

潮汐流による伊唐瀬戸の海水交換

瀬川 慎^{*1}, 幸野淳一^{*2}, 菊川浩行^{*1}

Numerical Study of Tidal Water Mass Exchange in Ikara-seto

Makoto Segawa^{*1}, Jun-ichi Kohno^{*2}, and Hiroyuki Kikukawa^{*1}

Keywords : FEM, tracer, Lagrange particles, Water mass exchange, Tidal flow Ikara-seto,
Yatsushiro Sea

Abstract

A control volume based up-wind finite element method was applied to the two-dimensional tidal flow in Ariake Sea and Yatsushiro Sea. Water mass exchange in Ikara-seto located south-west of Yatsushiro Sea was investigated by pursuing the fictitious water particles as well as estimating the inflow and outflow water masses through boundaries. The main results are as follows: i) From Euler's point of view, water mass flows into Ikara-seto from Yatsushiro Sea and flows out to Nagashima Strait; 86.5% (13.5%) of water mass flows out from the north (north-west) boundary. ii) From Lagrange's point of view, fictitious water particles flow out from the north and north-west boundaries. 66.1% (21.9%) of water particles flow out within 1 period when particles are thrown into the sea at low tide (high tide). iii) After 4 periods, most part of the water particles flow out from Ikara-seto. However, the water particles in Ikara Bay still remain.

八代海は北は三角, 柳, 本渡瀬戸によって有明海に通じ, 南は黒之瀬戸, 長島海峡により外海に開口しているが, いずれの海峡も狭くて閉鎖性の強い海域である。有明海と八代海の潮汐変動は日本で最も顕著なものの一つであり, 大潮時には有明海の湾奥では500cmを超える場所がある。なお, 天草上島, 下島間に存在する本渡瀬戸は出入りする水量がきわめて少ない。八代海には, ツルの渡来地の出水市, 水銀汚染問題の水俣湾, 多くのブリ養殖場の存在など生態的, 環境的に重要な意味をもつ場所が多い。今回, 長島と伊唐島に囲まれる伊唐瀬戸をとりあげる。伊唐瀬戸周辺の海域には養殖場が点在しており, 特にブリの養殖は全国一の生産量を誇っている。伊唐瀬戸の水深は伊唐湾の湾口付近で約30m, 湾中央で約

20m, 伊唐瀬戸中央部に位置する竹島のあたりの深いところで30~40mと比較的浅く, 養殖で使われるいけすの深さは10m程である。近年, 伊唐瀬戸や八代海の養殖場で魚が食べ残した飼料やゴミ等による汚染の問題が懸念され, 県の水産試験場や漁協によって環境調査研究が行われるとともにいろいろな対策が講じられている。このような問題に対応するにも伊唐瀬戸における海水交換がどのように行われているかを知ることは重要である。

本論文では, 八代海において有限要素法 (Finite Element Method, 以下 FEM と略す) を用いた潮汐流数値解析を行い, その計算結果から養殖場が集中する伊唐瀬戸内の M_2 潮汐流による海水の流入, 流出量を Euler 的に算出した。伊唐瀬戸の位置とその周辺地形図

*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 Shimoatara 4, Kagoshima, 890-0056 Japan)

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

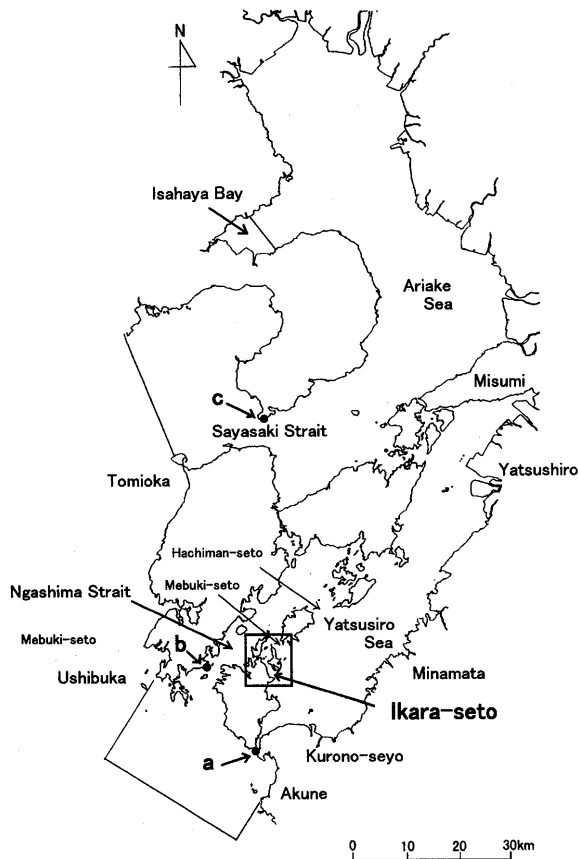


Fig. 1 Location of Ikara-seto and the surrounding topography.

を Fig. 1 に示す。また、今回はじめての試みとして満潮時、干潮時それぞれにおいて伊唐瀬戸に架空の粒子を浮かべ、その粒子が潮汐流によってどのように動くのかを追跡し、20周期までの粒子の動きを調べて伊唐瀬戸内の粒子の交換量を求めた。このように Lagrange 的に海水交換を考えた場合には、粒子が疎密に存在する場所の特定や粒子を入れた時期の違いによる粒子の動向を視覚的にとらえることができるため、Euler 的に考えた場合とは異なった知見を得ることができる。

数値解析法

この論文で用いた水平 2 次元モデルにおける潮汐流の基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = fv + \nabla \cdot (\nu_e \nabla u) - Ru\sqrt{u^2 + v^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = -fu + \nabla \cdot (\nu_e \nabla v) - Rv\sqrt{u^2 + v^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(h+\eta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h+\eta)v]}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right). \quad (4)$$

式(1)~(4)で $(x, y) = (x_1, x_2)$ は平面座標、 t は時間、 $v = (v_1, v_2) = (u, v)$ は流速、 η は潮位、 g は重力加速度を表す。 $f = 2\omega \sin(\theta)$ 、 $\omega = 2\pi/86400\text{s}^{-1}$ はコリオリ係数で $\theta = 32.3$ 度を採用した。 $R = 0.0026/h$ は海底摩擦係数で h は水深である。水平渦動粘性係数 ν_e については LES (Large Eddy Simulation) の基礎 SGS (Sub Grid Scale) 応力モデルとして最も広く用いられている Smagorinsky 渦粘性モデルを採用した (数値流体力学編集委員会編, 乱流解析, 1995)。

$$\nu_e = 1.14(C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad (5)$$

ここで $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ は GS (Grid Scale) 成分の

歪速度テンソル、 Δ は空間フィルター幅で要素の大きさを用いる。 $C_s = 0.25$ とした。

この論文で用いる FEM はコントロールボリューム法を基礎とする上流解析法 (Baliga and Patankar, 1983) を発展方程式に適用できるように改良したもので、数値計算上の発散を抑えるために要素内の平均速度ベクトル方向と平均速度ベクトルと垂直な方向とで異なる内挿関数を用いる。まず、Fig. 2 に示すように原点を重心におき、要素内の平均流速ベクトル方向を X 方向、それに垂直な方向を Y 方向とする新しい座標系 (X, Y) を要素ごとに導入する。式 (1), (2) の移流項と拡散項における速度ベクトル (u, v) は X 方向には指数関数で、Y 方向には線形に内挿される。

$$u = A_u \exp\left(\frac{U_{av}X}{D}\right) + B_u Y + C_u,$$

$$v = A_v \exp\left(\frac{U_{av}X}{D}\right) + B_v Y + C_v, \quad (6)$$

ただし、 U_{av} は要素内の平均速度ベクトルの大きさ $U_{av} = |\vec{V}_{av}|$ である。式 (1), (2) の移流項と拡散項以外の速度ベクトル (u, v) と潮位 η は通常のように線形内挿される。

FEM を適用するために、有明海と八代海を著者の一人 (幸野) が作成した分割ソフトで Fig. 3 のように三角形に分割し、海図に示されている水深を用いて各節点

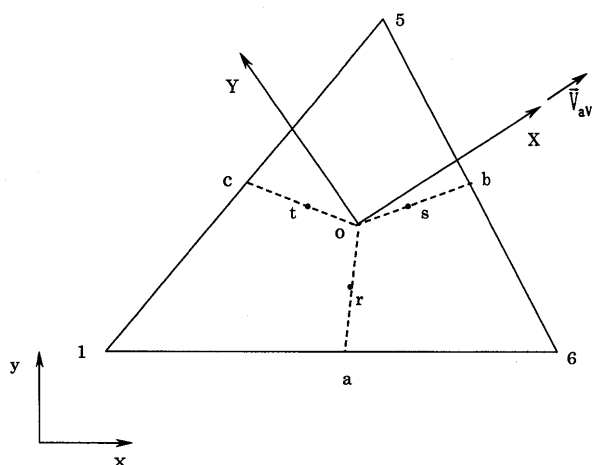


Fig. 2 A typical sub-element, the global(x, y) and the up-wind local (X, Y) coordinate systems, and the related nomenclature.

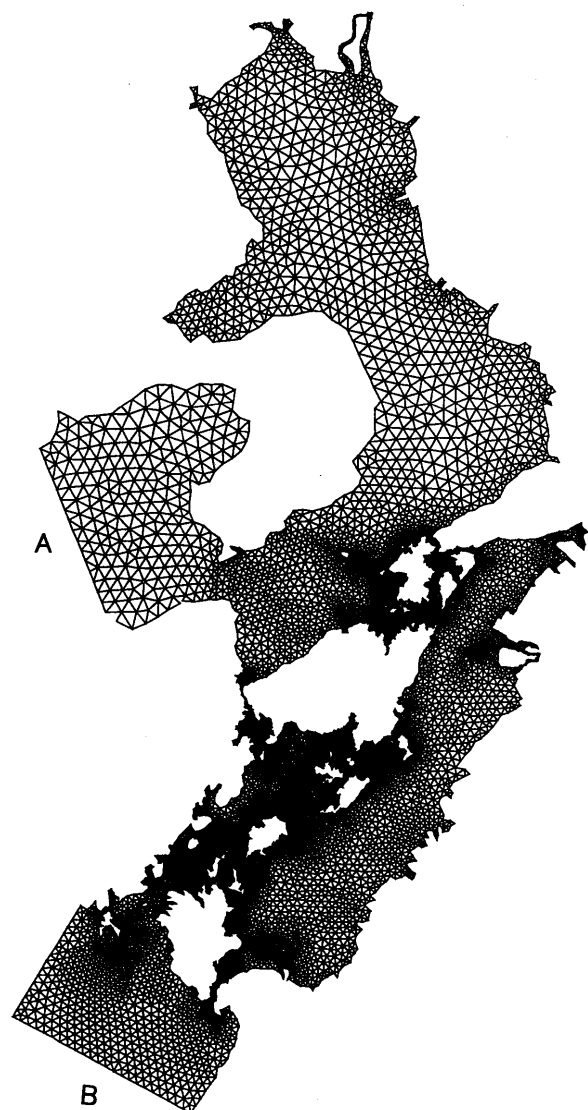


Fig. 3 Division of Ariake and Yatsushiro Seas by six-node triangular macro elements.

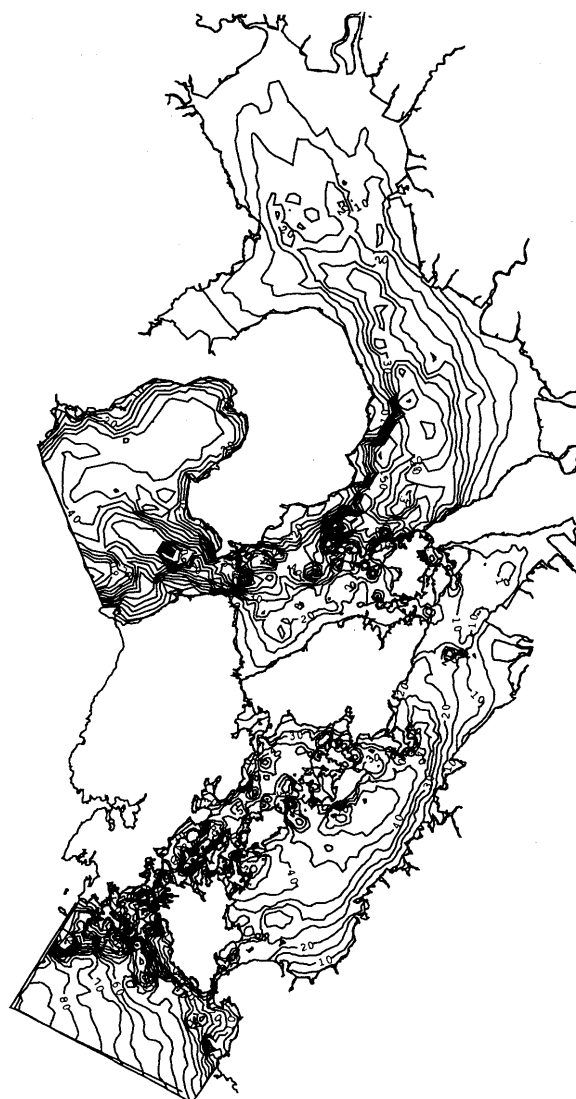


Fig. 4 Depth distribution in Ariake and Yatsushiro Seas.

における水深を内挿した。水深の分布図を Fig. 4 に示す。節点数は10235, 要素数は17771個である。Fig. 5, 6 には伊唐瀬戸付近の要素分割図と水深分布図を拡大して示した。Fig. 3 に示された開口部の境界A, Bには強制的に次式に示す潮位を与える。A(B)には富岡(阿久根)のM₂潮汐調和定数を用いた(海上保安庁, 潮汐調和定数表, 1983)。

$$\eta_i = a_i \sin(\omega_{M2} t - \delta_i)$$

$$a_A = 96.0 \text{ cm}, \delta_A = 230.0 \text{ degree}, a_B = 79.7 \text{ cm}, \delta_B = 221.1 \text{ degree},$$

$$\omega_{M2} = 2\pi/45000 \text{ s}^{-1} \tag{7}$$

陸岸境界条件はスリップとし, 初期条件を $v = 0, \eta = 0$ として10周期間の計算を行った後, 内部の潮流が安定

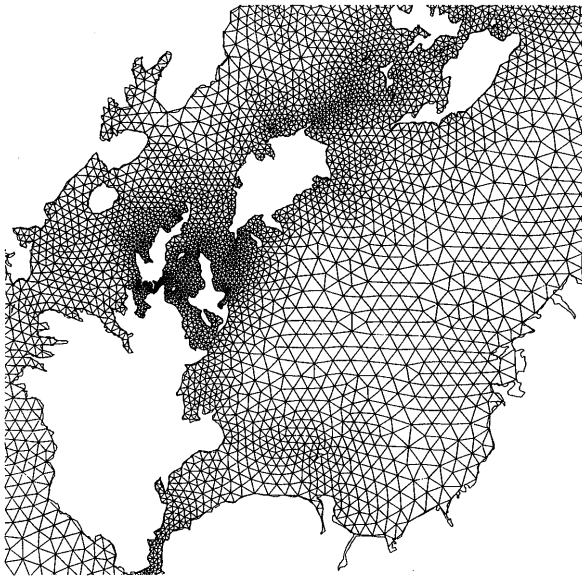


Fig. 5 Enlarged figure around Ikara-seto divided by six-node triangular macro elements.

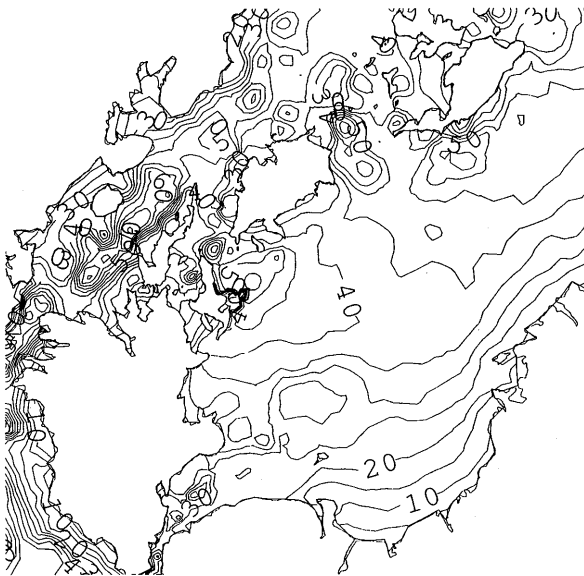


Fig. 6 Enlarged figure of depth distribution around Ikara-seto.

したことを確かめて以下の計算に使用した。

コントロールボリューム法を基礎とするFEMによる伊唐瀬戸の数値解析は以前にも行われているが(菊川, 1992), 強制的に潮位を与えるべき境界を伊唐瀬戸のすぐ外に取ったために潮位の情報がなく, いろいろな潮位や位相を実験的に与えて計算を実行している。今回は潮位の情報が存在する外海部を境界としているので, より信頼できる結果を得ることができる。差分法による有明海と八代海の数値解析は磯崎らによって行われた (I.

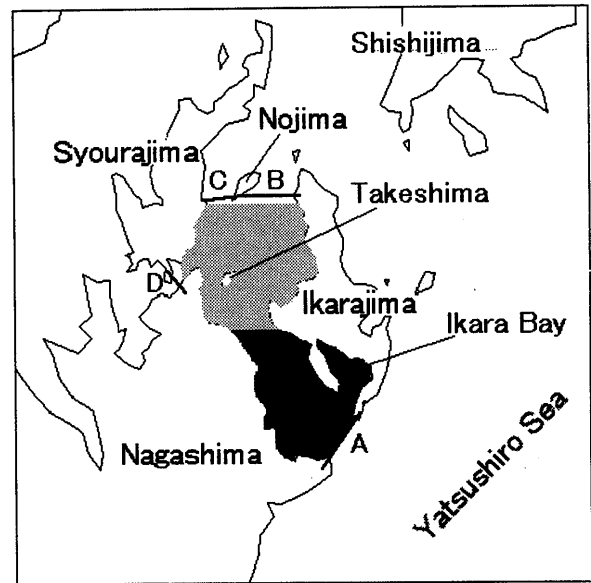


Fig. 7 Topography of Ikara-seto and the definition of boundaries A (Nagashima-Ikarajima), B (Ikarajima-Nojima), C (Nojima-Syourajima) and D (Syourajima-Nagashima).

Table 1 In-flow and out-flow water masses during one period through each boundary in Ikara-seto

Boundary	In-flow water mass (10^3 m^3)	Out-flow water mass (10^3 m^3)
A	227	70
B	23	121
C	9	41
D	65	85

Isozaki and E. Kitahara, 1977)。そこでは流体粒子の振る舞いについても計算がなされていて興味深い結果が得られている。

Euler 的に見た海水交換量

前節で述べたFEMを用いた潮汐流数値解析の結果を用いて, 伊唐瀬戸の1周期間の海水流入量と流出量を算出する。この際, 伊唐瀬戸にFig. 7に示すように4つの境界を設け, 境界A (長島~伊唐島), 境界B (伊唐島~野島), 境界C (野島~諸浦島), 境界D (諸浦島~長島)とする。伊唐瀬戸の海水の出入りはすべてこの4つの境界から行われるので, それぞれの境界における流入, 流出量を算出して, その収支から伊唐瀬戸全体の海水交換を考えることができる。それぞれの境界で一秒毎に計算された流速ベクトルを伊唐瀬戸に対して内向きと外向きによって分け, これに水深と潮位を乗算し, 別々

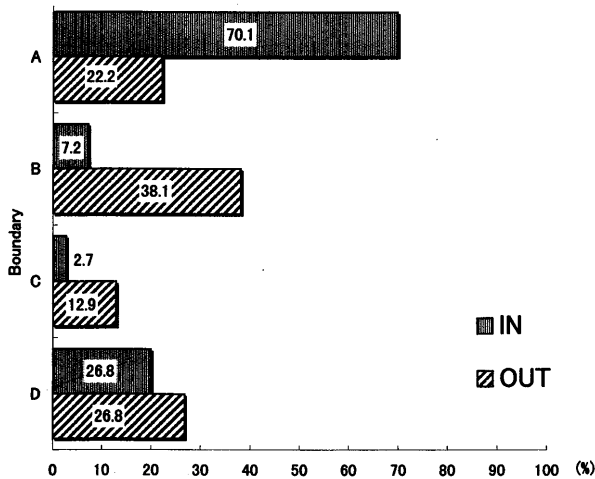


Fig. 8 In-flow and out-flow water masses through each boundary.

に加算を行い流入量と流出量を求める (Table 1)。Fig. 8は、求めた各境界毎の流入、流出量をもとに伊唐瀬戸全体に対する100分率で表した。

4つの境界において、流入量が1番大きいのは長島と伊唐島間の境界Aで、伊唐瀬戸全体の流入量の70.1%を占めている。対して、流出量では伊唐島と野島間の境界Bが全体の流出量の38.1%、続いて境界D、境界A、境界Cの順に小さくなる。伊唐瀬戸の北側の開口部である境界B、Cからは、境界Bの流出量を除くと他の流量は少なく、特に境界Cからは海水の出入りが少ないことがわかる。また、境界Dは4つの境界の中で最も狭いにもかかわらず、流入、流出量がともに伊唐瀬戸全体の25%以上を占めていることが注目される。

正味の海水交換量をみると、流入量が流出量を上回っているのは境界Aのみで、ほかの3つの境界はどれも流出量のほうが大きい。このことから、伊唐瀬戸は境界Aから流入して、境界B、C、Dから流出する大まかな流れによって、海水交換が行われていると考えられる。境界Aからの正味の流入量を100とすると境界B、C、Dの正味の流出量はそれぞれ64.9、21.6、13.5となる。

Fig. 9には伊唐瀬戸の付近の潮汐平均流の様子を示した。潮汐平均流でも境界Aから流入し境界B、C、Dから流出する流れが認められる。

架空粒子の Lagrange 的ふるまい

Fig. 7に示すように、境界A、B、C、Dと中央部の境界により、伊唐瀬戸を南北2つの領域に分ける。中央部の境界は、現在長島と伊唐島間に架かっている伊唐大橋付近にあたる。また、この2つの領域、伊唐北部と伊

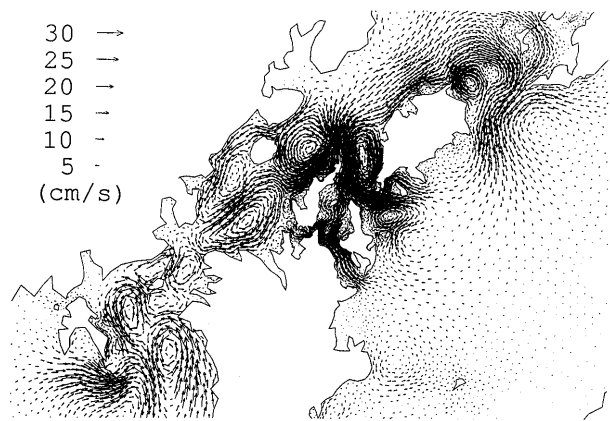


Fig. 9 Averaged tidal flow around Ikara-seto.

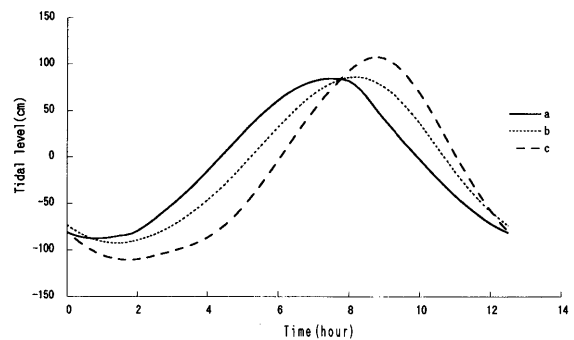


Fig. 10 Tidal levels at points a (solid line), b (dotted line) and c (dashed line) in Fig. 1.

唐南部領域において、それぞれある程度陸地を含んだ四辺形で領域内を囲み、その四辺形を縦横100×100に分割する。この分割した格子の節点のうち、陸地の部分を除いたところに架空の粒子を置く。架空の粒子は質量0で海面に浮かび、潮流によってのみ動くものとする。伊唐瀬戸北部には7363個、伊唐南部は3014個の合計10377個の粒子が設定された。

架空粒子の集団を考え、Lagrange的に各粒子の運動を調べる場合、「いつ粒子を浮かべるか」が重要な要素となる。今回の解析では、粒子を浮かべる時間を伊唐瀬戸の潮位がほぼ満潮になったときと、ほぼ干潮になったときの2つの潮時を選んだ。Fig. 1に示す有明海、八代海の3つの代表的な場所a、b、cのM₂潮位をFig. 10に示す。伊唐瀬戸に粒子を浮かべる時間の決定にはこの図をもとに、干潮時については2時間後、満潮時については8時間後と設定した。伊唐瀬戸で粒子がどの境界を通過して流入、流出を行っているかを調べるために、それぞれの境界で伊唐瀬戸内に境界を横切って入ってくる粒子を流入粒子、逆に伊唐瀬戸内から境界を通過して出て行く粒子を流出粒子と定義する。

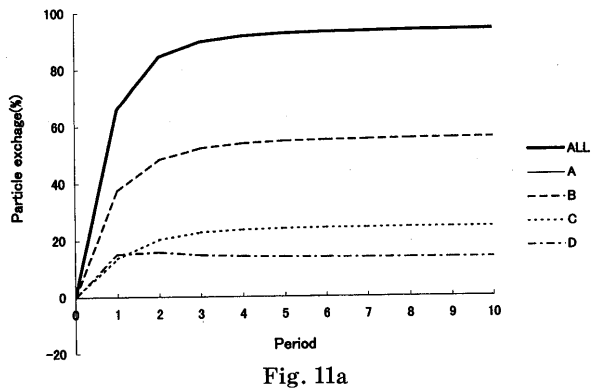


Fig. 11a

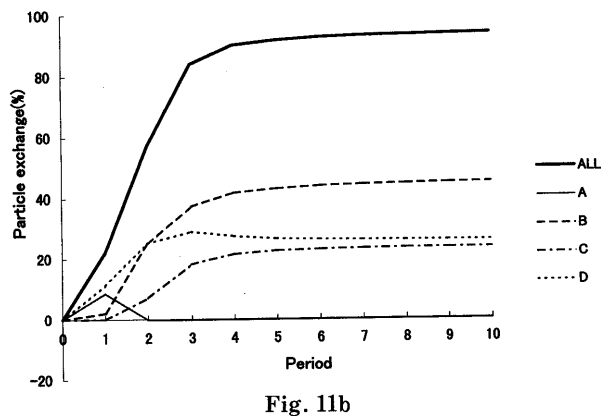


Fig. 11b

Fig. 11 Net particle out-flow from each boundary in Ikara-seto when the particles are thrown into the sea at low tide (Fig. 11a) and at high tide (Fig. 11b).

Fig. 11a (Fig. 11b) は、正味の流出粒子量から算出した Lagrange 的な海水交換を伊唐瀬戸が干潮時（満潮時）に粒子を投入した場合について表している。ここで示す正味の流出粒子量は、流出粒子から流入粒子を減算したもので、伊唐瀬戸に投入した粒子数の荷重を考慮し、周期毎に100分率で表している。Plate 1a (Plate 1b) に伊唐瀬戸北部の粒子を青色、南部の粒子を赤色と区別して、これらの粒子が潮汐流によってどのような動きをするのかを見るために干潮時（満潮時）に粒子を投入した場合について1周期から5周期までと10周期後の粒子の位置を示す。

これらの2つの Plates を参照し、伊唐瀬戸の Lagrange 的な海水交換を視覚的にとらえると、前に述べた Euler 的な海水交換では気づかない以下に述べるようなことが明らかになった。

（干潮時に粒子を投入した場合）

1周期後には全体で66.1%の粒子が流出している。その内訳は、境界Bが1番多く全体の37.5%、境界C、Dはどちらも15%程度で、境界Aからはほとんど流出して

いない。1周期後の Plate 1a からわかる通り、伊唐島—野島—諸浦島間の伊唐瀬戸の北側境界から大量に粒子が流出していく様子がわかる。2, 3周期後、伊唐瀬戸内に入れた粒子は、85%以上流出している。また、流出していった粒子が諸浦島の北側の沖で反時計回りの渦を作り、一部は伊唐島と獅子島間の目吹瀬戸を通して八代海に流入している。4, 5周期後には、ほとんどの伊唐瀬戸内の粒子は出ていくが、伊唐島の伊唐湾の部分だけはまだ多くの粒子が存在し、10周期経っても伊唐湾の粒子だけが残っている様子がわかる。

（満潮時に粒子を投入した場合）

満潮時に粒子を投入した場合をみると、1周期後には明らかに干潮時に粒子を投入した場合は異なった粒子の動きがみられる。1周期後の全体の流出量は21.9%であり、干潮時の流出量66.1%と比べるとはるかに小さい。1周期後の図から、伊唐瀬戸に入れた粒子が干潮時とは逆に境界Aの方向に帯状に動いている様子がうかがえる。これは、領域内部は位相が遅れるため、伊唐瀬戸内はまだ満潮より少し前だったと考えられる。伊唐瀬戸においては満潮時直前に粒子が投入されたことにより、潮流は満潮に向かう上げ潮により境界Aから八代海に向かうので粒子は境界Aから八代海へ出てしまい、転流して満潮から干潮への下げ潮で境界Aから伊唐瀬戸に向かって移動する。2, 3周期後では徐々に粒子が境界B, C, Dから流出して、干潮時に投入した場合と同じような散らばり方になってくる。4, 5周期後には干潮時と同じく90%以上の粒子が流出する。また、干潮時に投入した場合にみられた伊唐湾の粒子は、満潮時に投入した場合でも同様にはっきりと残っており、伊唐湾は海水交換が悪いことがわかる。

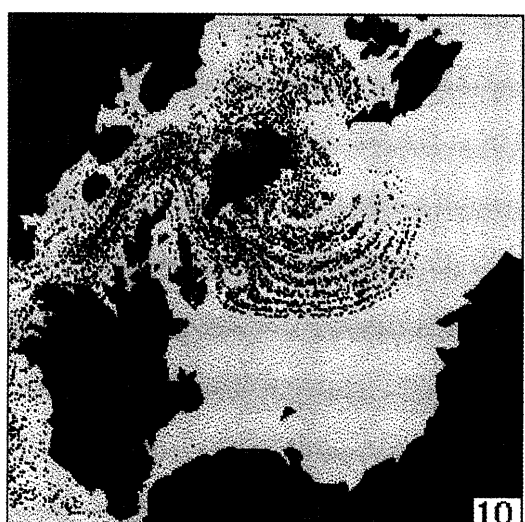
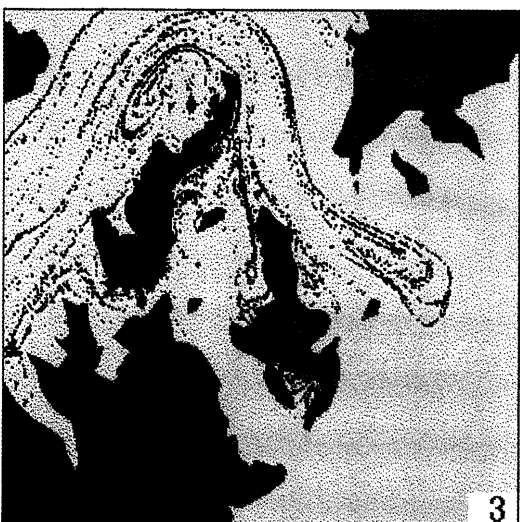
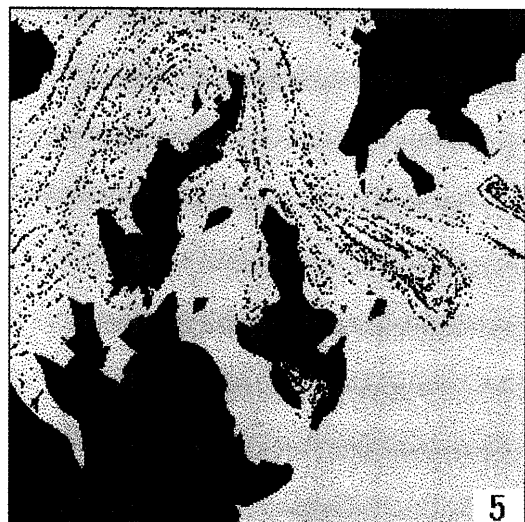
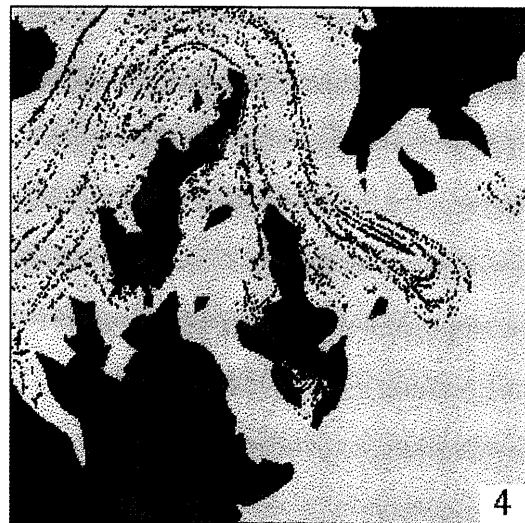


Plate 1a Locations of fictitious water particles after the periods of 1 ~ 5 and 10, in the case when the particles are thrown into the sea at low tide.

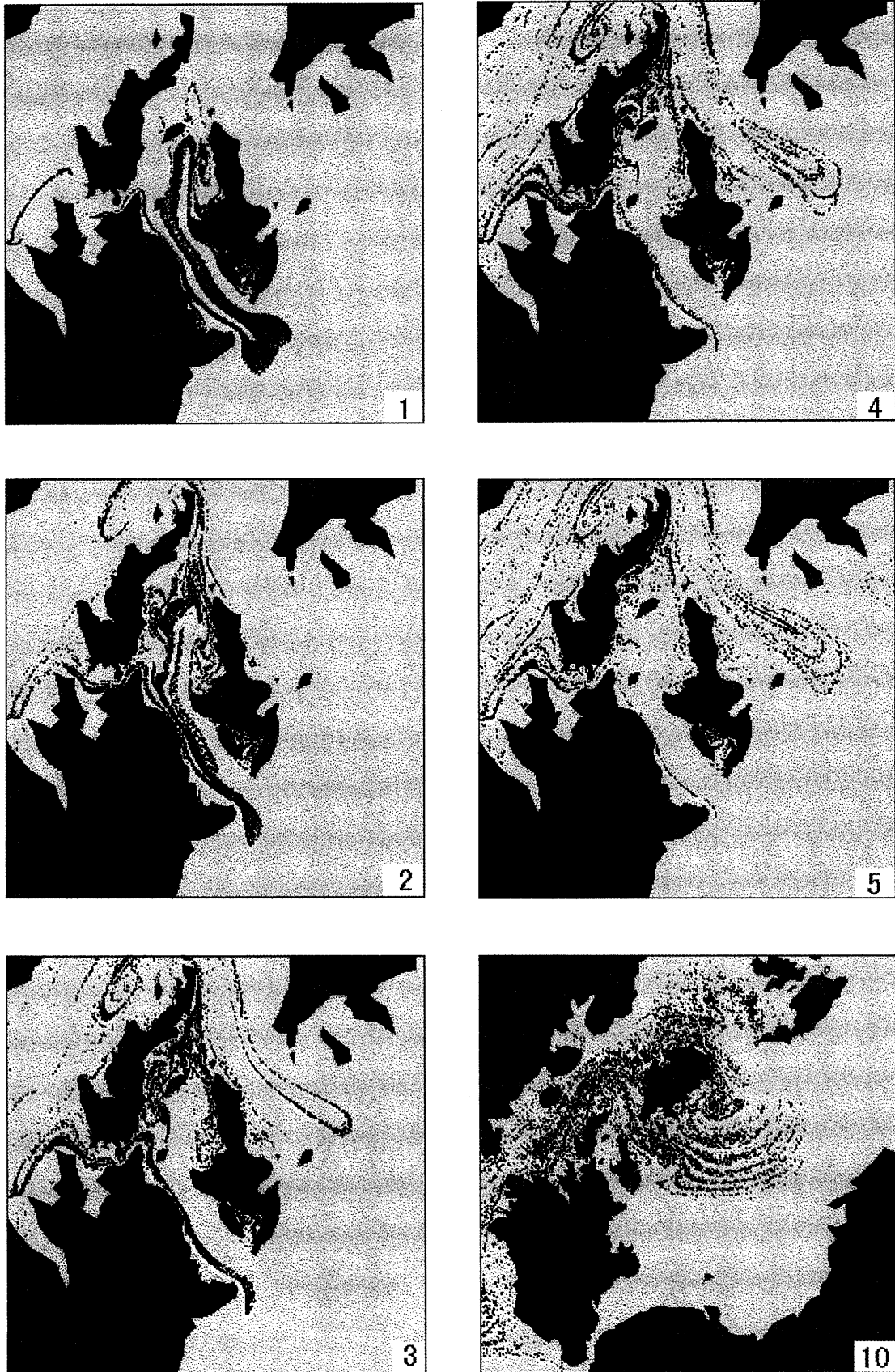


Plate 1b Locations of fictitious water particles after the periods of 1 ~ 5 and 10, when the particles are thrown into the sea at high tide.

ま と め

以上, FEMによる潮汐流の数値解析をもとにして Euler 的および Lagrange 的な 2つの立場から伊唐瀬戸の海水交換を考えた。伊唐瀬戸に設定した境界で算出した流速ベクトルをもとに, それぞれの境界での 1 周期間の流入量, 流出量を Euler 的に求めることにより, 海水は境界 A (長島-伊唐島) から流入して, ほかの 3つの境界 B (伊唐島-野島), C (野島-諸浦島), D (諸浦島-長島) から流出して海水交換が行われることがわかる。

伊唐瀬戸内に架空の粒子を浮かべ, どのように粒子が流出していくかを Lagrange 的にみると, 干潮時に投入した粒子は 2 周期後には 85% 程度粒子が流出しているが, 満潮時に投入した粒子は 2 周期後にはまだ 60% 程度で, 3 周期後にやっと 80% 以上の流出がみられた。また, どちらも 4 周期以降は 90% を超える粒子の流出がみられるが, 10 周期を終えた時点でも全部は流出してしまわない。この理由には伊唐湾の海水交換が悪く, 粒子が流出しにくいことが挙げられる。このように, Euler 的に海水の流量から海水交換を考えるだけでなく, Lagrange 的に架空粒子の動きを追跡することにより, Euler 的な方法

で発見できない新しい知見が得られた。

今回は 2 次的に粒子を海面に浮かべるように設定したが, より詳しい情報を得るには 3 次的に考えて, 領域全体に粒子を入れる必要がある。また, 伊唐瀬戸から出ていった粒子の拡散の様子をもっと長時間にわたって追跡し, 長島海峡や黒之瀬戸を通過する粒子の数を調べることが興味を持たれる。

参 考 文 献

- 1) Isozaki and E. Kitahara (1977): Tides in the bays of Ariake and Yatsushiro. *Oceanographical Magazine*, **28**, 1-32.
- 2) Baliga B.R. 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.
- 3) 海上保安庁 (1983: 日本沿岸潮汐調和定数表).
菊川浩行 (1992): 伊唐瀬戸の潮の流れ. *Mini Rev. Data File Fish. Res.*, **7**, 37-48.
- 4) 数値流体力学編集委員会編 (1995): 乱流解析, 東京大学出版会, pp.76-85.