

3次元流動モデルによる八代海の 潮流特性の解析

NUMERICAL INVESTIGATION OF TIDAL CURRENT IN YATSUSHIRO SEA WITH USING THREE-DIMENSIONAL MODEL

村上啓介¹・上久保祐志²・古松琢美³・上原功⁴

Keisuke MURAKAMI, Yuji KAMIKUBO, Takumi FURUMATSU and Isao UEHARA

¹正会員 博士(工学) 宮崎大学 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

²正会員 博士(工学) 八代工業高等専門学校 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627)

³正会員 修士(工学) 日本海洋コンサルタント(株) (〒102-2282 東京都江東区東砂 7丁目 19番 31)

⁴正会員 若築建設(株) (〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18)

Characteristics of tidal current in Yatsushiro Sea are investigated numerically with using a three-dimensional model. Both Yatsushiro Sea and Ariake Sea are included in a computational region in order to consider a mutual interaction between both Seas. Effects of discharge from nine principal rivers are also considered in this computation. A computed result shows that Nagashima channel plays a dominant role in the seawater exchange of Yatsushiro Sea. The seawater exchange between Yatsushiro Sea and Ariake Sea are also significant. A residual flow on the western side of Yatsushiro Sea shows a complicated pattern due to the intricate sea topography, though velocities of the residual flow on the eastern area of the Sea are relatively small and flat.

Key Words : Yatsushiro Sea, Ariake Sea, tidal current, residual flow, three dimensional tidal model

1. はじめに

閉鎖性海域における水質悪化は我国各所で問題となっており、改善のための調査や対策が実施されつつある。本研究で対象とする八代海においても、赤潮の発生による沿岸漁業や養殖業への被害が幾度となく報告されており¹⁾、海域環境の保全・回復が望まれている。

筆者らは、陸域、海面および海底面から流入する負荷の輸送過程を考慮して八代海域内の水質環境を予測・検討するための手法の確立を目指している。そのためには八代海の潮流の力学構造を適切に予測あるいは把握することが重要となるが、八代海の潮流に関する調査・研究例は非常に少なく^{2) 3)}、海域内の潮流場に関する知見の蓄積が必要と考える。このような背景より、本研究では八代海の潮流計算を実施し、計算結果と既往の現地調査結果、および今回実施した現地調査(漁業者への聞き取り調査: 沿岸26地点)を比較しつつ、八代海における潮流特性を明らかにすることを目的とした。

八代海は、長島海峡と黒ノ瀬戸を通じて東シナ海と海水交換をおこなうとともに、幾つかの狭い瀬戸によって有明海とも海水交換をおこなっている。田中ら⁴⁾は、有明海の潮位変動を予測する際に、八代海との海水交換を考慮することで予測精度が向上することを示しており、両海域は潮汐変動に関して相互に影響しているものと思われる。また、八代海の海域内には多数の島が点在し、水深変化が大きいことから、3次元的な潮流場が形成されていることも予想される。さらに、両海域には多数の一級河川が流入しており、潮流計算を行う際に密度が異なる河川水の流入の影響を考慮することも重要と思われる。そこで、本研究では有明海を含む計算領域を設定し、3次元流動モデルにより潮流計算をおこなうこととした。

2. 数値モデルと計算結果の妥当性の検討

(1) 数値モデルの概要

本研究では、図-1に示す有明海と八代海を含む

計算領域を設定し、中辻ら⁵⁾の流動モデルを用いて潮流場の数値計算をおこなった。計算に用いた基礎式は、以下に示す連続の式、Navier-Stokes 式、塩分濃度偏差および水温偏差に関する移流拡散方程式である。温度偏差に関する基礎式には海面加熱による生成項が付加されているが、本計算で海面加熱は考慮していない。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = fV - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -fU - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial V}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (2c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \Delta T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{dq}{dz} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta S}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta S}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta S}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial \Delta S}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3b)$$

U, V, W はそれぞれ x, y, z 方向の平均流速で、 ρ は海水密度 (ρ_a は海水の基準密度)、 f はコリオリパラメータである。 ΔT と ΔS は海水温および海水塩分濃度の基準値 ($T_a=20^\circ$, $S_a=33\text{‰}$) からの偏差を表している。海水の密度は、 ΔT と ΔS に関する移流拡散方程式の計算結果を密度の状態方程式に適用して求めている。式中の A_H, A_V は水平および鉛直渦動粘性係数を表し、それぞれ $A_H=50\text{m}^2/\text{s}$, $A_V=1.0 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ とした。 K_H, K_V は水平および鉛直渦動拡散を表し、 $K_H=50\text{m}^2/\text{s}$, $K_V=1.0 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ とした。

表-1 流入河川の流量

水 系	流量 (m ³ /s)			
	平均	最大	豊水	平水
本明川	1.09	30.84	1.00	0.76
六角川	1.59	108.19	1.38	0.85
筑後川	53.26	583.08	55.85	42.60
嘉瀬川	9.26	148.39	10.48	8.01
矢部川	6.97	98.13	8.24	4.80
菊池川	14.67	206.58	21.08	11.48
白川	14.49	183.78	19.56	12.83
緑川	13.20	225.94	17.76	9.41
球磨川	49.70	1347.32	51.49	33.06

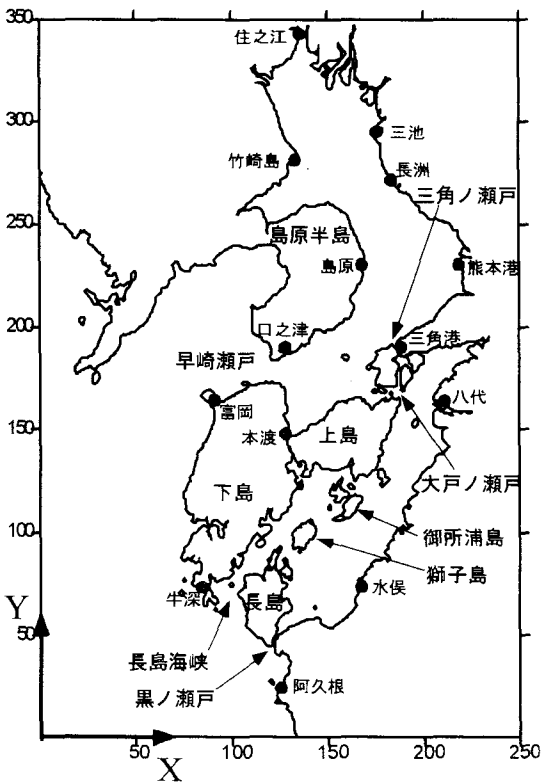


図-1 計算領域と潮位の比較地点

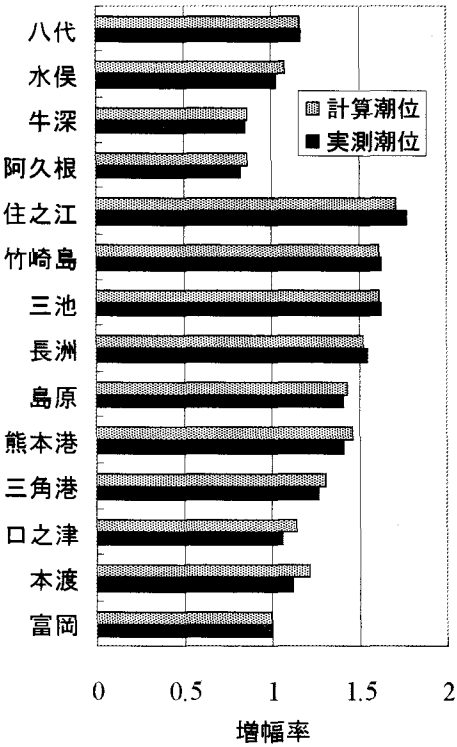


図-2 八代海および有明海沿岸における潮位増幅率の比較 (富岡を基準)

計算では、x, y 方向の計算格子は 400m, 計算時間間隔は 4 秒とした。深さ方向には 11 層に分割し、最上層から順に 3m×3 層, 5m×3 層, 10m×4 層, それで深×1 層とした。東シナ海に面した開境界で潮位振幅 1m の M_2 潮を境界条件として与えて計算をおこなった。また、数値計算では表-1 に示す主要河川からの流入を考慮した。河口部となる計算格子で流速、水温および塩分濃度を境界条件として与えた。ここでは、流量としては平均流量、水温と塩分濃度

は球磨川河口部における観測値⁶⁾から求めた年平均値を参考に 18℃および 10‰として計算をおこなった。

(2) 計算結果の妥当性の検討

計算結果の妥当性を確認する目的で、八代海および有明海の沿岸各地点における潮位増幅率について計算値と実測値^{2) 7)}の比較をおこなった。

図-2 は、富岡における潮位振幅を基準に、沿岸

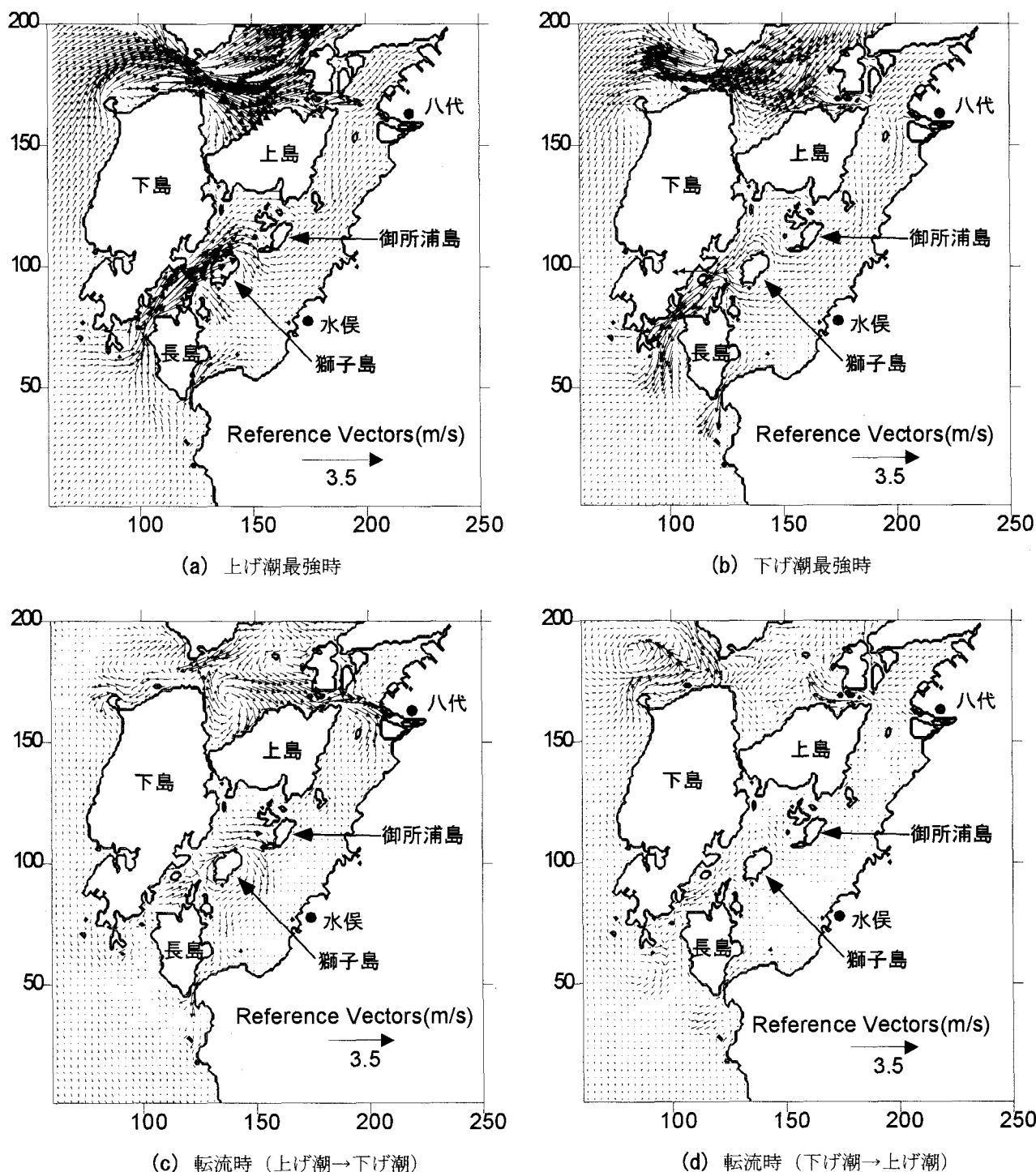


図-3 上げ潮時および下げ潮時の潮流ベクトル

各地点の増幅率を計算値と実測値で比較したものである。八代海については実測データが少ないため、海域内については八代と水俣の2地点、外海については長島海峡付近の牛深と阿久根の2地点で比較をおこなった。また、有明海沿岸については、本渡から住之江の各地点で増幅率を比較した。計算値と実測値の差には若干のばらつきはあるものの、両海域ともにその差は数%程度で計算値と実測値の一致の程度は良好であり、計算は妥当な結果を与えていると考えられる。

本研究では、八代海の沿岸26地点(図-4参照)で潮流の卓越方向について聞き取り調査をおこない計算結果と比較した。また、海上保安庁水路部の調査結果³⁾との比較もおこなった。その結果については次章で述べる。

3. 計算結果

(1) 上げ潮および下げ潮時の潮流特性

図-3は、一潮汐間の潮流場の変化を示したもので、(a)は長島海峡における上げ潮最強時、(b)は下げ潮最強時、(c)および(d)は転流時((c)上げ潮→下げ潮、(d)下げ潮→上げ潮)の潮流ベクトルをそれぞれ示している。

上げ潮時は、長島海峡と黒ノ瀬戸を通じて東シナ海から八代海に海水が流入する。長島海峡からの流れは天草下島東岸に沿って北上し、唐網代瀬戸(天草上島と御所浦島の間)、元ノ尻瀬戸(御所浦島と獅子島の間)、目吹瀬戸(獅子島と長島の間)に分流し、八代海中央部から北部海域に向かって北上する流れを形成している。また、八代海奥部では、大戸ノ瀬戸を通じて有明海から海水が流入し、宇土半

島の方向に北上している。

一方、下げ潮時は八代海全域で流れは南下し、その一部は黒ノ瀬戸から東シナ海へ流出している。他方、唐網代瀬戸、元ノ尻瀬戸、および目吹瀬戸を通過した後に天草下島東岸を南下し、長島海峡から流出している。また、八代海奥部では、南下する流れの一部が大戸ノ瀬戸を通じて八代海から有明海へ流出している。

上げ潮から下げ潮への転流時には、大戸ノ瀬戸や元ノ尻瀬戸からの流入は続いているが、八代海中央付近(水俣市沖)の流れは南向きに転じている。また、下げ潮から上げ潮への転流時の潮流パターンには、下げ潮の流況パターンが弱く残存している。

図-4は、八代海の沿岸26地点でおこなった漁業者への聞き取り調査から得られた潮流の卓越方向を示したもので、上げ潮時の流向を細線で示し、下げ潮時を太線で示している。図-3(a)、(b)に示した上げ潮最強時と下げ潮最強時の流れと比較すると、八代海全域および御所浦島、獅子島周辺の潮流方向について両者は一致している。ただし、目吹瀬戸(獅子島と長島の間)と大戸ノ瀬戸における流向は異なっている。瀬戸中央と海岸付近とでは潮流の方向が異なるなど、瀬戸周辺の流れは非常に複雑である。今回の計算は、格子間隔が400mであるため、瀬戸周辺の詳細な潮流場の再現は必ずしも十分ではなく、平均的な流れの方向を示すにとどまっている。また、潮流場は調査時期の月齢によっても異なる。これらの要因により、上述の差異が生じたものと考えられる。

計算で得られた潮流場については、海上保安庁水路部の調査結果³⁾との比較もおこなった。上げ潮および下げ潮最強時および転流時の流況について図-3の結果と比較すると、天草下島東岸の海域と八代海中央部の海域については、流況はほぼ一致していた。ただし、大戸ノ瀬戸および三角瀬戸近傍では流向が一致しない個所が若干見られた。

(2) 潮汐残差流のパターン

図-5は、潮汐流を一周期平均して得られる潮汐残差流を示したもので、(a)は表層(第11層)、(b)は最下層(海底面上の層)の残差流ベクトル図である。残差流は、海域内の一潮汐あたりの物質輸送を検討する際に重要となる。

図-5(a)に示した表層の残差流について見ると、八代海中央部付近(水俣市沖)の流速は総じて小さく、明瞭な循環流は見られない。他方、八代海奥部では、大戸ノ瀬戸からの流れが八代市沿岸に達し、八代市沖から最奥部にかけて反時計回りの弱い循環流が形成されるとともに、球磨川河口部沖では時計回りの循環流が形成されている。

一方、天草下島東岸の海域では、八幡瀬戸(獅子島と下島の間)を北上する流れの一部が元ノ尻瀬戸

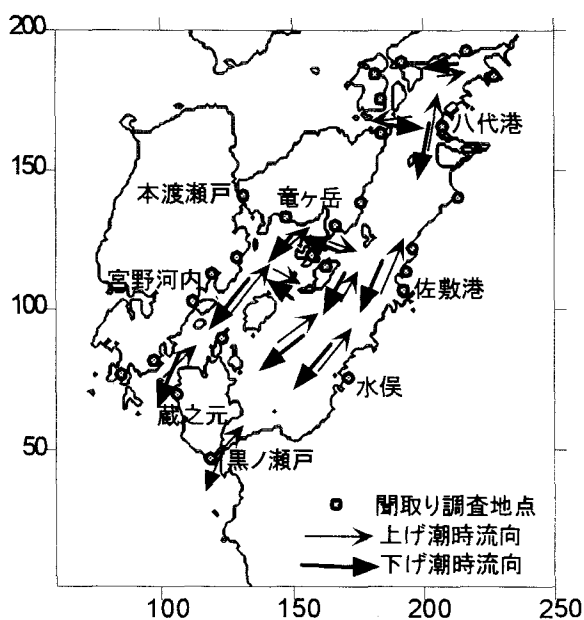


図-4 聞き取り調査地点と潮流の卓越方向

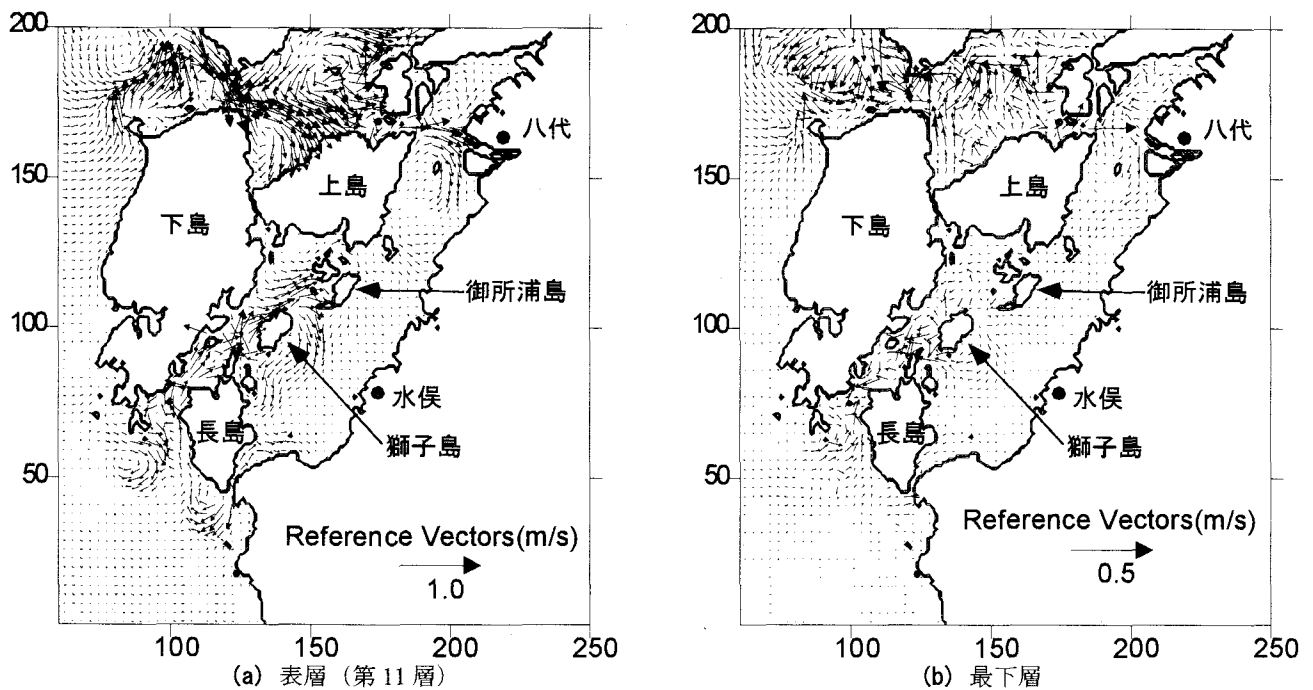
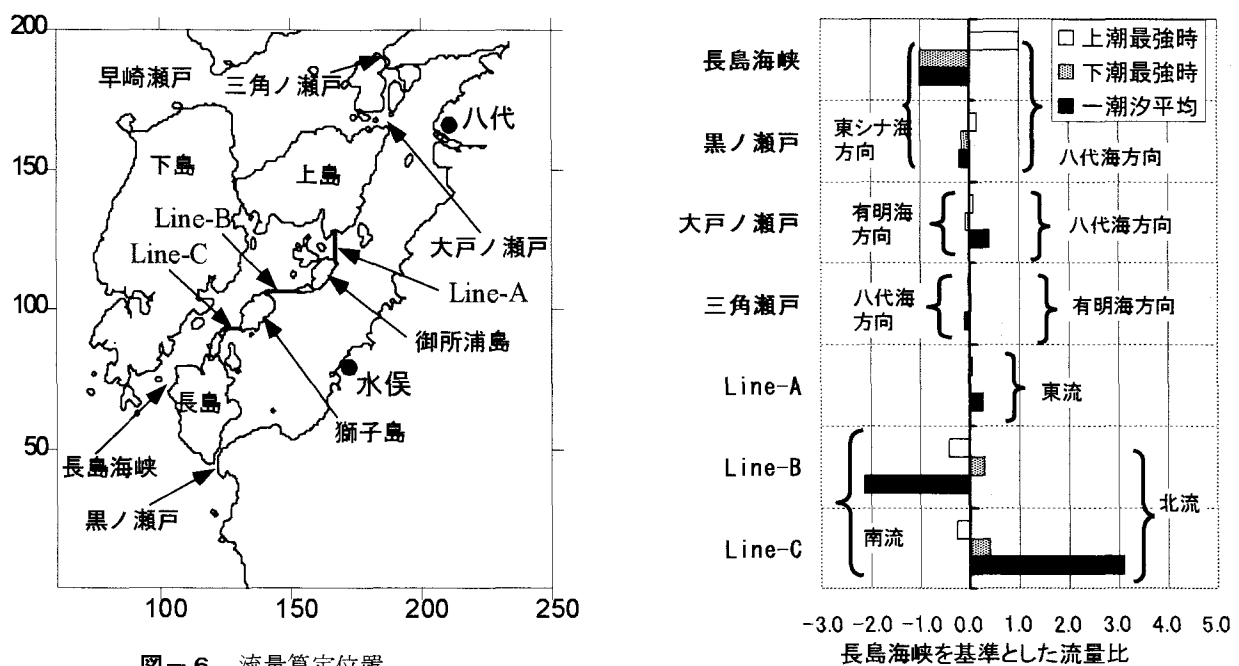


図-5 潮汐残差流ベクトル



(御所浦島と獅子島の間)へ分流し、獅子島を時計回りに巡回して、目吹瀬戸(獅子島と長島の間)を北上する比較的強い循環流が形成されている。今回実施した聞き取り調査によれば、御所浦島の内湾で発生した赤潮が、獅子島東岸を南下した後に伊唐島および諸浦島海域(長島の北北東海域)に流入して養殖業に被害をもたらす場合があり、獅子島を巡回する循環流が寄与していると思われる。なお、この海域の瀬戸付近の残差流は、八代海東側海域に比べて流速が総じて早い、島や入江が数多く点在する

地形的な要因のため、長島、獅子島、御所浦島、宮野河内湾および上島南岸に沿った海域等では流れが滞留する地点が数多く点在している。

図-5(b)に示した最下層の残差流について見ると、八代海奥部から八代海中央部にかけては、表層と類似した循環流場が形成されているが、残差流の流速は相対的に遅い。一方、天草下島東岸の海域で

は、八幡瀬戸に沿って南下する残差流場が形成されている。この海域の表層における残差流は、八幡瀬戸に沿って北上する方向になっていることから、表層と底層で逆向きの残差流場が形成されていることを示している。

(3) 各断面にを通過する平均流量

図-7は、図-6に示す代表的な瀬戸、およびLine-A～Line-Cの各鉛直断面を通過する上げ潮最強時、下げ潮最強時、および一潮汐平均の流量フラックスを、長島海峡に対する比で示したものである。流量フラックスは流速を各鉛直断面について積分して求めており、符号は流れの向きを示している。

黒ノ瀬戸、大戸ノ瀬戸、および三角瀬戸の上げ潮最強時、下げ潮最強時、および一潮汐平均の流量は、ともに長島海峡に比べて小さく、八代海の海水交換に対して長島海峡の寄与が最も大きいことがわかる。ただし、大戸ノ瀬戸と三角瀬戸における流量比は黒ノ瀬戸と同程度であり、八代海の海水交換に対して有明海の寄与も無視できないと考えられる。なお、図中には示していないが本渡瀬戸（天草上島と下島の間）の寄与は非常に小さい。

一潮汐平均した流量について見ると、長島海峡と黒ノ瀬戸では八代海から東シナ海に向う流れになっているのに対して、大戸ノ瀬戸と三角瀬戸では有明海から八代海に向う流れになっている。このことから、八代海では北から南に向かう平均的な流れが形成されていると考えられる。

図-3で述べたように、天草下島東岸の海域は、唐網代瀬戸（Line-A）、元ノ尻瀬戸（Line-B）、目吹瀬戸（Line-C）を通じて八代海東側の海域と海水交換をおこなっている。上げ潮最強時および下げ潮最強時の断面通過流量より、元ノ尻瀬戸（Line-B）と目吹瀬戸（Line-C）の海水交換に対する寄与は、唐網代瀬戸（Line-A）に比べて大きいことがわかる。これは、唐網代瀬戸の断面が元ノ尻瀬戸と目吹瀬戸に比べて小さく、瀬戸を塞ぐ形で島々が点在しているためである。

また、図-5(a)で示したように、表層では元ノ尻瀬戸（Line-B）から獅子島を時計回りに巡回して目吹瀬戸（Line-C）を北上する比較的強い循環流が形成されている。一潮汐平均した流量について見ると、元ノ尻瀬戸（Line-B）では長島海峡の約2倍の流量が南下する方向に流れている。一方、目吹瀬戸（Line-C）では約3倍の流量が北上する方向に流れている。このことから、獅子島を時計回りに巡回するような流動場が形成され、その一部が長島海峡を通じて東シナ海へ流出していると考えられる。

4. まとめ

3次元流動モデルを用い、有明海との海水交換と河川水の流入を考慮して八代海の潮流計算をおこなった。次いで、八代海と有明海の沿岸各地点での潮位増幅率と八代海の潮流の流況について、既往の調査結果と計算結果を比較し、数値計算の妥当性を確認した。

八代海の海水交換に対しては、長島海峡の寄与が最も大きい。大戸ノ瀬戸や三角瀬戸を通じた有明海との海水交換も重要である。八代海に通じる各瀬戸における一潮汐平均した流量より、長島海峡と黒ノ瀬戸では八代海から東シナ海に海水は流出し、また、八代海奥部では有明海から八代海に流入する流れが形成されている。

八代海の潮流特性は、八代海奥部、八代海東側海域、および西側海域で異なる。八代海奥部では、有明海との海水交換の影響により、最奥部や球磨川河口部沖に循環流が形成されている。東側海域では、潮流および残差流は総じて小さく流動性が乏しい。

一方、天草諸島側の西側海域では、その地形的な要因から、流れが加速する海域と流れが滞留する海域とが複雑に入り組んでいる。西側海域では、表層と底層の残差流パターンは異なるなど、3次元的な潮流場が形成されている。また、一潮汐平均した流量より、元ノ尻瀬戸と目吹瀬戸では長島海峡の約2～3倍程度の海水流動があり、獅子島を時計回りに周回する循環流が形成され、その一部は長島海峡から東シナ海へ流出していると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：八代海における環境保全のあり方について（資料），pp.87, 2003.
- 2) 海上保安庁水路部：有明海，八代海海象調査報告書，p.39, 1974.
- 3) 海上保安庁水路部：島原湾，八代海潮流図，1978
- 4) 田中昌宏，稲垣聡，山本克則：有明海の潮汐及び三次元流動シミュレーション，海岸工学論文集，pp.406-410, 2002.
- 5) 中辻啓二：大阪湾における残差流系と物質輸送，水工学に関する夏期研修会講義集，pp.A-9-1—A-9-28, 1994.
- 6) 国土交通省九州地方整備局：一級河川の水文・水質状況，<http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kawa/>
- 7) 独立行政法人 港湾空港技術研究所：平成13年度有明海底泥輸送予測調査報告書，2002.