環礁の地形的特徴から、環礁内の海域（以下、

ラグーン）は外洋から隔離されており閉鎖性が高く、海水交換が活発に行われにくい。そのため、ラグーン内に汚濁物質が滞留する可能性があることから、ラグーン内の流動場特性の把握が重要となる。

環礁での海水交換が生じる要因には、潮汐流、吹送流、海流などが挙げられる。その中でも、流れの変化を支配するもっとも大きな要素は潮位変動と考えられる⁴⁾。潮位変動によって生じる流れは、ラグーン内の循環に影響を与えるものと考えられている。

江口⁵⁾は、ツバル国フナフチ環礁ラグーンを対象として、潮汐流によるラグーン内流動場の特性について解析しているが、その際水平拡散は考慮していない。水平拡散は、水平方向において、乱れによって運動量を混合させる効果を持っており、流れに対して摩擦のような効果を持つ。そのため、水平拡散を考慮することは、実際の流れの計算を行う上で重要である。

本研究では、水平拡散を考慮した解析を行い、水平拡散を考慮しない場合と比べて、ラグーン内の流動場特性がどう変化するかを解析することを目的とした。また、現地での観測データと解析結果の流速を比較し、再現性について考察を行った。

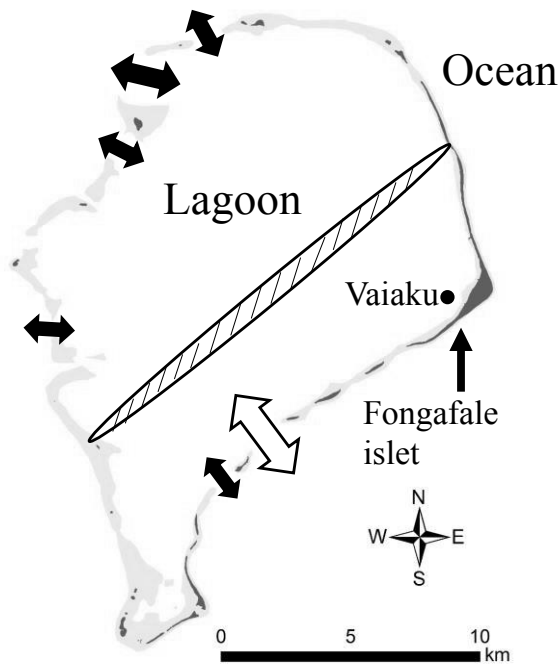


図-1 フナフチ環礁（図中の斜線部分で流速分布を求めた）

表-1 日本の代表的な閉鎖性内湾との比較

	容積(km ³)	海水流入量/容積(%)	湾口断面積/容積(km ⁻¹)
東京湾	15.2	12.6	0.016
伊勢湾	33.9	8.3	0.014
大阪湾	39.2	5.5	0.013
フナフチ環礁	5.2	8.3	0.013

2. ツバル国フナフチ環礁

ツバル国は南太平洋上に位置し、4つのサンゴ礁に囲まれた島と5つの環礁から形成されている。ツバルの首都であるフナフチ環礁（図-1）は、南北および東西に20 kmの大きさで、ラグーン内の水深は最も深い場所で約50 mである。また、フナフチ環礁東部のフォンガファレ島には、ツバルの人口の約半分にあたる5千人ほどが集中して居住しており、人口集中による環境問題が起きている。

表-1は、フナフチ環礁の閉鎖性を把握するために日本の代表的な閉鎖性内湾と比較したものである。閉鎖性は、海水流入量に対する容積の比（%）と湾口断面積に対する容積の比(km³/km²)で評価した。フナフチ環礁の容積と海水交換量は、江口⁵で用いられた海図を空間格子間隔0.003°（331m）のメッシュを用い算出した。日本の代表的な閉鎖性内湾の容積と海水交換量は、有田ら⁶でのデータをもとに算出した。フナフチ環礁の海水流入量に対する容積の比（%）は、伊勢湾と同程度である。また、フナフチ環礁の湾口断面積に対する容積の比

表-2 水平拡散係数の既往の研究

水平拡散係数 A_h (m ² /s)	
$A_h=1$	高山ら(1998) ⁸⁾
$A_h=30$	岩佐ら(1983) ⁹⁾
$A_h=1000$	岩佐(1995) ¹⁰⁾

(km³/km²)は、ほとんど差がない結果となった。これらから、フナフチ環礁は、日本の代表的な閉鎖性海域とほぼ同じ閉鎖性を持つといえる。

3. 解析方法

(1) 基礎方程式

本研究では、Guo and Yanagi⁷⁾の数値モデルを用いて解析を行った。運動方程式は、次の式(1)、(2)で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

また、連続の式は式(3)のように表される。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^0 u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^0 v dz = 0 \quad (3)$$

ここで、 x, y, z ：水平2方向と鉛直方向の座標、 u, v ： x, y 方向の流速(m/s)、 t ：経過時間(s)、 ζ ：平均海水面からの水位変動(m)、 A_h ：水平渦動粘性係数(m²/s)、 g ：重力加速度(=9.81m/s²)、 f ：コリオリ係数（フナフチ環礁は、南緯8.517度に位置するので、 $-2.16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ）である。 A_v は鉛直渦動粘性係数(m²/s)であり、本研究ではプラントルの混合距離理論を用いて算出した。

計算では、広領域の計算を効率よく行えるADI法を利用し、流速成分を求める際には、2つに分けるvelocity splitting methodという手法を用いた。

(2) 水平拡散係数の決定

水平拡散係数はラグーン内で分布を持つと考えられるが、本研究では、水平拡散係数の値は一定値として与えた。既往の研究で用いられた水平拡散係数の値を表-2に示した。本研究では、水平拡散係数の値を次の6ケース1, 10, 30, 100, 500, 1000で解析を行った。

4. 簡易地形における解析

(1) 解析条件

水平拡散の効果を検証するために、20km×20kmの簡易

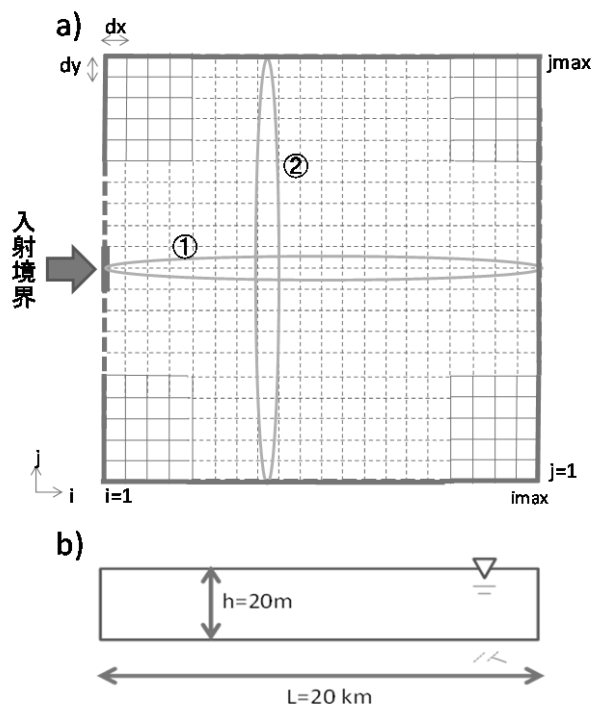


図-2 a) 計算格子, b) 地形断面

地形を用いて解析を行った(図-2a, b)). 入射境界で潮汐による水位変動を与えた. 水位変動は, 12時間周期とし, 1周期目は徐々に振幅が大きくなるように与え, 2周期目以降を振幅1mとした. 解析は4周期間行い, 流動場の解析には3周期目を用いた. 計算のタイムステップは30sとした.

(2) 解析結果と考察

解析結果は, 流速ベクトル, 残差流ベクトル, 水位変動, 流速分布で整理した. ここでは, 流速分布を図-3, 図-4に水位変動時間差を図-5に示した.

a) 流速分布

図-2 a) の①と②の地点における3周期目における最大流速を流速分布とし比較を行った. 図-3は①の範囲における流速分布であり, 水平拡散係数 A_h を大きいパターンにするに従って流速分布はだんだんと小さくなることがわかった. 水平拡散係数 A_h を500, 1000のパターンにすると, 入射境界から4km地点から流速は非常に小さく, 入射境界の正面の境界まで潮汐波が届かないことがわかった. また, 図-4は②の範囲における流速分布であり, 水平拡散係数 A_h を大きいパターンにするに従って, 陸域境界の流速は非常に小さくなることがわかった.

よって, 水平拡散の効果である運動量の拡散が生じたと考えられる.

b) 水位変動

計算を開始してから30時間後における入射境界部分と

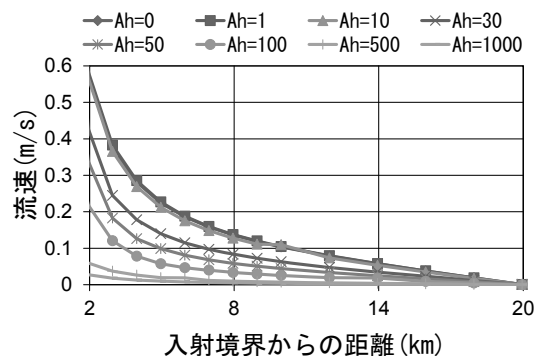


図-3 入射境界からの距離と最大流速

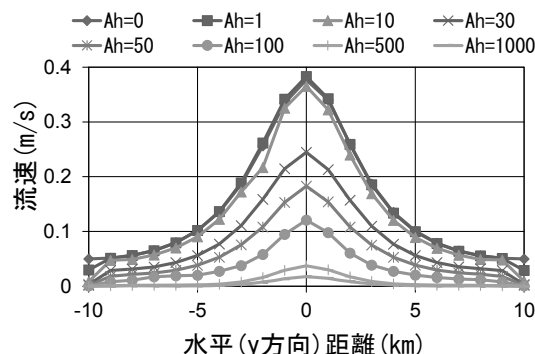


図-4 水平(y方向)距離と最大流速

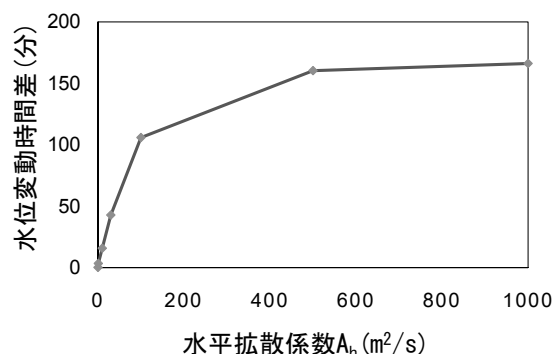


図-5 簡易地形における水位変動時間差

入射境界の正面の境界における水位変動時間差を図-5に示した. 水位変動時間差とは, 入射境界から流入し, 入射境界付近における水位が上昇し最高位になった時間と入射境界の正面の境界における地点で水位が最高位になるまでの時間差のことである. 水平拡散を考慮しない場合, 水位変動の時間差はほぼ0であった. 水平拡散を考慮することで水位変動時間差が生じ, 水平拡散係数 $A_h=100$ まで急激に上昇し, それ以降一定であることがわかった.

5. フナフチ環礁における解析

(1) 解析条件

フナフチ環礁ラグーン内の水深データは, 海図を空間格子間隔 0.003° (331 m) のメッシュに変換したものを用

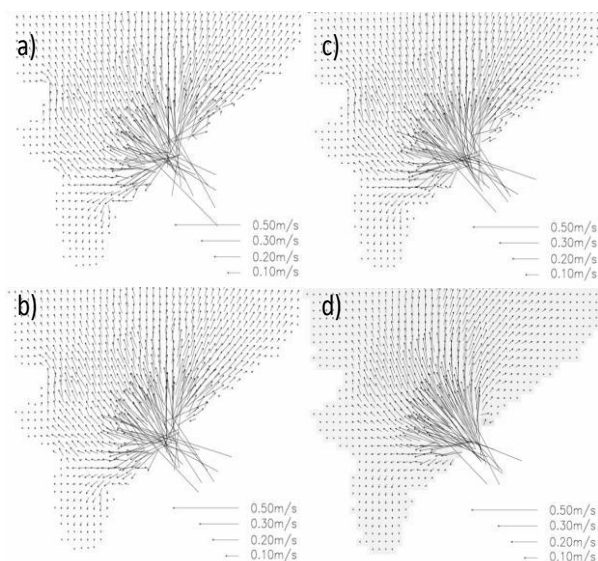


図-6 流速ベクトル：a) 水平拡散係数 $A_h=0$, b) 水平拡散係数 $A_h=30$, c) 水平拡散係数 $A_h=100$, d) 水平拡散係数 $A_h=500$

いた。本研究では、単一入射境界、複数入射境界と2パターンの解析を行った。単一入射境界では、ラグーン東部を入射境界とした(図-1:白抜き矢印)。次に、フナフチ環礁の主要な入射境界である6か所を(図-1:白抜き矢印と黒矢印)選定し、複数入射境界として解析を行った。解析条件は、簡易地形と同じ条件とした。

(2) 解析結果と考察

a) 流速ベクトルと流速分布

単一入射境界における、計算を開始してから36時間目の流速ベクトルを図-6に示した。水平拡散係数 A_h が、0, 1, 10, 30のケースのとき、流速ベクトルは、全方向に均等に広がった。水平拡散係数 A_h が、100, 500, 1000では、入射境界付近における流速ベクトルは、1方向に収斂し、中心部の流速ベクトルは大きくなった。これは、水平拡散により、入射境界付近における境界周辺の海水が動きにくくなり、逆に流路が限られてくるためであると考えられる。

複数入射境界における、水平拡散係数 A_h の値を変化させたことによる図-1上の楕円で囲まれた斜線部分の流速分布を図-7に示した。簡易地形と同様に3周期目における最大流速を流速分布の値とした。これより、水平拡散係数 A_h の値が大きいほど、流速が大きくなる地点が2箇所あった。図-8の水深分布より、水深の浅い海域で流れが速くなり、深い海域で流れが遅くなる傾向があった。水平拡散を考慮したことで、それが顕著に生じたと考えられる。

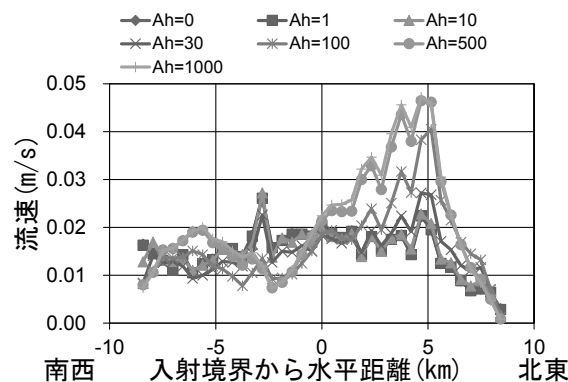


図-7 図-1上の斜線部分の流速分布

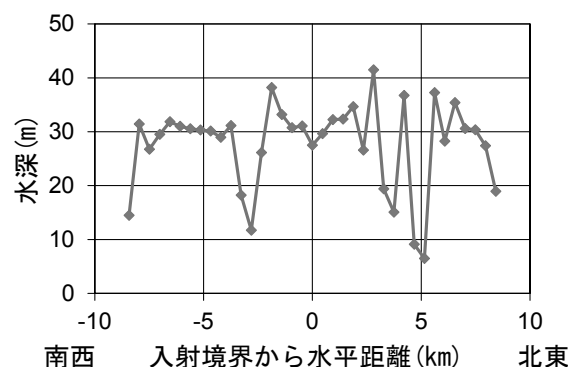


図-8 図-7の水深分布

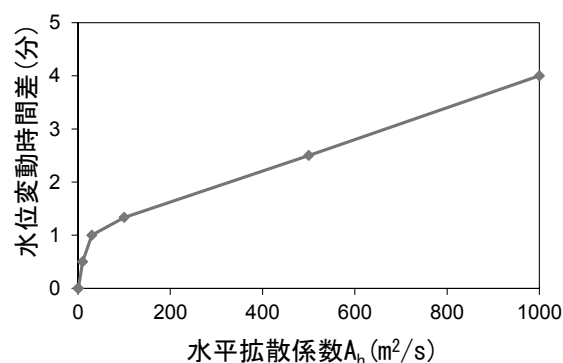


図-9 複数入射境界における水位変動差

b) 水位変動

図-9に水平拡散係数 A_h の値を変化させたことによる、南東部の入射境界とフォンガファレ島沿岸における水位変動時間差(分)を示した。簡易地形と同様に水平拡散を考慮したことで、水位変動の時間差が生じた。水位変動時間差は $A_h=30$ まで急激に増加し、それ以降水位変動差は、水平拡散係数の大きさに比例して増加することがわかった。これは、水平拡散によって潮汐波の入射境界からラグーン内部への伝播が、遅らされていくためだと考えられる。

c) 残差流ベクトル

流動場の1周期平均の特性を考察するために、一潮汐

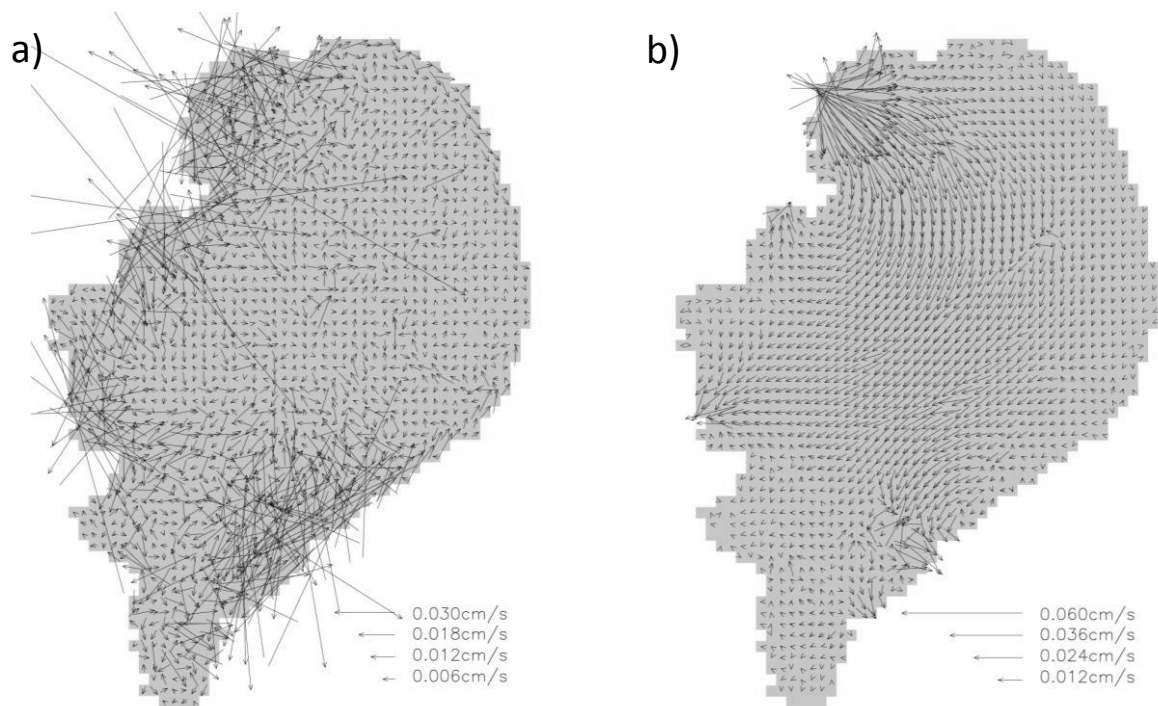


図-10 残差流ベクトル : a) 水平拡散係数 $A_h=0$, b) 水平拡散係数 $A_h=30$

間における正味の流れを表す残差流ベクトルを求めた。図-10に複数入射境界における水平拡散係数を考慮しない場合の残差流ベクトルと水平拡散係数が $A_h=30$ のケースにおける残差流ベクトルを示した。また、残差流ベクトルの値が $5 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 以上の値を示した。水平拡散係数を考慮しない場合の残差流ベクトルは、隣同士のメッシュでの値のばらつきが大きく、入射境界における残差流ベクトルの値が大きかった。水平拡散を考慮した場合、残差流ベクトルは北西における入射境界から時計回りに真西の入射境界へと流れる傾向があることがわかった。よって、ラグーン全体の循環が明確となった。また、水平拡散係数 A_h の値を大きいケースにすると、流れの傾向はほぼ一致したが、特に州島陸域に近づくほど残差流ベクトルは小さくなることがわかった。これは、水平拡散の効果と共に州島陸域境界でnon-slip条件としているためだと考えられる。

d) 現地の観測データとの比較

図-11にフォンガファレ島の中央部のラグーン側で、2010年の4月から6ヶ月間観測された1時間毎の流速の平均値と同じ地点(Vaiaku)における本研究の解析結果を比較したものを示した。解析結果と比べて、現地の流速は約2倍近く大きかった。これは、計算では潮流による流速のみを考慮しており、風による吹送流を考慮していないことが原因であると考えられる。また、水平拡散係数の値が $A_h=100$ のケース時を境に流速は小さくなり一定値となった。

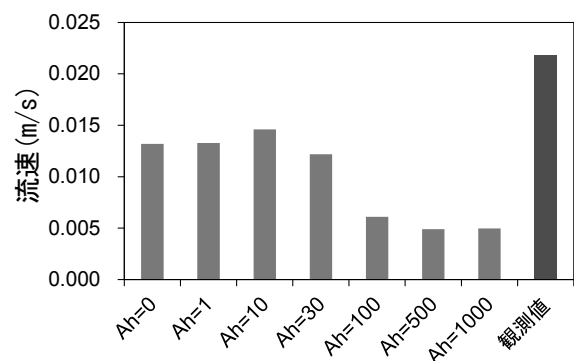


図-11 観測結果と解析結果の比較

6. 結論

本研究では、フナフチ環礁ラグーンを対象として、水平拡散を考慮した解析を行い、水平拡散を考慮しない場合と比べて、ラグーン内流動場特性がどう変化するか解析を行った。

- 水平拡散係数 A_h の値を大きいケースにすると、入射境界付近における流速ベクトルは収斂した。これは、水平拡散により入射境界の周りの海水が動きにくくなり、逆に流路が限られてくるためであると考えられる。
- 水平拡散を考慮したことにより、水位変動時間差が生じた。これは、水平拡散によって、潮汐波の入射境界からラグーン内部への伝播が遅らされていくためだと考えられる。
- 現地の観測データとの比較から再現性としては、まだ

低いことがわかった。風による吹送流を考慮していないことが1つの原因である。しかし、流動場特性の把握という面では、ラグーン内の循環が残差流ベクトルから明確となった。

本研究では、ラグーンの閉鎖性について簡易な方法で検討した。州島陸域から流出した汚濁物質は、ラグーン内に滞留し続けるのか。今後、吹送流や拡散を考慮し精度の高い解析を行う必要がある。

謝辞

本研究は、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

- 1) サンゴ礁地域研究グループ：熱い自然サンゴ礁の環境誌，pp. 3-372, 古今書院，1990.
- 2) Fujita, M. Suzuki, J. Sato, D. Kuwahara, Y. Yokoki, H. Kayanne, H.: Anthropogenic impacts on water quality of the lagoonal coast of Fongafale Islet, Funafuti Atoll, pp.110-119, 2013.
- 3) 茅根創：環礁州島の地形形成維持に関わる生体プロセス，水環境学会誌，Vol.33, No.8, pp. 123-140, 2010.
- 4) 鈴木毅，大葉英雄，土屋誠：サンゴ礁学未知なる世界への招待，pp. 3-91, 東海大学出版会，1973.
- 5) 江口三希子：潮汐残差流によるフナフチ環礁ラグーン内の流動場特性の解析，茨城大学卒業論文，2013.
- 6) 有田正光，中井正則，道奥康治，池田裕一，中村由行，村上和男：水圏の環境，pp. 297-308. 東京電機大学出版局，1990.
- 7) Guo, X. Yanagi, T.: Variation of residual current in Tokyo Bay due to increase of fresh water discharge, Continental Shelf Research, Vol. 18, pp. 677-694, 1997.
- 8) 高山知司，吉岡洋，大栗剛：閉鎖性領域内の海水交換の特性，海洋開発論文論文集, Vol.14 pp. 525-530, 1998
- 9) 岩佐義朗，井上和也，足立敏之：琵琶湖湖流の三次元的な解析，京都大学防災研究所年報，第26号 B-2, 1983.
- 10) 岩佐義朗（編著）：数値水理学，丸善株式会社出版，1995.