大規模一斉観測結果に基づく有明海の淡水影響域の評価

Analysis of Region of Freshwater Influence Based on Large-Scale In-Situ Observations in the Ariake Sea

矢野真一郎¹・扇塚修平²・齋田倫範³・田井 明⁴・小松利光⁵

Shinichiro YANO, Shuhei OGITSUKA, Tomonori SAITA, Akira TAI and Toshimitsu KOMATSU

We analyzed the "Region of Freshwater Influence (ROFI)" by three indicators, that is, Estuarine Circulation, Tidal Straining, and Tidal Strining, using dataset from three large-scale in-situ measurement campaigns in the Ariake Sea. As a result of the present research, the followings were clarified: i) Coastal area off Ohura and Takezaki tends to stratify, but off Shimabara Peninsula to mix well; ii) Stratification is dominated by salinity stratification rather than thermal one in the Ariake Sea. Thus, the analysis taking into account water temperature variation can also evaluate ROFI well.

1. はじめに

近年有明海では、大規模なノリの色落ちなどの環境異変が問題となっているが、その主要な原因の1つが冬季の赤潮の発生であると考えられている。また湾奥では、大規模な貧酸素水塊の発生が確認されている(濱田ら、2008など)。有明海における赤潮や貧酸素水塊については多くの研究が行われており、これらの問題は、陸域から負荷される有機物、栄養塩類、さらに底質の細粒化に関係する土砂の影響を受けていると考えられる(堤ら、2003など)。したがって、海域に流入した河川水の挙動やその影響範囲を評価することは、有明海において赤潮や貧酸素水塊が発生するメカニズムを理解し、その解決策を講じる上で重要であると考えられる。

有明海における淡水の影響については、いくつかの研究例がある。矢野ら(2007)は、浅海定線調査データなどをGIS上にデータベース化し、筑後川の流量と赤潮の発生状況や透明度の変動との相関性を調べている。同様の解析は、清本ら(2008)や山口・速水(2009)でも行われ、いずれも統計的手法により淡水流入の影響を評価している。さらに、河川水の滞留時間や海水交換に着目した研究例もある(例えば、柳・阿部、2003など)。一方、齋田ら(2008)は、筑後川河口からブイを投入し平水時と出水時の淡水塊の一潮汐間における挙動を現地観測で測定してい

る.このように多くの研究があるが、各河川の影響範囲は明確ではなく、全体の4割の流入量をもつ筑後川を除いて淡水塊の挙動は興味を持たれていない。有明海には筑後川以外の一級河川が7本、その他ある程度大きい二級河川も流入しており(図-1)、各河川から流入する物質の個別の影響も明確にする必要があると考えられる。

そこで、各河川水の影響範囲を明確にすることを目的に、まずは淡水影響域の評価法についての検討を試みた。 本研究では、過去に実施された大規模な一斉現地観測結果を利用して、湾内各領域における淡水の影響を評価することを試みた。

海域に流入した河川水の影響については、Simpson (1997) により ROFI (Region of Freshwater Influence) という概念が提示されている。ROFIは淡水の影響を強く受ける河口から潮汐により混合が促進される領域の間に存在すると定義されているが、有明海のような閉鎖性内湾では、通常は温度成層の影響も受けている。本研究では、このROFIの概念を利用し、水温変動の影響の有無についての比較も併せて行った。

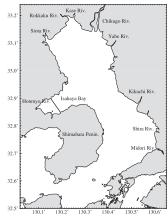


図-1 有明海へ流入する主な河川

¹ 正会員 博(工) 九州大学准教授 大学院工学研究院環境 都市部門

² 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学 専攻

³ 正会員 博(工) 鹿児島大学助教 大学院理工学研究科海 洋土木工学専攻

⁵ フェロー 工博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都 市部門

2. 観測概要

本研究では、過去に行われた3回の観測のデータを基 に解析を行った. 1つ目の観測は2001年10月16日に有明 海全域を対象として行われた「有明プロジェクトI」 (Obs-I) である (小松ら, 2003). 観測当日は比較的日潮 不等の小さい大潮期であり、上げ潮最強時の06:00から 一潮汐間に亘り観測が行われた。当日の主要8河川の平 均総流量は約150m3/sであり、諫早湾干拓調整池の南北 排水門からは15:00~17:00の3時間に平均170m3/sが排出 されていた。2つ目の観測は2003年7月20日に北部有明 海を対象とした「有明プロジェクトII」(Obs-II) である (小松ら, 2004). 梅雨明けが遅れたため、当初想定して いた温度成層は発達しなかったが、大雨により淡水流入 に起因する塩淡成層が発達していた. 観測当日は比較的 日潮不等の小さい中潮期であり、干潮1時間前の06:00か ら次の干潮までの一潮汐間に亘り観測が行われた. 観測 当日の筑後川の流量は417m3/s, 北と南の排水門の総排水 量は、それぞれ1514万m3、418万m3であった。3つ目の 観測は2004年8月8日に行われた諫早湾観測 (Obs-III) である (多田ら, 2005). 観測当日は小潮期であり、干 潮1時間前の06:00から次の干潮前までの一潮汐間に亘り 観測が行われた、当日の筑後川の流量は $44m^3/s$ であり、 排水門からの排水はなかった. 観測ではいずれもADCP による流動構造の曳航観測, 多項目水質計による海洋構 造(塩分・水温分布)観測が複数の観測船で同時に行わ れ,対象海域の面的分布が測定されている.これらの観 測データを用い,次に示す方法で解析を行った.

3. 解析方法

ROFIの概念では、淡水の影響による密度成層が形成されている範囲を評価するにあたって3つの指標を考える (Simpsonら、1990). 1つ目は河川からの淡水流入による 水平密度勾配が引き起こすエスチャリー循環 (Estuarine Circulation: EC) の成層への寄与を表すもので、成層した 状態を完全に混合するために必要なポテンシャルエネルギー ϕ の変化率を意味する次式で評価される.

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{E} = \frac{1}{320} \frac{g^{2} h^{4}}{N_{z} \rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)^{2} \qquad (1)$$

ここで、h: 水深 (m)、 ρ : 海水の水深平均密度 (kg/m^3) である。水平密度勾配 $\partial \rho/\partial x$ については、ある測点の周囲にある測点との密度差を $\Delta \rho$ 、測点間の距離を ΔL とし、取りうる最大の $\Delta \rho/\Delta L$ をその測点における $\partial \rho/\partial x$ とした。 N_z は鉛直方向の混合係数 (m^2/s) であり、次式で表されると仮定している。

$$N_z = \gamma |\hat{u}|h$$
(2)
ここで、 γ : 定数 (= 3.3 × 10⁻²)、 \hat{u} : 水深平均流速 (m/s)

である.

2つ目は、潮汐による混合 (Tidal Stirring: TSti) の寄与で、

$$P_t = \frac{4}{3\pi} \varepsilon k \rho \frac{u_1^3}{h} \qquad (3)$$

と表され、下げ潮半潮汐間で平均したものを用いている。 ここで、 ε :潮流の混合効率を意味するファクター(= 0.004)、k:海底摩擦係数(= 2.5×10^{-3})、 u_1 :流速の振幅(m/s)である。

3つ目は潮流の鉛直シアが水平密度勾配に働くことによって引き起こされる密度分布の歪み (Tidal Straining: TStr) の寄与であり、次式で表される.

$$\overline{\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{st}} = \frac{2}{\pi} \times 0.031 ghu_1 \frac{\partial \rho}{\partial x} \qquad (4)$$

Tidal Stirringと同様に、下げ潮半潮汐の平均値をとっている。ここで、水平密度勾配 $\partial \rho/\partial x$ については、密度勾配は維持されたまま流れにより流軸に沿って移動すると仮定して、次の移流方程式から算出した。

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{1}{\hat{u}} \frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad (5)$$

また、流速の振幅 u_1 については時間的に不連続で測定回数の少ない観測結果からは直接求めることができないので、上げ潮最強時、下げ潮最強時、ならびにそれらの平均流速をそれぞれ用いて求める。以上の式に各観測から得られたデータを代入し、各測点で各測定時間帯におけるECの指標、下げ潮半潮汐におけるTStiとTStrの各指標を求め、平面分布を求めた。

さらに、水温分布の影響を除くために、場の代表水温として各観測時点の空間平均水温を用いて密度を算出し、同様に分布を求めてみた、水温を固定した場合、固定しなかった場合の両方においてEstuarine Circulationと Tidal Stirringの比(以下、EC/TSti)、Tidal Strainingと Tidal Stirringの比(以下、TStr/TSti)を求め、EC/TStiについては各測定時間帯と1周期平均の平面分布を、TStr/TStiについては上げ潮最強時、下げ潮最強時、その平均の3通りの流速を用いた場合の平面分布を求めた。

4. 解析結果

(1) 水温を変動させた場合

a) EC/TStiについて

図-2 (a) \sim (f) に有明プロジェクトII (Obs-II) における水温変動を考慮した場合の一潮汐間にわたるEC/TSti の分布を示す。EC/TSti については1潮汐間の変化は小さかった。EC/TSti の値が大きい領域は淡水の影響により定常的な成層が形成されやすい範囲を表していると考えられる。全体を通して見ると,多くの場合において大浦沖でEC/TSti が大きく,すなわち成層が強い。一方,島原半島沿岸では小さな値,すなわち混合が強い領域が見ら

れ、これまでの有明海に関連した報告に則した傾向が確認できた。また、図に示した範囲で最も南の海域において成層の強い海域が見られる。これは、田中ら(2002)が指摘している深い底谷部であり、成層が発達しやすい海域となっている。

図-3(a), 4(a), 5(a) に有明プロジェクトI (Obs-II), II (Obs-II), ならびに諫早湾観測 (Obs-III) の一潮汐平均のEC/TSti分布をそれぞれ示す。Obs-Iの結果においてもObs-IIと同様に相対的に大浦沖で成層が強く、島原半島沿いで混合が強い傾向が見られた。しかしながら、値を比べるとObs-IIの方が全体的に大きな値を示していた。

これは、Obs-IIは観測前日に大きな出水があり、Obs-Iに比べ河川流量が大きかったことに起因していると考えられる。Obs-IIIの結果を見ると、湾口の竹崎側では成層が強く、多比良側では混合が強い傾向が得られた。これは、竹崎周辺では貧酸素水塊が発生しやすく、島原半島沿いは流速が大きいため混合しやすいという特徴に符合している。また、潮受け堤防付近は混合傾向であったが、排水門からの排水がなかったことが影響していると考えられる。

b) TStr/TSti について

図-3(b), (c) にそれぞれ上げ潮最強時, 下げ潮最強

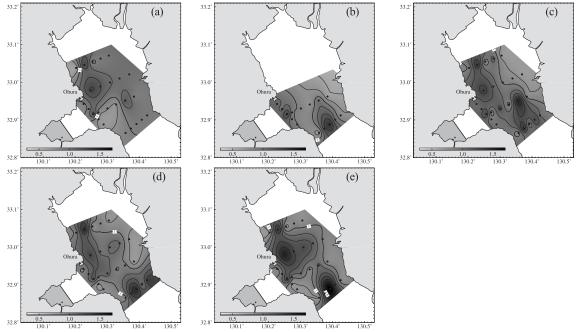


図-2 Obs-II のEC/TSti 分布 (a) 干潮時, (b) 上げ潮最強時, (c) 満潮時, (d) 下げ潮最強時, (e) 干潮時 (図中の×印は観測点を示す)

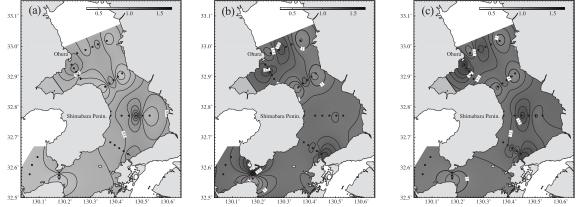


図-3 (a) Obs-Iの一潮汐平均EC/TSti分布, (b) Obs-Iの上げ潮最強時のTStr/TSti分布, (c) Obs-Iの下げ潮最強時のTStr/TSti分布 (全て水温変化を考慮, 図中の×印は観測点を示す)

時の流速を用いて求めたObs-IにおけるTStr/TSti分布を示した.同様に、図-4(b)、(c)にはObs-IIのTStr/TSti分布を、図-5(b)(c)にObs-IIIのTStr/TSti分布を示した.全体的な分布を見ると、EC/TStiと同様に大浦沖で成層が強く、島原半島沿岸で混合が強い傾向が見られるが、比較的観測領域全体が成層傾向を示した。また、Obs-IとIIの比較より、Obs-IIのほうが全体的に大きな値が出ており、河川流量による水平密度勾配の大きさの差が表れていると考えられる.

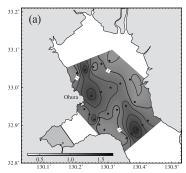
(2) 水温を一定とした場合

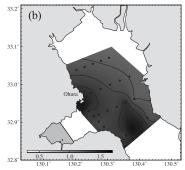
図-6,7に各観測における水温を一定にした場合の結

果を示す.水温分布を考慮した場合と比較すると,顕著な違いはなく同様な傾向が確認された.特にObs-IIでは,この傾向が顕著であるが,上述のように河川流量が他の観測に比べ非常に大きく,塩淡成層の影響が温度成層と較べて支配的であったためである.3回の観測に共通して,温度成層と較べ塩淡成層が強いという傾向が得られた.このことより,有明海における淡水影響域については,水温分布を含んでいても評価できると考えられる.

5. まとめ

本研究では、SimpsonによるROFIの概念をもとに有明





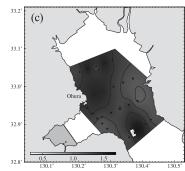
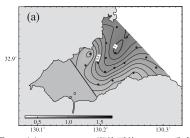
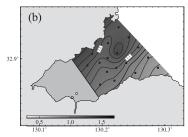


図-4 (a) Obs-IIの一潮汐平均EC/TSti分布, (b) Obs-IIの上げ潮最強時のTStr/TSti分布, (c) Obs-IIの下げ潮最強時のTStr/TSti分布 (全て水温変化を考慮,図中の×印は観測点を示す)





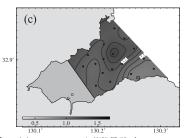
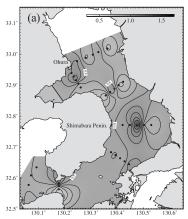
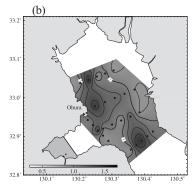


図-5 (a) Obs-IIIの一潮汐平均EC/TSti分布, (b) Obs-IIIの上げ潮最強時のTStr/TSti分布, (c) Obs-IIIの下げ潮最強時のTStr/TSti (全て水温変化を考慮, 図中の×印は観測点を示す)





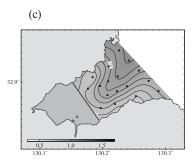
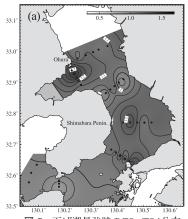
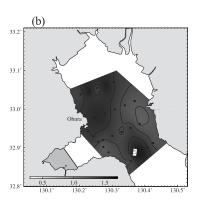


図-6 一潮汐平均EC/TSti分布 (a) Obs-I, (b) Obs-II, (c) Obs-III (全て水温を固定, 図中の×印は観測点を示す)





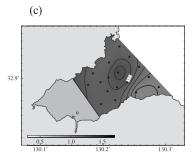


図-7 下げ潮最強時のTStr/TSti分布(a) Obs-I, (b) Obs-II, (c) Obs-III(全て水温を固定, 図中の×印は観測点を示す)

海における淡水影響域の評価を試みた.解析において ROFIの定義に含まれない温度成層の影響が結果に反映されている可能性があったため、その影響についても評価 した.得られた結果をまとめると、次のようになる.

- (1) 大浦沖は成層しやすく,島原半島沿いは混合しやすいという,従来の報告に則した傾向が得られた.また,諫早湾においては,竹崎沖は成層傾向,対岸は混合傾向が強いことも同様に得られた.
- (2) 水温分布を考慮した場合と水温を一定にした場合の 比較より,両者は同様の傾向が得られた。このことよ り,有明海においては温度成層に較べ塩淡成層の影響 が大きく,水温分布を含んで解析を行ってもROFIを 十分に評価できると考えられる。

ROFIの解析により有明海において定常的な成層(エスチャリー循環)と周期的成層(Tidal Straining)が発達しやすい領域を評価することができた、今後は、有明海湾奥部における貧酸素水塊や赤潮の発生状況とROFIの関係性について調べていきたい。また、現地調査では、今回対象としたような大規模で面的にデータが存在する場合はまれであることから、数値シミュレーションを適用することで、潮汐と河川流量、ならびにその他の影響因子(風、日射、波浪など)の条件とROFIの現れ方を評価するとともに、各河川のROFIを大まかに評価し、有明海内の種々の環境変動に対する各河川の寄与についても評価していきたい。

謝辞:本研究は平成21年度科学研究費補助金(基盤研究(C),研究代表者:矢野真一郎)により実施された.ここに記し、謝意を表する.

参考文献

清本容子・山田一来・中田英昭・石坂丞二・田中勝久・岡村 和麿・熊谷 香・梅田智樹・木野世紀(2008):有明海に おける透明度の長期的上昇傾向及び赤潮との関連,海の研究,第17巻,第5号,pp. 337-356.

- 小松利光・安達貴浩・金納 聡・矢野真一郎・小橋乃子・藤 田和夫(2003):有明海における流れと物質輸送に関する 現地観測,海岸工学論文集,第50巻,pp.936-940.
- 小松利光・矢野真一郎・齋田倫範・松永信博・鵜崎賢一・徳 永貴久・押川英夫・濱田孝治・橋本彰博・武田 誠・朝 位孝二・大串浩一郎・多田彰秀・西田修三・千葉 賢・ 中村武弘・堤 裕昭・西ノ首英之 (2004):北部有明海に おける流動・成層構造の大規模現地観測,海岸工学論文 集,第51巻,pp.341-345.
- 齋田倫範・矢野真一郎・田井 明・重田真一・小松利光 (2008): 筑後川から有明海へ流入する河川水の挙動,水 工学論文集,第52巻,pp.1327-1332.
- 多田彰秀・中村武弘・矢野真一郎・武田 誠・橋本彰博・染 矢真作・齋田倫範 (2005): 諫早湾内における夏季の流況 観測,海岸工学論文集,第52巻,pp.351-355.
- 田中昌宏・稲垣 聡・山木克則 (2002): 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,第49巻,pp. 406-410.
- 堤 裕昭・岡村絵美子・小川満代・高橋 徹・山口一岩・門 谷 茂・小橋乃子・安達貴浩・小松利光 (2003):有明海 湾奥部における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋 構造の関係,海の研究,第12巻,第3号,pp.291-305.
- 濱田孝治・速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・吉野健児・平川 隆一・山田裕樹 (2008): 2006年夏季の有明海湾奥におけ る大規模貧酸素化,海の研究,第17巻,第5号,pp.371-377.
- 柳 哲雄・阿部良平 (2003): 有明海の塩分と河川流量から見た海水交換の経年変動,海の研究,第12巻,第3号,pp. 269-275.
- 矢野真一郎・田井 明・宮下祥子・齋田倫範 (2007): GISを 用いた有明海水環境データベースの構築と環境変化の一 考察,海洋開発論文集,第23巻,pp.537-542.
- 山口創一・速水祐一 (2009): 有明海湾奥における出水後の低塩分水塊の挙動およびその水質への影響,沿岸海洋研究,第46巻,第2号,pp.161-173.
- Fujiwara, T., L.P. Sanford, K. Nakatsuji and Y. Sugiyama (1997): Anti-cyclonic circulation driven by the estuarine circulation in a gulf type ROFI, Journal of Marine Systems, Vol.12, pp. 83-99.
- Simpson, J.H., J. Brown, J. Matthews and G. Allen (1990): Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification, Estuaries, Vol.13, No.2, pp. 125-132.
- Simpson, J.H. (1997): Physical processes in the ROFI regime, Journal of Marine Systems, Vol.12, pp. 3-15.