



八代海において有明海との海水交換が成層流動場に 与える影響評価

伊藤, 航 ; 中山, 恵介 ; 矢野, 真一郎 ; 熊, 柄 ; 斎藤, 直輝 ; 駒井, 克昭
；矢島，啓

(Citation)

土木学会論文集B3（海洋開発）, 75(2):I_977-I_982

(Issue Date)

2019

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2019 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90008019>



八代海において有明海との海水交換が成層流動場に与える影響評価

伊藤 航¹・中山 恵介²・矢野 真一郎³・熊 柄⁴・
齋藤 直輝⁴・駒井 克昭⁵・矢島 啓⁶

¹ 学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: 190t103t@stu.kobe-u.ac.jp

² 正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³ フェローメンバー 九州大学大学院教授 工学研究院環境社会部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

⁴ 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

⁵ 正会員 北見工業大学准教授工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

⁶ 正会員 島根大学教授 エスチュアリー研究センター (〒690-8504 松江市西川津町 1060)

九州本土と天草諸島に囲まれた内湾である八代海を研究対象とし、八代海の流動解析を行うことを目的として八代海のモデルを作成した。また最も大きな影響を与えると考えられる、モタレノ瀬戸、蔵々瀬戸、および大戸ノ瀬戸 (Strait between Yatsushiro Sea and Ariake Sea : SYA) による有明海との交換流量を推定することに重点を置き交換流量推定モデルを作成した。それらのモデルを用いて2018年8月26日に行われた観測結果の再現計算を行った。その結果、SYAでの有明海との交換流量を推定するために必要な潮位差は、大潮および小潮に対応した変化をすること、さらにその変化は季節変動しないことが分かった。SYAを500 m, 250 m, 125 m, 62.5 mの計算メッシュサイズで再現した結果、125 m以下のメッシュサイズで安定した結果を得ることができた。このSYAのモデルで得た交換流量を境界条件として八代海のモデルに与えたところ、2018年8月26日に行われた観測結果を良好に再現することができた。

Key Words : strait, Fantom, numerical simulation, field observation, mesh effect

1. はじめに

本研究の対象領域である八代海は九州本土と天草諸島に囲まれており、閉鎖性が高く水質環境が悪化しやすい。北に位置する有明海とは瀬戸でつながっており、熊本県と鹿児島県にまたがっている。水表面積1200 km²、平均水深約23 m、最大水深約73 m、容積22.3 km³と国内でも有数の規模を誇るが、湾口幅が1.3 kmと狭く、閉鎖度指数は32.5と1000 km²以上の湾では国内において最も閉鎖性が高い内湾である。

高度経済成長期には汚染水の流入により水俣病が起こった歴史もあるが、現在では再び漁業が行われている。養殖業が盛んで、ぶり等の魚類やのり、二枚貝が年3万トン前後の量、収穫されている¹⁾。しかし上述のように極めて閉鎖性が高いため、湾内物質の浄化が十分に進まず水質が悪化しやすい環境であると言える。実際、農水省による現地観測結果に基づけば、八代海底層に貧酸素水塊の存在が確認されており、近年は赤潮や青潮の発生によって漁業への被害が発生していることが報告され

ている²⁾。このような状況を受け、平成14年に「有明海及び八代海等を再生するための特別措置に関する法律」、同15年には「有明海及び八代海等の再生に関する基本方針」が定められ、行政としても改善に向けて動こうとしているが、未だに改善の兆しは見られない。また問題解決のための調査や研究も少ないので現状である。

そこで本研究では、以上の背景を受け水質環境の解析が可能な八代海のモデルを作成することを目的とする。まず、有明海との接合部であるモタレノ瀬戸、蔵々瀬戸、および大戸ノ瀬戸 (Strait between Yatsushiro Sea and Ariake Sea : SYA) における交換流量の評価を行った。そして、有明海との交換流量の推定式を作成し、現地観測が行われた2018年夏季を対象とした再現計算を行い、数値計算モデルの検証を行った。

2. 八代海における観測結果

本研究で八代海のモデルを作成するにあたり、検証用

に用いた、2018年8月26日における現地観測結果を示す。現地観測の座標 N $32^{\circ}27'30.56''$, E $130^{\circ}27'37.89''$ は八代海の北部に位置し、SYA の影響を受けやすい場所であった(図-1)。最高気温 33 度程度、天気は晴れの条件下で 7 時 6 分から 15 時 24 分にかけて 25 回、ザイレムジャパンの YSI ProDSS を用いて水温、塩分の鉛直分布観測が実施された。またこの日の満潮時刻は 8 時 48 分、干潮時刻は 15 時 12 分、引き潮流速最大となるのは正午であった。15 時時点の観測結果では水温が表層で 27.88 度、底層で 25.80 度であり、塩分は表層で 32.50、底層で 33.05 であった。水温、塩分のいずれの鉛直分布にも強い成層は確認できなかった(図-2)。日変化についても大きな変化は見られなかった。

モデルは 3 次元数値計算モデル Fantom³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾を用いて作成した。Fantom の基礎方程式にはブジネスク近似を利用した非圧縮性流体における Navier-Stokes 方程式が用いられている。また移流項の計算には Ultimate-Quickest 法(差分スキーム)が利用されている。水平方向のメッシュサイズは 1000 m、鉛直方向には表層から 1.0 m×26, 2.0 m×2, 2.5 m×12, 5.0 m×6 の計 46 層、90.0 m を与えた。計算間隔(dt)を考慮する際には式(1)で示される CFL 条件を用い、 dt は 8.0 s と設定した。なお、水平メッシュ間隔 500 m での計算結果との比較から、1000 m でも十分な再現精度を有することが確認されている。

$$\frac{(u + C)_{\max} dt}{dx} < 0.2 \sim 0.3 \quad (1)$$

3. SYA を考慮しない解析結果

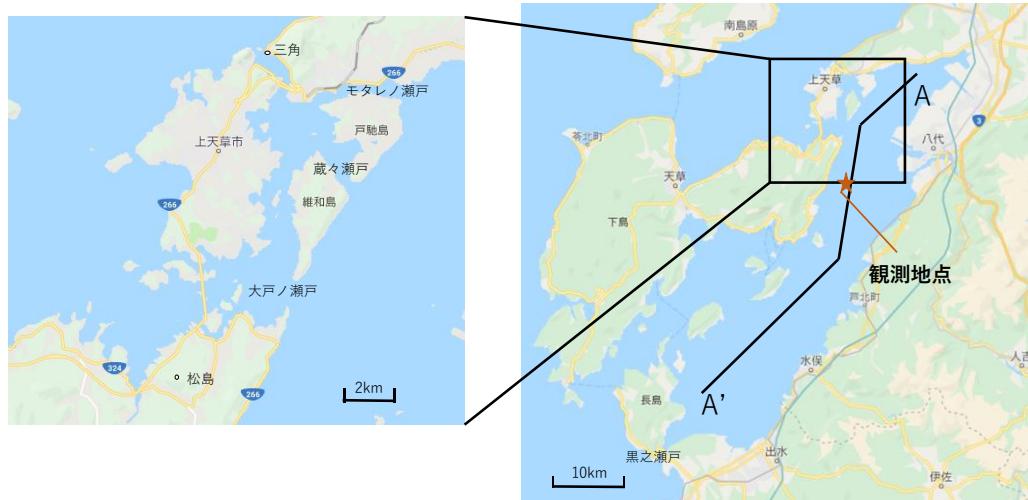


図-1 八代海の全体図(右図)と SYA(左図)。図は上方が北。(google より)

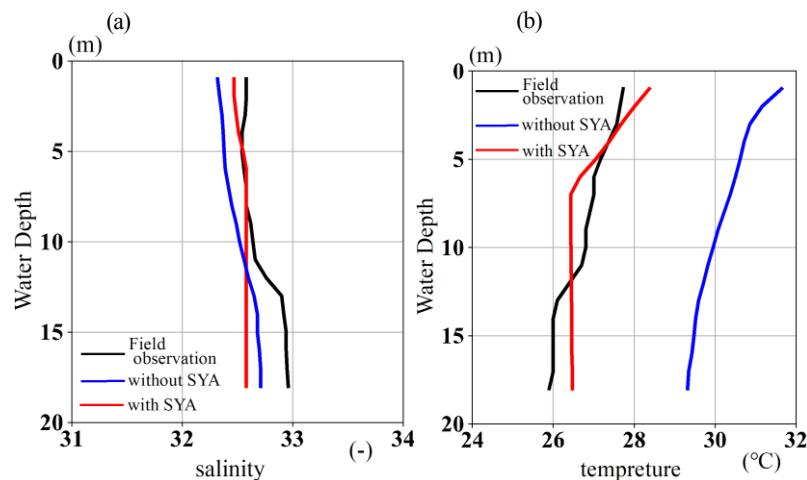


図-2 SYA を考慮する場合、しない場合の再現計算と観測値の比較。(a) 塩分の鉛直分布。(b) 水温の鉛直分布。計測時刻は 12 時。

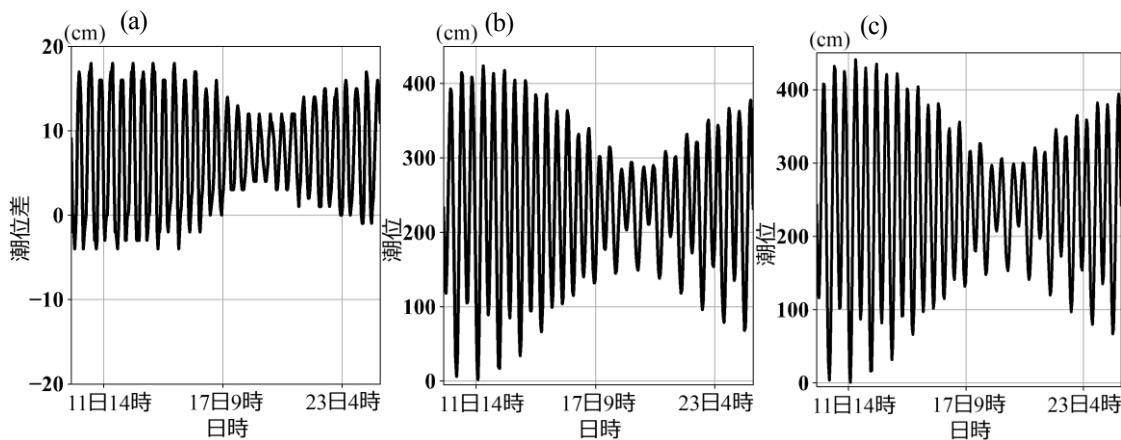


図-3 2018年8月10日からの15日間の潮位と潮位差. (a) 三角と八代の潮位差, (b) 八代(八代海)の潮位, (c) 三角(有明海)の潮位.

表-1 メッシュサイズによる有明海が15 cm高い場合の流入量の比較

メッシュ サイズ(m)	流量(m ³ /s)			
	大戸ノ瀬戸	蔵々瀬戸	モタレノ瀬戸	総流量
62.5	11083	3177	240	14500
125	10968	3568	240	14776
250	11959	4058	18	16035
500	11904	4838	0	16742

ここで u は流速, C は長波の波速である.

計算期間は2018年8月1日から1か月分とした.

水温, 塩分の初期値は夏季における平均値を参考にして与えた. 球磨川からの淡水流入は, 国土交通省発表の水文水質データベースに基づき, 流入量, 水温を算出し, それぞれ $93.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 28.0°C とした. 特に, 流量は過去22年分のデータより, 8月の平水流量を求め, 水温は過去10年分の8月の平均値を用いた. 気象条件は気象庁発表のデータより計算期間に対応するよう与えた. 風速に関しては, 海上における値との比較から松島の2倍の風速を与えることとした. 東京湾, 琵琶湖についての過去の研究⁹⁾¹⁰⁾から海上では遮蔽物が少ない場合, 摩擦係数が小さいことにより風速が陸の2倍程度になることが示されている. 計算領域の南側に与えている外洋との境界条件は, 水温 27.0°C , 塩分 34, また, 潮位は予測潮位とした. いずれも気象庁発表のデータを参考にしている. さらに, 八代海の緯度が北緯32.3度であることからコリオリ係数を $7.8 \times 10^{-5}/\text{s}$ とした¹¹⁾. また, 過去の村上らの研究¹²⁾より, 八代海南側にある黒之瀬戸は, 交換流量が一定量存在することが確認されている. しかし, 八代海南部は非常に水深が深く, 確認されている流量では八代海に与える影響は非常に小さいと考えられるため, 考慮しないこととした. まず, 有明海とのつながりを無視して計算を行った結果, 特に水温で大きな誤差が生じることが分かった(図-2参照).

4. 有明海からの流入 SYA における交換流量解析

(1)潮位の比較

この結果を受け有明海と SYA を含んだモデルを作成することも考えられたが, SYA が非常に細い水路幅しか持たないことから有明海, 八代海の一部と SYA を切り取った地形データに対してより細かいメッシュサイズでその交換流量の比較をし, 各メッシュサイズについて適合性の検討を行うこととした.

交換流量を求めるためにまず八代海と有明海の潮位の比較を行った. 比較したのは2018年8月の潮位である. 八代海と有明海の潮位としてそれぞれ八代および三角の潮位を採用した. どちらも SYA に近い地点である. その結果, 大潮時に 18.0 cm , 小潮時に -4.0 cm 程度有明海側が高くなり, その周期は八代海の潮汐の周期と同じであることが明らかとなった(図-3参照). 有明海が八代海に比べて大きく振動しているのは, 式(2)で与えられる湾口部に対する湾内振動の増幅率(Ro)からも明らかであり, Ro は有明海が 1.74, 八代海が 1.33 であった¹³⁾.

$$Ro = \left\{ \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{T_1}{T_{M_2}} \right) \right\}^{-1} \quad (2)$$

ここで T_1 は湾の固有周期, また T_{M_2} は分潮のうち卓越し

表-2 有明海からの流入量

潮位差 (cm)	流量(m ³ /s)		
有明-八代	大戸ノ瀬戸	藏々瀬戸	モタレノ瀬戸
15 cm	10968	3568	240
10 cm	8830	2886	195
5.0 cm	6201	2043	137
0 cm	0	0	0
-5.0 cm	-6469	-1962	-137

表-3 潮位差によって発生する流れの流速

潮位差 (cm)	平均流速(m/s)		
有明-八代	大戸ノ瀬戸	藏々瀬戸	モタレノ瀬戸
15 cm	0.175	0.194	0.033
10 cm	0.134	0.155	0.027
5.0 cm	0.092	0.107	0.019
0 cm	0	0	0
-5.0 cm	-0.151	-0.103	-0.021

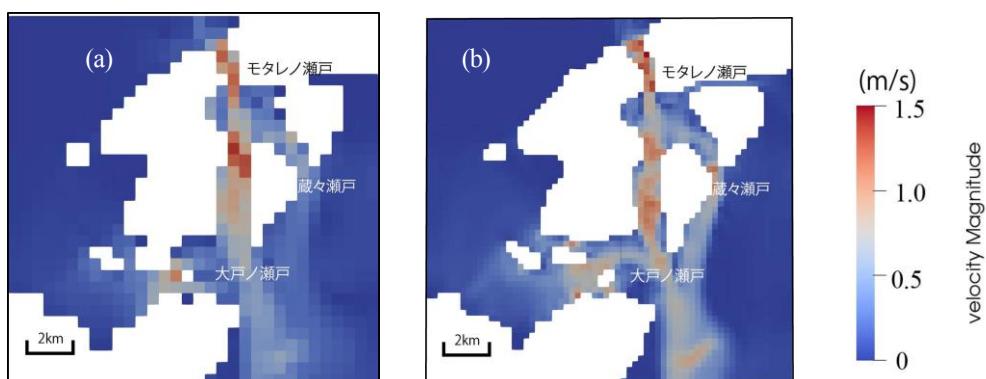


図-4 メッシュサイズによる SYA における流況の違い. (a) 500 m メッシュ. (b) 125 m メッシュ. 図は上方が北.

ている M2 分潮の周期である。

さらに、季節変動を検討するために、2月、5月、11月で同じように有明海と八代海の潮位差をとりその最大値、最小値、周期を調べた。その結果、それぞれ最大値が 18.0 cm, 15.0 cm, 18.0 cm, 18.0 cm であり、最小値が -5.0 cm, -7.0 cm, -4.0 cm, -5.0 cm であった。またその周期は八代海の周期と同じであることが明らかになった。よって、八代海と有明海の潮位差の変化に季節による差異はないことが明らかとなった。

(2) メッシュサイズによる SYA での交換流量の比較

SYA を考慮して計算する場合、計算の容易さの観点か

ら見ると有明海の一部、SYA を含み全てのメッシュサイズを 500 m などに統一し計算するのが望ましい。しかし SYA は非常に水路幅が細いため 500 m メッシュや 250 m メッシュでは正確に再現できない可能性がある。そこで 500 m, 250 m, 125 m, 62.5 m の各メッシュサイズについて SYA と有明海、八代海の一部を切り取った地形データに対して交換流量を求めるためのモデルを作成し、その計算結果を比較した。

また、水路幅の小さい瀬戸部では、開水路的な長波によるエネルギー伝達が卓越することから、鉛直方向は計算領域を分割せずに 1 層のみを与えた。およそ最大の水位差である 15 cm を与えて計算結果の比較を行った。基

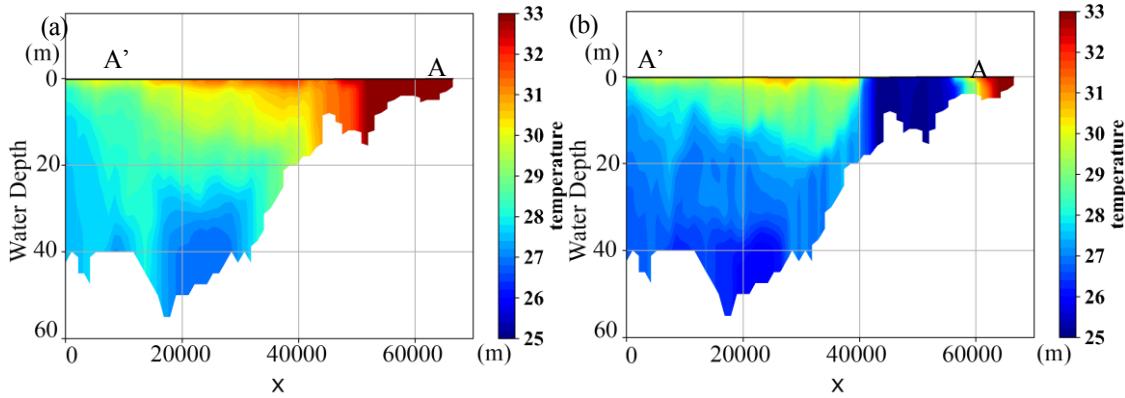


図-5 SYA の有無による水温の解析結果の違い. (a) SYA を考慮しない場合. (b) SYA を考慮した場合. 断面は八代海の瀬筋を中心にとっている. 再現した日時は 8 月 26 日 12 時.

本メッシュサイズが 250 m であったことから, 125 m メッシュは 250 m メッシュを 2 分割, 62.5 m メッシュは 250 m メッシュを 4 分割し, 地形が段丘状になるのを避けるため隣接するセルの水深の値を用いて水深を平均化し, 滑らかな地形になるようにして作成した.

計算間隔 (dt) は式(1)より, 500 m メッシュで 5.0 s, 250 m で 4.0 s, 125 m メッシュ, 62.5 m メッシュで 2.0 s と設定した. 流量は式(3)で与えられる連続式を用いてセルごとに計算し, 得られた結果を水路の断面について足し合わせた. なお, CPU E5-2643 v2 @ 3.50GHz を用いた場合, 500 m メッシュでは計算時間 0.167 時間, 62.5 m では 10.5 時間であった.

$$Q = Au \quad (3)$$

ここで Q は流量, A は断面積である.

計算により表-1 に示す結果を得た. 62.5 m メッシュと 125 m メッシュを比較すると各瀬戸を通る流量の配分が変わっているものの, 総流量は大きな違いが見られないことが分かった. しかし, 250 m メッシュでは総流量が 1300 m³/s, 500 m メッシュでは約 2000 m³/s 多くなってしまった. さらに 500 m メッシュではモタレノ瀬戸からの流入が完全に途絶えてしまっていた(図-4). これらの, メッシュサイズによる流量の変化の原因は, 上述の通り, 自動的にメッシュサイズを変更したことで, 各メッシュサイズによって水路幅が変化したことが原因であると考えられる. よって, SYA における総交換流量が重要であること, 計算コストが高くないことから, 各水位差における交換流量は 125 m メッシュを用いて推定することとした.

(3)八代海と有明海の交換流量

潮位差が 15 cm, 10 cm, 5.0 cm, -5.0 cm の 4 つのケースにおける SYA での交換流量を計算し, 他の潮位差に対しては補間して交換流量を与えることとした(表-2). 潮位差が 15 cm の場合には, 総計で 14776 m³/s もの流入が

ある. 球磨川の流量が 93 m³/s (8 月の平水流量, 平均値) であることから, いかにも有明海からの流入は大きいかが理解される. さらに, 大戸ノ瀬戸からの流入は蔵々瀬戸の約 3 倍, モタレノ瀬戸の約 45 倍であり, SYA からの流入は大戸ノ瀬戸からが卓越していることが分かった. また, この結果は, 村上ら¹²⁾によって確かめられた各瀬戸の通過流量比の結果とも符合している.

表-3 は, 流量の算出に用いた断面での平均流速をまとめたものである. 有明海から八代海へ流入してくるときと八代海から有明海へ流出するときで平均流速の絶対値が最も大きい箇所が変わることが分かった. 流入の場合は蔵々瀬戸部の流速が最も大きく, 流出の場合は大戸ノ瀬戸の流速が最大であった. 流入の際, 流量が最大である大戸ノ瀬戸で, 流速の絶対値が小さくなる現象は, 複数の流れが合流し, 大規模渦によりエネルギーが散逸していることが原因であると考えられる.

5. SYA を考慮した八代海の流況解析

前章で得られた交換流量を, 八代海モデルに境界条件として与えた. なお, もしも SYA で推奨される 125 m 程度のメッシュで八代海を分割して計算すると, 現在の条件に比較して計算時間が 500 倍かかることとなることを記しておく. 境界条件として与える際の水温は, 過去の海上保安庁の観測結果を参考にして, 日変化を表現できるよう, 3 時で最小値 24 度, 15 時で最大値 26 度の 1 日周期となる正弦関数として与えた¹⁴⁾. 球磨川の水温については, SYA に比較して流量が小さいことから 28 °C の一定値を与えた. 他の条件は, 3 章に示された SYA を考慮しない計算結果と同様である.

SYA における交換流量を考慮することにより, 良好的な再現結果を得ることができた(図-2). 特に SYA における交換流量を考慮することで, 水温が大きく観測値に近

づくことが分かった。図-1 の A-A'鉛直断面で示される水温分布に着目すると、SYA からの流入により成層が破壊され、鉛直一様で低温の水温分布が発生することが分かった(図-5 参照)。SYA 付近での成層の破壊は、水産庁や国土交通省によって行われた、水温の鉛直観測¹⁵⁾の結果にも見られたため、今回の再現計算で得た結果は、妥当であると思われる。さらに、その影響は、観測点以外の八代海南部にまで及んでいることが分かった。よって、SYA における交換流量が八代海に与える影響は大きいことが分かった。

6. まとめ

- (1) 有明海と八代海の潮汐を比較することで有明海が大潮時に 18 cm、小潮時に -4.0 cm 程度高くなり、その周期は八代海の潮汐の周期と同じであるということが分かった。また 2 つの海域の潮位差に季節による差異がないことも確認した。
- (2) 有明海から八代海への流出量は、潮位差が 15 cm の時に約 15000 m³/s にもなり、河川流入よりもはるかに大きいことが分かった。さらに、交換流量を求める場合には、八代海と有明海を結ぶ水域は水路幅が狭い部分が多いいため、数値計算を行う際にメッシュサイズを 125 m より大きくするべきではないことも分かった。
- (3) SYA を考慮した八代海のモデルを作成し、良好な再現結果を得ることができた。またその影響が非常に大きいことも確認した。ただし気象条件のうち風向は松島と同じで風速を 2 倍として用いたが、その適合性は今後の課題である。

参考文献

- 1) 総務省他 5 省: 有明海及び八代海等の再生に関する基本方針, pp.1-6, 平成 30 年 9 月 5 日最終変更。

- 2) 農林水産省: 海面漁業生産統計調査, <http://www.Maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html> 2018 年 10 月 9 日アクセス。
- 3) 新谷哲也, 中山恵介: 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型流体モデルの開発と検証, 水工学論文集第 53 卷, pp.I_283-I_288, 2009.
- 4) Nakayama K., Shintani T., Shimizu K., Okada T., Hinata H. and Komai K.: Horizontal and residual circulations driven by wind stress curl in Tokyo Bay, *Journal of Geophysical Research*, Vol.119, pp.1977-1992, 2014.
- 5) Nakayama K., Nguyen H. D., Shintani T. and Komai K.: Reversal of secondary circulations in a sharp channel bend, *Coastal Engineering Journal*, vol.58, No.02, 1650002, 2016.
- 6) Nakayama K., Sato T., Shimizu K. and Boegman L.: Classification of internal solitary wave breaking over a slope, *Phys. Rev. Fluids* 4, 014801, 2019.
- 7) Umlauf L. and Burchard H.: A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *J. Mar. Res.*, Vol.61, pp. 235-265, 2003.
- 8) Warner, J. C., Sherwood, C. R., Arango, H. G. and Signell, R. P.: Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*, Vol.8, pp.81-113, 2005.
- 9) 小田巻実, 佐藤敏, 松島弘, 西田浩志, 下平保直: 夏季の東京湾の流動観測, 水路部技報, pp.67-69, 1991.
- 10) 枝川尚資: 琵琶湖上の気候特性について, 地理学評論, pp. 594-597, 1986.
- 11) PIJUSH K. KUNDU : FLUID MECHANICS, ACADEMIC PRESS, INC , pp.481-483, 1990.
- 12) 村上啓介, 上久保裕志, 古松琢美, 上原 功: 3 次元流動モデルによる八代海の潮流特性の解析, 海洋開発論文集, 第 20 卷, pp.1031-1036, 2004.
- 13) 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.30-33, 1993.
- 14) 海上保安庁: 有明海, 八代海海象調査報告書, pp.20-21, 1973.
- 15) 水産庁, 国土交通省: 八代海における水質の観測状況, <http://ariakeyatsushiro.jp/yatsushiro/danmen/damen_hiduke/danmen_top.htm> 2019 年 1 月 15 日アクセス。

(2019.2.7 受付)

(2019.4.24 受理)

INFLUENCE OF SEAWATER EXCHANGE WITH ARIAKE SEA ON STRATIFIED FLOW FIELD IN YATSUSHIRO SEA

Wataru ITO, Keisuke NAKAYAMA, Shinichiro YANO, Bing XIONG, Naoki SAITO, Katsuaki KOMAI and Hiroshi YAJIMA

We developed the hydrodynamic model of Yatsushiro Sea in order to analyze stratified flow field and water quality in Yatsushiro Sea. Yatsushiro Sea is connected to Ariake Sea with very narrow strait, which cannot be modelled due to the limitation of computational capacity. Therefore, we made an attempt to develop the SYA (Strait between Yatsushiro Sea and Ariake Sea) model to estimate fluxes of seawater exchange through SYA. It was found that there is no seasonal difference in seawater exchange flux. As a result, field observations were successfully reproduced by applying the SYA model into the Yatsushiro Sea model with good agreements.