

有明海・八代海における潮流と拡散

横山貴弘^{*1}, 幸野淳一^{*2}, 菊川浩行^{*1}, 上田耕平^{*1}

Study on Tidal Flow and Diffusion in Ariake and Yatushiro Seas

Takahiro Yokoyama^{*1}, Jun-ichi Kohno^{*2}, Hiroyuki Kikukawa^{*1} and Kohei Ueda^{*1}

Keywords : FEM, Tidal flow, Diffusion, Tracer, Lagrange particles, Ariake Sea, Yatushiro Sea

Abstract

A control volume based up-wind finite element method is applied to the semi-diurnal tidal flow in Ariake Sea and Yatushiro Sea. The behavior of water masses is investigated by tracing the fictitious water particles initially embedded in the distinctive eight regions as well as Euler's tidal residual flow. The main results are as follows: 1) At Hayasaki Seto, sea water flows out through the northern part and flows in through the southern part. 2) There exists a large clockwise vortex around Shishijima Island in Yatushiro Sea. 3) The water particles in the southern part of Ariake Sea flow into Yatushiro Sea through Yanagi Seto and into Hachiman Seto through Hondo Seto. 4) A few water particles in the northern part of Yatushiro Sea flow into Ariake Sea through Misumi Seto. 5) The water particles stagnate in Hachiman Seto and the northern parts of Ariake and Yatushiro Seas.

有明海は福岡、佐賀、長崎、熊本の4県に囲まれた面積約1700 km²の内湾性の強い浅海域で、主として幅4.5 kmの早崎瀬戸を通し、橋湾を経て外海と接する。さらに三角瀬戸、柳瀬戸および本渡瀬戸を通して八代海に接している。長崎県の諫早湾の入り込みを除くと概して単調な海岸線で囲まれている。水深は30~40 mの平坦面が広く分布し、平均水深は約20 mで全般的に遠浅の海域であるが、湾口から島原半島沿いに深い部分がある。最深部は湯島付近で150 mを越し、これを中心に細長い海盆を形成している。潮位差の著しいことは本邦随一で湾奥部では大潮時には6 mにも及ぶため、広大な干潟が湾奥部および東岸部に形成される。諫早湾にも大きな干潟が存在していたが、1997年4月に堤防で仕切られ、淡水化と埋め立てが進行している (Fig. 1)。

八代海は、九州南西海岸と天草上島、天草下島及び長島によって囲まれた海域をいい、御所浦島と獅子島によ

て東西に分けられている。狭義では東部を八代海、西北部を八幡瀬戸、西南部を長島海峡と呼ぶ (Fig. 1)。北部は大部分が20 m以浅で大きな干潟が出現する。中央部の水深は30~40 mであるが、西南部の長島海峡付近では70 mに達する。また、東部に八代、水俣の工業地帯を抱える重要な内湾である。

有明海・八代海は早崎瀬戸、長島海峡、黒の瀬戸のみで外海と接している典型的な閉鎖性内湾であり、八代海はその内部に多くの小島を有している。両湾とも稀少生物が数多く生息し、多くの漁民を養う豊かな漁場となっている。また、渡り鳥の休息地としても重要である。このような内湾の海水交換は環境保全において重要な役目を果たす。

沿岸海域で最も卓越している流れは、潮の干満に伴う流れ (潮汐流) である。有明海及び八代海においては、一般に上げ潮流は湾奥に、下げ潮流は湾外に向かい、ほ

^{*1} 鹿児島大学水産学部環境情報科学講座 (Environmental and Information Sciences, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kogoshima, 890-0056 Japan)

^{*2} 鹿児島県環境技術協会 (Kagoshima Environmental Research and Service, Masago-cho 2-7, Kogoshima, 890-0066 Japan)

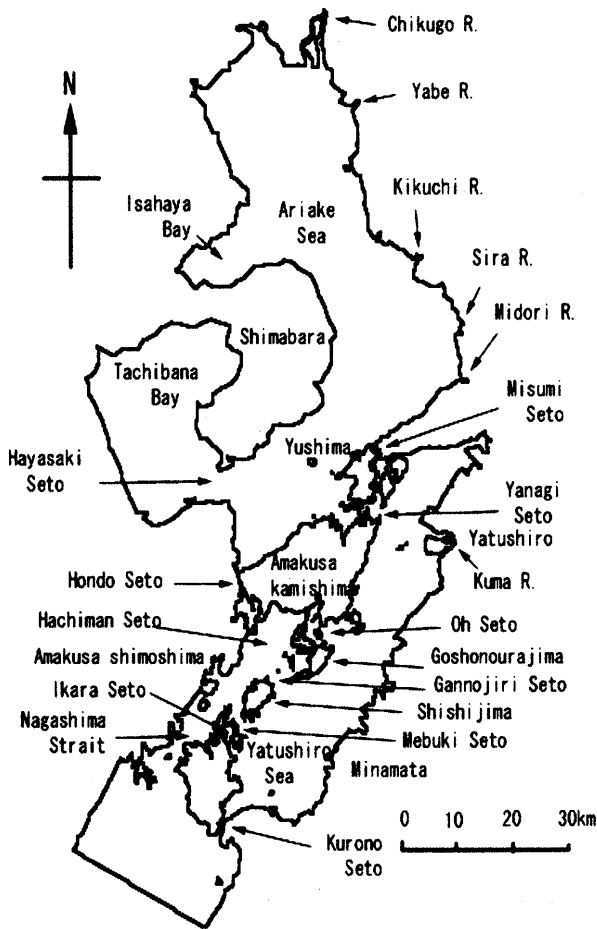


Fig. 1 Map of Yatushiro and Ariake Seas.

は高低潮時に転流し、湾口付近における流速は非常に大きい。潮汐流は風によって起こる吹送流や海水の密度差によって起こる密度流などと共に海水交換に重要な役目を果たすと思われる。吹送流は風力・風向によって時々変化するし、密度流は季節変化が大きい。また、吹送流や密度流については3次元解析が本質的である。この論文では比較的安定している潮汐流による海水交換を、数値解析によって把握することを目的とする。

潮汐流は、流体運動の非線型性や地形などの原因で単に往復運動をしているのではなく、恒流の成分¹⁾を持っている。潮汐流から単振動的な往復運動を差し引いた恒流の成分を潮汐残差流と呼ぶ。潮汐残差流を観測によって求めるには、卓越した単振動的潮汐流成分のために精度の高い観測が要求され、また、吹送流や密度流などと分離するのは不可能に近い。そこで、数値的に潮汐残差流を求めることが必要となる。数値解析法としては差分法が一般的である。しかし、八代海のように内部にたくさんの島々を浮かべ海岸地形が複雑な場合には、複雑な

地形を差分法より実際的に表せる有限要素法 (Finite Element Method: FEM)²⁾の方が有利である。また、興味のある領域を詳しく分割して調べることができるという利点もある。ここではFEMを採用して潮汐残差流を評価する。潮汐残差流のみでなく、潮汐流自体による海水交換も重要である。これについては、海面に大きさも質量もない仮想粒子を浮かべ、そのふるまいを調べることによって評価を試みる。

実際の潮汐流は3次元であり、3次元解析が不可欠である。しかし、FEMによる3次元潮流解析は確立されていないので、ここでは水平2次元に限ることにする。潮汐波は波長が長いので、水平2次元解析でも実際の潮流とそれほど異なる結果が得られることが期待される。

次節でこの論文で採用した数値解析法について述べる。次に仮想粒子のLagrange的ふるまいを調べることによって有明海・八代海の海水の移動・拡散を論じ、その後、Euler的潮汐残差流についての様子を示す。最後にまとめと結果の考察を記す。

解析方法

この論文では、有明海・八代海の海水環境把握の一環として、半日周期の潮汐流の数値解析を行い、潮汐残差流と仮想的ラグランジュ粒子の拡散の様子から湾内の海水循環を推測する。計算方法としては複雑な沿岸地形への対応が容易なFEMを採用する。ここで用いるのはBaliga and Patankar³⁾が提唱したコントロールボリューム法を基礎とする上流解析法を時間発展方程式に適用できるように改良した水平2次元FEMであるが、詳細は瀬川ら⁴⁾に述べてあるのでここでは記述しない。なお、八代海・有明海の潮汐についてはIsozaki and Kitahara⁵⁾や大西と白石⁶⁾が差分法を用いて解析を行っているので参照されたい。この論文では、文献5よりも海岸地形により忠実なFEMによる数値解析を行うとともに、8領域に分けて仮想的ラグランジュ粒子を浮かべ、その振舞いを調べることにより詳細な潮流による海水の移動・拡散解析を行った。

Fig. 2に分割図を示す。Fig. 2の境界AとBに潮汐調和定数表から求めた富岡と阿久根の半日周潮 (M_2)の振幅と位相を与えた。水深は海図から読んで与えた(文献4のFig. 4参照)。陸岸境界条件はスリップとし、初期条件は流速および潮位をゼロとした。まず10周期間の予備的計算を行い、計算結果が周期的になったことを確かめた上でその後の計算結果を用いた。Fig. 3にFig. 2

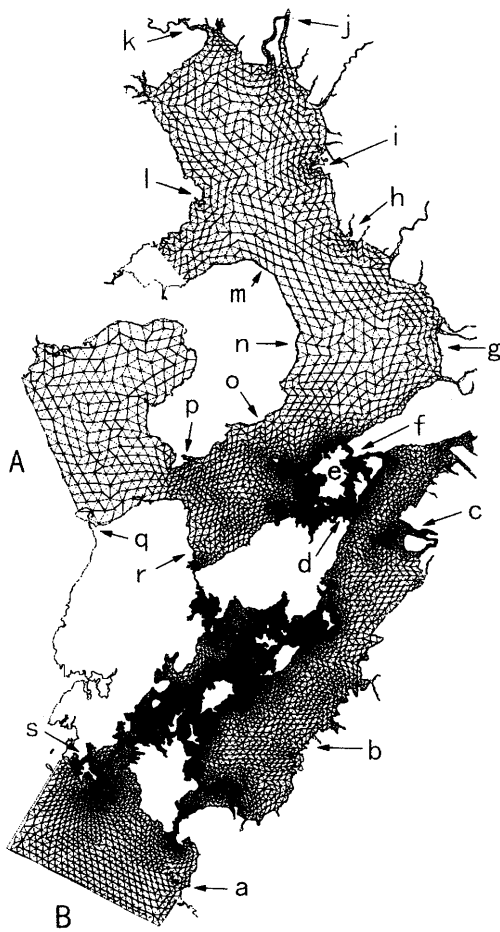


Fig. 2 Grid-spacing of Yatushiro and Ariake Seas using triangular elements. A and B denote open boundaries where tidal motions are forced by semi-diurnal sea level oscillations. Small alphabets denote local points where observed M_2 tidal level coefficients are compared with calculated ones.

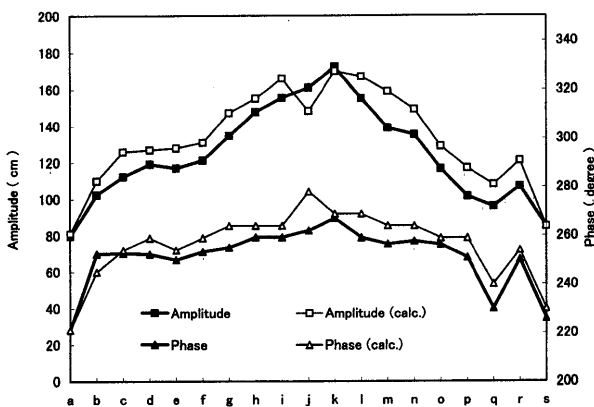


Fig. 3 Comparison of M_2 tidal coefficients between the observation and the simulation. Abscissa denotes the points shown in Fig. 2.

に示された a~s の地点について、計算された潮位と位相を M_2 調和定数と比較した。計算された振幅は調和定数と比べてやや大きく位相はやや遅れる傾向にあるが、半日周潮のみの計算結果としては許される範囲と考えられる。

架空粒子の動き

架空粒子を有明海と八代海の 8 つの領域に浮かべ、その動きをラグランジュ的に追跡した。粒子を浮かべたのは早崎瀬戸の干潮の時刻である。Figs. 4a~4d に、それぞれの領域における架空粒子の 2, 6, 10, 14, 20 周期目における位置を示した。

Fig. 4a: 有明海北部・八代海中部

有明海北部の粒子は全体的に動きが鈍い。粒子は少しずつ西部に移動し北部・東部の粒子密度が減少している。また、10周期を越えたあたりから島原半島沿いに南下し、その後少し東進する様子が窺える。

八代海中部の粒子は早くも 2 周期目から獅子島の東部に半円形に流出している。これらの粒子はその後目吹瀬戸・伊唐瀬戸を通して長島海峡に入り、獅子島のまわりを時計まわりに回ったり、外洋へ流出したりしている。また、八代海北部域へ東西の陸岸沿いに北上する粒子も認められる。御所浦島東部の粒子は停滞傾向にある。

Fig. 4b: 有明海中部・八幡瀬戸

島原半島東部の粒子は徐々に東進し、有明海東岸に沿って北に向かう傾向にある。有明海北部の粒子の移動と重ねると、島原半島沿いに南下し、島原半島東部沖で東に向きを変え、熊本県の沿岸に達した後、北に向かう反時計周りの粒子の流れが認められる。有明海中部の粒子の南下は島原半島沿いにのみ認められ、三角半島沿いには認められない。

八幡瀬戸の粒子はおう瀬戸・元の尻瀬戸を通して八代海に流入している。おう瀬戸を通った粒子は八代海西岸にそって北上し、元の尻瀬戸を通った粒子は目吹瀬戸・伊唐瀬戸を通して長島海峡に入り、その後外洋へ流出するものもある。天草上島の南方沿岸部の粒子はあまり移動しない。

Fig. 4c: 有明海南部・八代海南部

有明海南部の粒子は早崎瀬戸の北部を通して橘湾へ流出し、柳瀬戸・三角瀬戸を通して八代海北部に流入する。八代海に流入した粒子は天草上島の東岸に沿って南下する。一部の粒子は本渡の瀬戸を通り、八幡瀬戸海域へ入っている。外洋水は早崎瀬戸の南部を通して本渡の瀬戸北部に流入する。

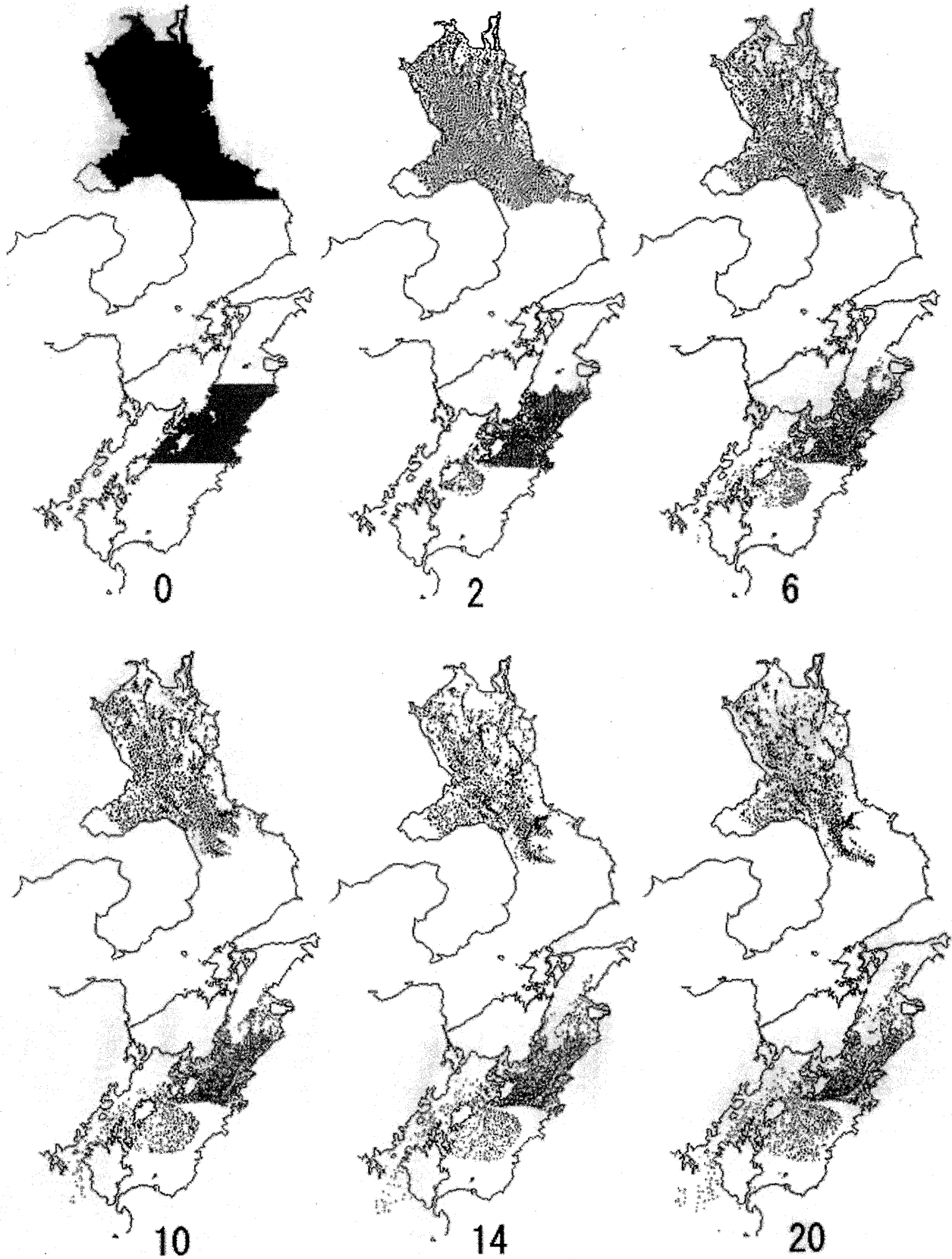


Fig. 4a Diffusive behaviors of water particles initially embedded in the northern part of Ariake Sea and the central part of Yatushiro Sea. Figures show particle locations after the 2nd, 6th, 10th, 14th and 20th periods.

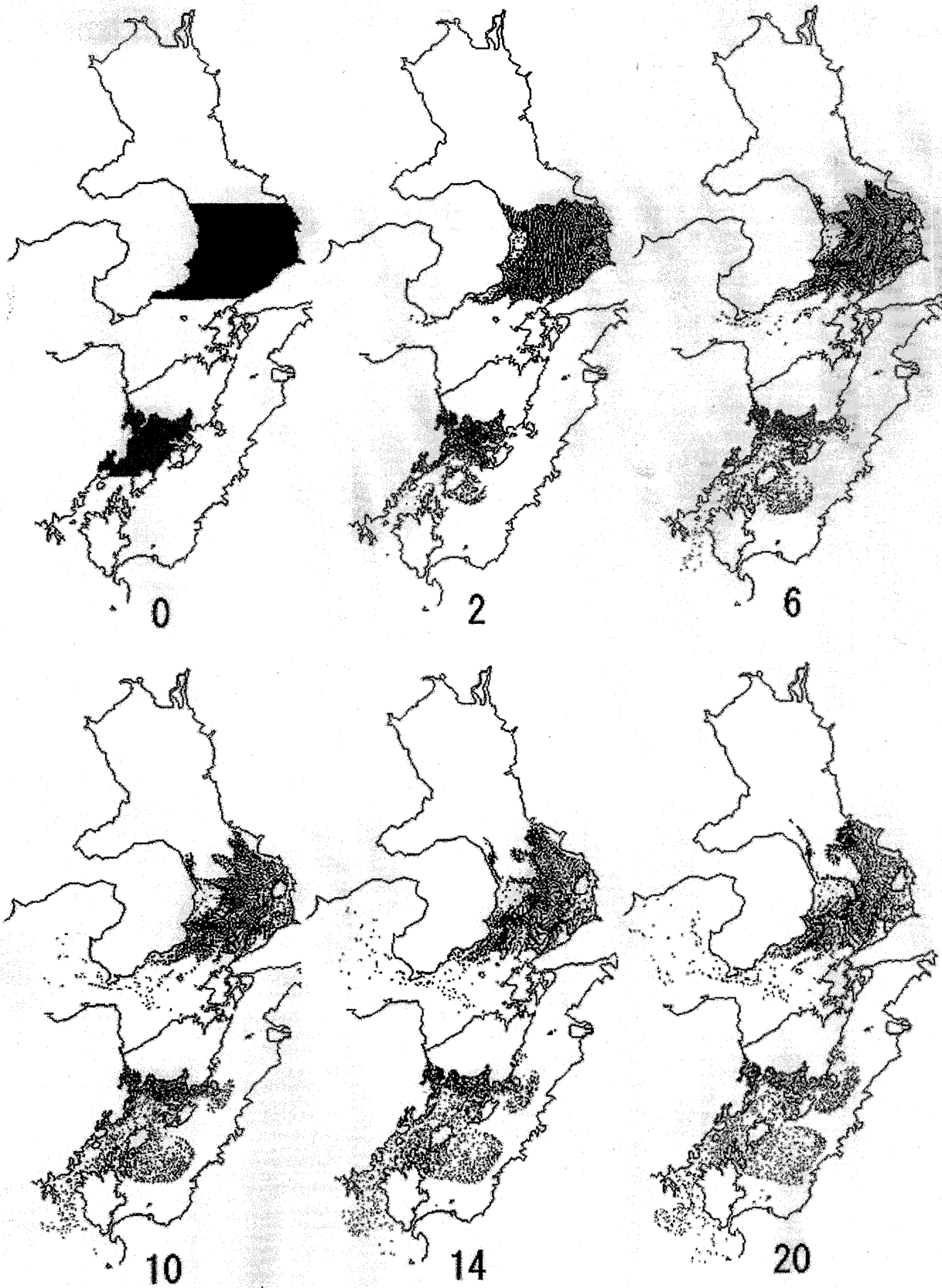


Fig. 4b Same as Fig. 4a except for water particles initially embedded in the central part of Ariake Sea and Hachiman Seto.

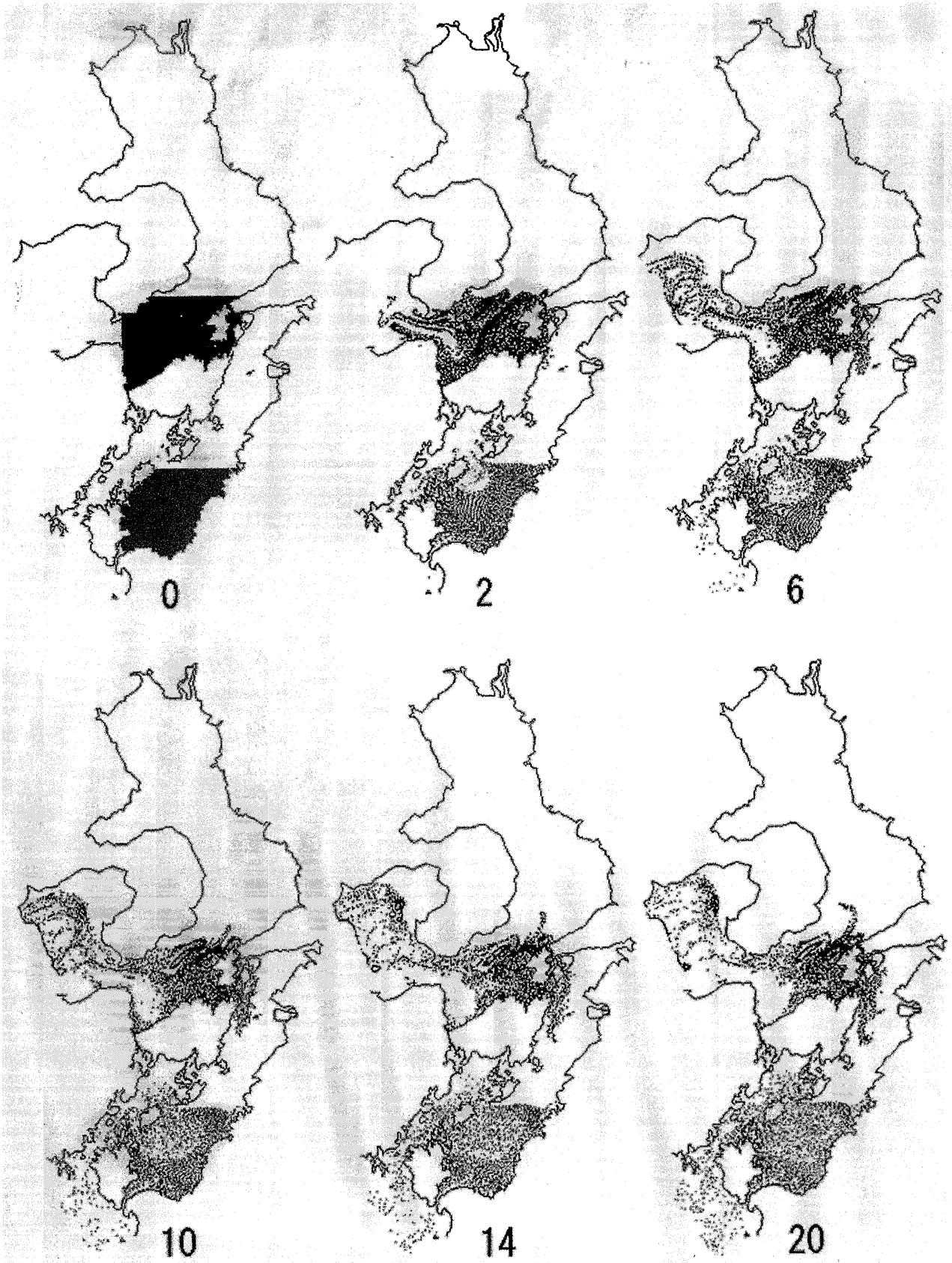


Fig. 4c Same as Fig. 4a except for water particles initially embedded in the southern part of Ariake Sea and southern part of Yatushiro Sea.

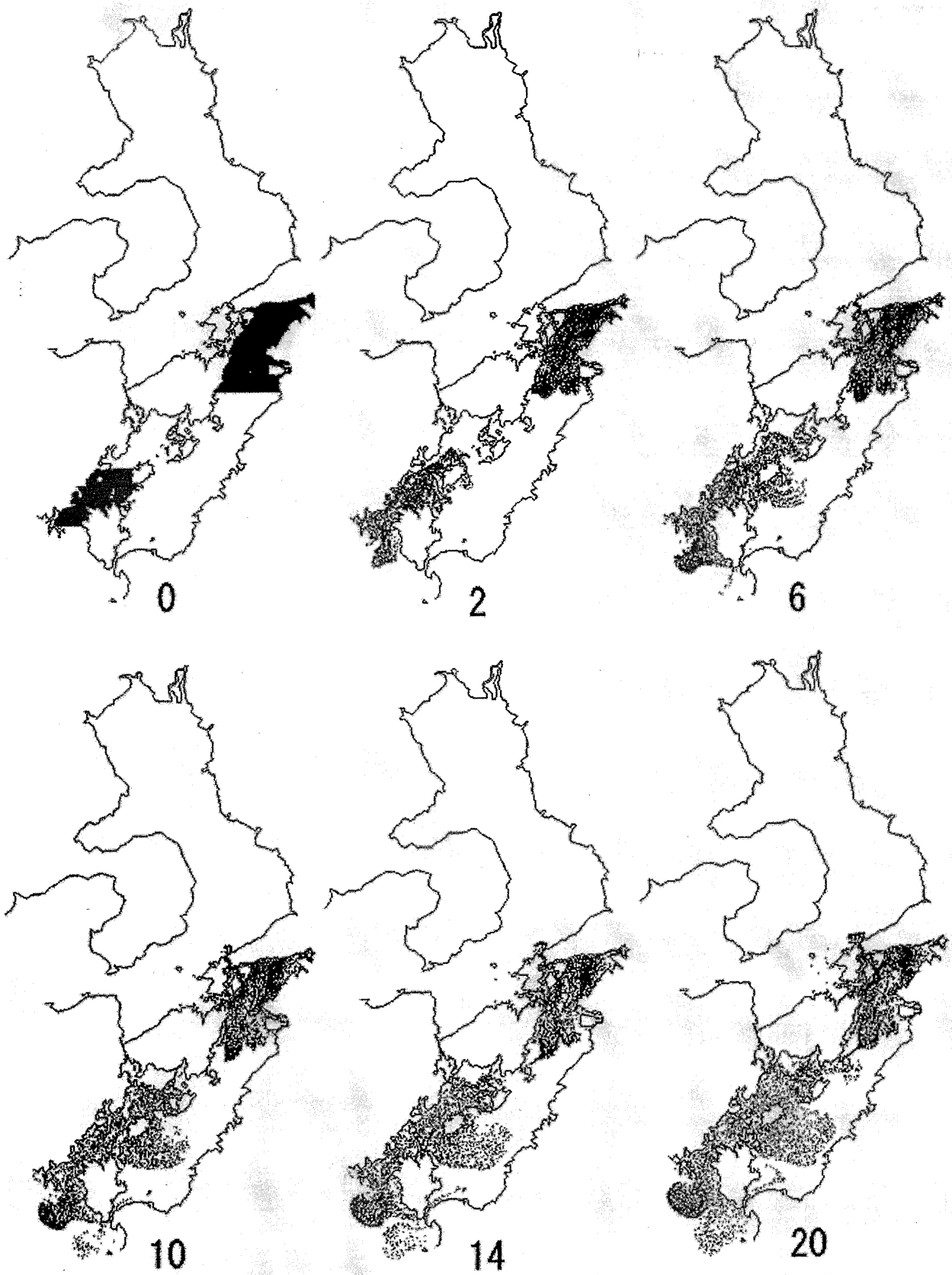


Fig. 4d Same as Fig. 4a except for water particles initially embedded in the northern part of Yatsushiro Sea and Nagashima Strait.

八代海南部の粒子は目吹瀬戸・伊唐瀬戸を通過して長島海峡に入り、一部は外洋に流出し、一部は元の尻瀬戸を通過して再び八代海に流入する。また、黒の瀬戸を通過して外洋に流出する粒子も少数見受けられる。元の尻瀬戸より北へ向かう粒子はなく、伊唐瀬戸より南部の粒子は動きが鈍い。

Fig. 4d : 八代海北部・長島海峡

八代海北部の粒子は天草上島の東岸に沿って南下する傾向にあるが、一般に動きが少ない。一部は三角瀬戸を通過して有明海に流入する。

長島海峡の粒子は、八幡瀬戸海域へ北上するもの、元の尻瀬戸・目吹瀬戸、のちにはおう瀬戸を通過して八代海に流入するもの、外洋へ流出するものなど、動きは活発である。長島海峡から外洋へ流出した粒子の中には、黒の瀬戸を通過して八代海南部へ流入するものもある。

Fig. 5 は粒子をいくつか選んで20周期間における動きを追跡したものである。小さな黒点は粒子の最初の位置を示す。有明海の最北部の粒子は東から西へ反時計回りの軌跡を通過して移動しているように見える。島原半島北部と東部には反時計回りの渦が存在している。また、島原半島の東部沖から熊本方面へ粒子が移動している。島原半島の南東部にはきれいな反時計回りの渦が存在する。島原半島の南部の粒子は早崎瀬戸北部を通過して橘湾へ流出するものや湯島の近くで時計回りや反時計回りの渦を描いているものがある。天草上島北部沖の粒子は北東方向に移動する傾向が見られる。八代沖の粒子は北進しているが八代海北部天草側では北進・南進さまざまである。有明海南部水俣沖の粒子は北へ向かい、出水沖の粒子は動きが鈍い。元の尻瀬戸の東には反時計回りの、獅子島の周りには時計回りのきれいな渦が認められる。八幡瀬戸や長島海峡に浮かべた粒子は動きが激しく、潮流が強いことを示している。

Fig. 6 は有明海、八代海および八幡瀬戸・長島海峡海域に浮かべた粒子の各海峡や瀬戸における正味の流出量を百分率で表したものである。総粒子数は有明海が13626個、八代海が9837個、八幡瀬戸・長島海峡が6396個である。

Fig. 6 から、有明海の粒子は20周期（およそ10日）後10%強が早崎瀬戸から外洋に流出し、2%強が柳瀬戸や三角瀬戸から八代海へ流出していることがわかる。また、本渡の瀬戸から八幡瀬戸域へも若干の粒子の流出が認められる。

八代海の粒子は20周期後およそ12%が目吹瀬戸・伊唐瀬戸を通過して長島海峡に入り、その内およそ7.5%は八幡瀬戸から元の尻瀬戸・おう瀬戸を通過して八代海へ戻っ

ている。また6%強が柳瀬戸や三角瀬戸から有明海へ流出しているが、黒の瀬戸を通過して外洋に流出する粒子の割合は小さい。長島海峡から外洋に流出する粒子も2%程度あることがわかる。

八幡瀬戸・長島海峡に浮かべた粒子は20周期後およそ48%が元の尻瀬戸・おう瀬戸を通過して八代海へ流出し、その内およそ22%が目吹瀬戸・伊唐瀬戸を通過して長島海峡域に戻っている。また、27%強の粒子は外洋へ流出し、その内1%弱は黒の瀬戸を通過して八代海に流入している。八幡瀬戸から本渡の瀬戸を通過して有明海へ流出する粒子は見られない。

潮 汐 流

Fig. 7 の a,b は漲潮時と落潮時の潮流の様子である。

図から、一般に有明海の潮流は50 cm/s 以上の海域が多く、八代海、八幡瀬戸および長島海峡におけるそれよりも大きいことがわかる。しかし、諫早湾口や本渡の瀬戸北域の潮流は小さい。八代海における潮流は最大30 cm/s 程度であるが、特に出水沖から獅子島にかけての潮流が小さい。

潮汐残差流

Fig. 7 の c に潮汐残差流の全体図を示す。獅子島のまわりや長島海峡付近のより詳しい潮汐残差流の様子は文献4のFig.9を参照されたい（文献4の計算では諫早湾を締め切っていないが、八代海における潮汐残差流にはほとんど影響がない）。早崎瀬戸北部東方に反時計回りの、北部西方に時計回りの渦が認められ、天草上島北部には大きな時計回りの渦が認められる。これら早崎瀬戸付近の残差流の大きさは20 cm/s 程度である。八幡瀬戸と八代海で一番目に付くのは八幡瀬戸の東部を北東に流れ、元の尻瀬戸から八代海に入り目吹瀬戸から八幡瀬戸に入る獅子島を時計回りに1周する流れである。また、おう瀬戸では八幡瀬戸から八代海へ、伊唐瀬戸では八代海から八幡瀬戸への流れがみとめられる。御所浦島の北東に時計回り、南東に反時計回りの渦が見られる。長島海峡には7個以上の渦が存在する。また、黒の瀬戸の南には時計回りと反時計回りの渦が認められる。八代海や八幡瀬戸・長島海峡域の残差流の大きさは10 cm/s 程度である。三角半島よりも北の有明海、八代海の東部および北部、八幡瀬戸北西部では潮汐残差流の大きさは5 cm/s 以下である。

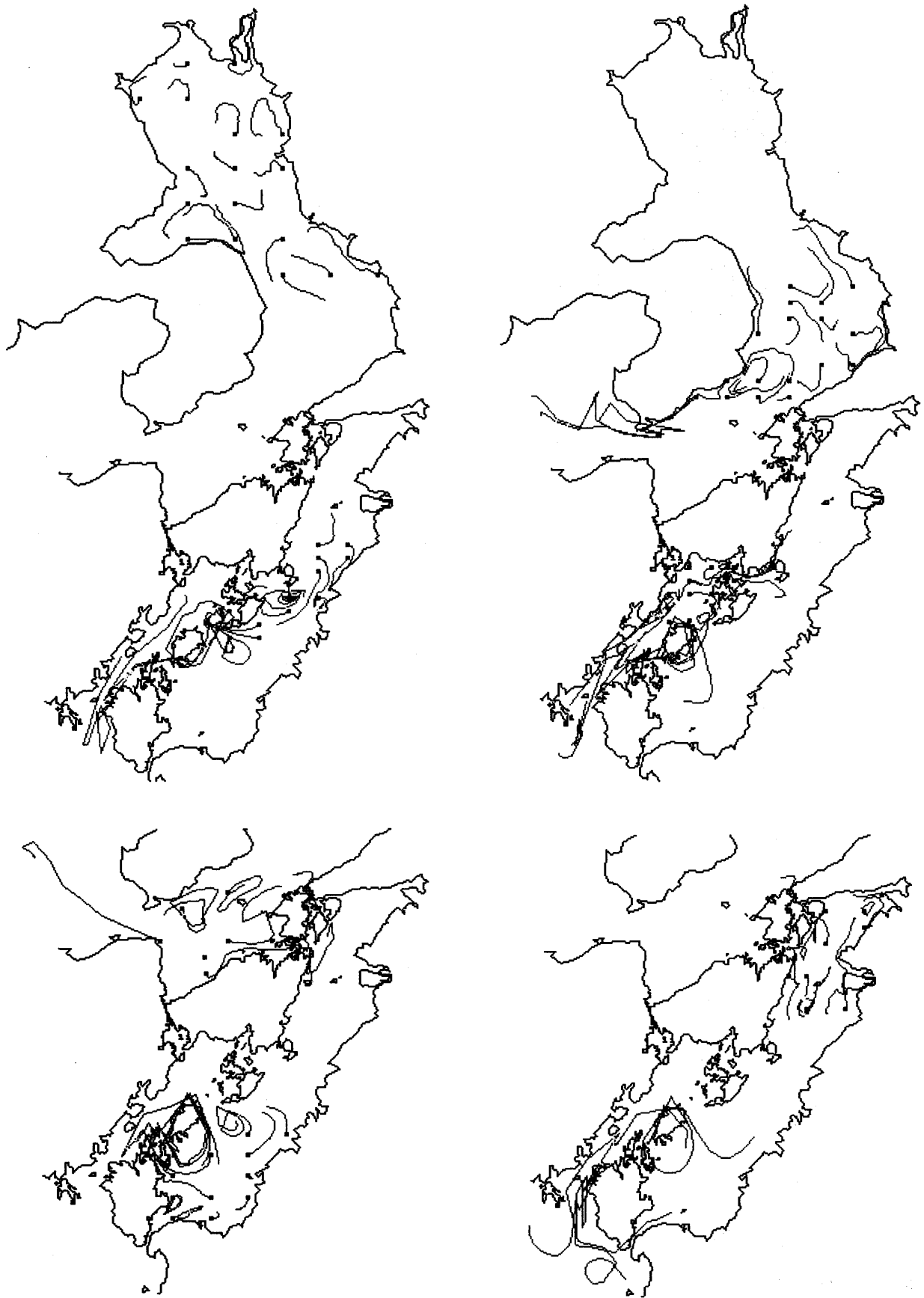


Fig. 5 Examples of particle trajectories for 20 periods.

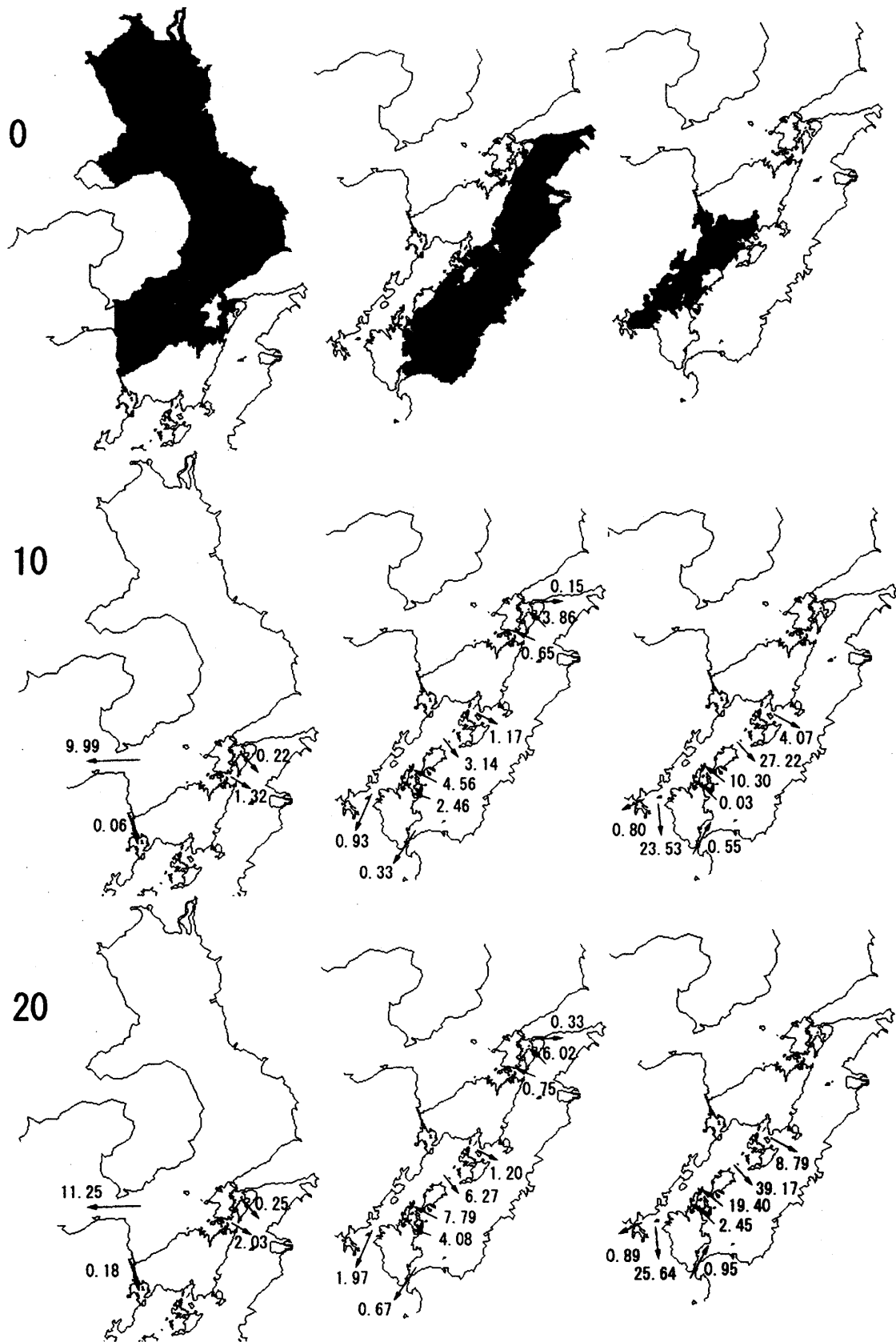


Fig. 6 Number's ratio of the net outflow particles through the straits to the initially embedded particles. Top figures show initial locations of particles; left: Ariake Sea; central: Yatushiro Sea; right: Hachiman Seto and Nagashima Strait. Middle and bottom figures show the ratios after the 10th and 20th periods, respectively. Unit is percentage.

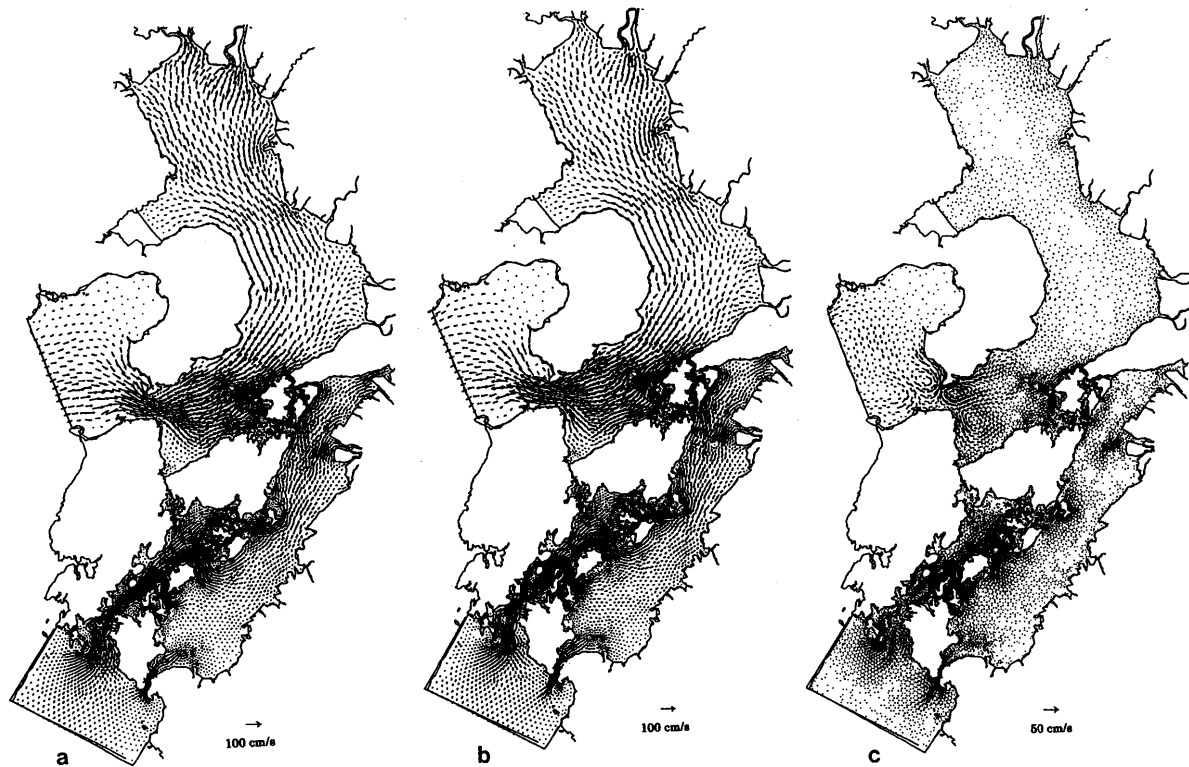


Fig. 7 Flow patterns at flood tide (a) and ebb tide (b), and tidal residual flow (c).

まとめ

複雑な海岸地形の場合に有利な有限要素法を用いて、有明海・八代海の半日周期潮汐流の水平2次元数値解析を行った。仮想的ラグランジュ粒子の拡散の様子から示された主な結果は以下のとおりである。1) 有明海北部の粒子は北東部から西部へ移動し、島原半島の北東部沖から南東方向の熊本方面へ向かうが、動きはゆっくりしている。2) 有明海中部の粒子は島原半島の東部沖から熊本方面へ向かい、その後、有明海東岸を北上する傾向にある。島原半島南東部の粒子は島原半島に沿って西進し、早崎瀬戸の北部より外洋へ流出する。3) 有明海南部の粒子は早崎瀬戸の北部より外洋へ流出し、早崎瀬戸の南部からは外洋水の流入が見られる。また、主に柳瀬戸を通して八代海北部に流入し、その後、天草上島の東岸沿いに南進する。4) 八代海北部の粒子は天草上島の東岸沿いに南進する動きはゆっくりしている。また、一部は主に三角瀬戸を通して有明海に流入する。5) 八代海中部の粒子は元の尻瀬戸を通して獅子島東部沖に流入し、目吹瀬戸・伊唐瀬戸を通して長島海峡に入り、その後外洋へ流出する。また、1部は八代海東岸に沿って北上する。6) 八代海南部の粒子は目吹瀬戸・伊唐瀬戸

を通して長島海峡に入り、その後外洋へ流出するものと獅子島を1周して再流入するものがある。黒の瀬戸からの流出は少ない。7) 八幡瀬戸海域の粒子はおう瀬戸や元の尻瀬戸を通して八代海に流入する。その後、目吹瀬戸・伊唐瀬戸を通して長島海峡に入り、長島海峡から外洋へ流出する。しかし、八幡瀬戸北部の粒子はあまり拡散しない。8) 長島海峡の粒子はもっとも動きが激しく、八幡瀬戸や八代海へ流入するものや外洋へ流出するものが多い。外洋へ流出したのものの中には、黒の瀬戸を通して八代海に流入するものもある。

潮汐残差流と合わせると、この海域で最も顕著な流れは、早崎瀬戸の北部からの外洋への流出と南部からの外洋水の流入、獅子島周辺の時計回りの流れである。一方、有明海北部、西部を除く八代海、八幡瀬戸北部などの海水は停滞傾向にあると考えられる。

今回は半日周期潮汐流の解析のみを行ったが、他の調和成分を考慮してもそれほど結果には影響しない⁷⁾と考えられる。しかし、水平2次元解析に限ったことには問題がある。3次元の有限要素潮流解析の完成が待たれる。

参考文献

- 1) K. T. Tee (1976): Tide-induced residual current - a 2-D non-linear numerical tidal model. *J. Mar. Res.*, **34**, 602-628.
- 2) G. Grotkop (1973): Finite element analysis of long-period water waves. *Comput. Meth. Engng.*, **2**, 147-157.
- 3) B. R. Baliga and S. V. Patankar (1983): A control volume finite element method for two-dimensional fluid flow and heat transfer. *Numerical Heat Transfer*, **6**, 245-261.
- 4) 瀬川 慎, 幸野淳一, 菊川浩行 (1998): 潮汐流による伊唐瀬戸の海水交換. 鹿児島大学水産学部紀要, **47**, 25-33.
- 5) I. Isozaki and E. Kitahara (1977): Tides in the bays of Ariake and Yatsushiro. *Oceanogr. Magazine*, **1-2**, 1-32.
- 6) 西 亮一, 白石英彦 (1979): 有明海の潮流解析について. 第26回海岸工学講演会論文集, 527-531.
- 7) H. Kikukawa and H. Ichikawa (1990): A numerical study of a tide with four harmonic constituents at the open boundary. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 143-155.