九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

有明海における鉛直循環流の経年変動

柳, 哲雄 九州大学応用力学研究所

下村, 真由美 九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

https://doi.org/10.15017/14553

出版情報:九州大学大学院総合理工学報告. 27 (4), pp.367-371, 2006-03. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University バージョン: 権利関係:

有明海における鉛直循環流の経年変動

柳 哲雄*1•下村真由美*2

(平成18年1月31日 受理)

Year-to-Year Variation in Vertical Circulation of Ariake Bay

Tetsuo YANAGI and Mayumi SHIMOMURA

[†]E-mail of corresponding author: tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp

The year-to-year variation in vertical circulation of Ariake Bay was investigated by a box model analysis using monthly observed salinity data from 1990 to 2000. The vertical circulation in the head of the bay has been weakened from 1990 to 2000 due to the decrease of river discharge, while that in the central part of the bay has been intensified due to the decrease of vertical viscosity accompanied by the decreasing of tidal current amplitude in Ariake Bay.

Key words: Ariake Bay, estuarine circulation, year-to-year variation, box model

1. 緒 言

有明海では近年、貧酸素水塊の頻発や赤潮の大規模 化(堤ら、2003)¹⁾に見られるような、大きな環境変 化が起こっている。このような環境変化は、有明海の 潮汐振幅が近年減少している(柳・塚本、2004)²⁾こ とに因っているという意見があるが、その実態は明ら かにされていない。

一方、有明海には大きな河川が流入しているために、 基本的には河口循環流に伴う鉛直循環流が湾全域で卓 越している(Yanagi and Abe, 2005)³⁾が、有明海に おける鉛直循環流の経年変動特性は明らかにされてい ない。

本研究では、有明海における塩分観測データを用い た水・塩収支ボックスモデル解析により、有明海にお ける1990~2000年の鉛直循環流の経年変動特性を明ら かにする。

2. 使用データ

解析に用いた水温・塩分データはFig.1に黒丸で示す 各観測点で、福岡県・佐賀県・熊本県・長崎県の水産 試験場が1990年~2000年の間毎月、0m、5m,10m,20 m,30m,40m,海底上1mで得て、独立行政法人水産 総合研究センター西海区水産研究所がとりまとめたも のである。

毎月の塩分観測値を、鉛直方向には線形補間、水平 方向にはガウス補間(影響半径5km)して、有明海全域 の塩分分布を求めた。

a (1

3. 水・塩収支の経年変動

有明海をFig.2に示すように湾奥・湾央における上 層・下層の4つのボックスに分割し、それぞれのボック スにおける毎月の平均塩分を、観測点が代表する面積、 観測層の代表する深さを考慮し、加重平均して算出し た。上層の厚さ5mは有明海で密度躍層の発達する深さ である(柳・下村、2004)⁴。

そして、ボックス1,3に対して、流入する河川流量(Q)、 降水量(P)、蒸発量(q)を算出し、これらの値を用 いて正味の淡水流入量(R)を求めた。各ボックスの層 厚(h)、ボックス間の鉛直距離(H)、水平距離(L)、境界 断面積(A)、境界表面積(B)などの値をTable 1に示 す。

各ボックスの水収支、塩収支は次式で表される。

$$\frac{\partial (h_1 + \eta)}{\partial t} B_{1u} = R_1 - u_1 A_1 + w_1 B_1 R_1 = Q_1 + P_1 - q_1, q_1 = k(E_s - E_a) U$$
(1)

$$0 = u_2 A_2 - w_1 B_1 \tag{2}$$

$$\frac{\partial(h_3 + \eta)}{R_3 \stackrel{\partial}{=} t Q_3 + P_3 - q_3, q_3 = k(E_s - E_a)U}$$
(3)

$$0 = -u_2 A_2 + u_4 A_4 - w_3 B_2 \tag{4}$$

^{*1} 応用力学研究所

^{*2} 大気海洋環境システム学専攻

٦

$$\frac{\partial (S_1(h_1 + \eta))}{\partial t} B_{1u} = -u_1 S_{13} A_1 + w_1 S_{12} B_1
k_{1h} (S_3 - S_1) A_1 / L_1 + k_{1v} (S_2 - S_1) B_1 / H_1
\frac{\partial S_2}{\partial t} h_2 B_{1l} = u_2 S_{24} A_2 - w_1 S_{12} B_1$$
(5)

$$+k_{1h}(S_4 - S_2)A_2 / L_1 + k_{1\nu}(S_1 - S_2)B_1 / H_1 \int (6)^{1/2} dt dt$$

$$\frac{\partial (S_{3}(h_{3}+\eta))}{\partial t}B_{2u} = u_{1}S_{13}A_{1} - u_{3}S_{30}A_{3} + w_{3}S_{34}B_{2} + k_{1h}(S_{1}-S_{3})A_{1}/L_{1} + k_{3h}(S_{0}-S_{3})A_{3}/L_{2} + k_{3v}(S_{4}-S_{3})B_{2}/H_{2} + \frac{\partial S_{4}}{\partial t}h_{4}B_{2l} = -u_{2}S_{24}A_{2} + u_{4}S_{40}A_{4} - w_{3}S_{34}B_{2} + k_{4}(S_{4}-S_{5})A_{4}/L_{4} + k_{4}$$

$$+ k_{1h} (S_2 - S_4) A_2 / L_1 + k_{3h} (S_0 - S_4) A_4 / L_2 + k_{3v} (S_3 - S_4) B_2 / H_2$$





ここで、ボックス1、3の容積の時間変動は大浦(Fig.1 参照)における毎月の平均水位(η)の時間変動を考 慮して計算した。k (= 0.17 mm d⁻¹ hPa⁻¹ s m⁻¹; 石崎・ 斉藤、19785))は蒸発係数、E_s、E_aはそれぞれ海面での 飽和蒸気圧(観測された海面水温から推定)、大気蒸 気圧、Uは風速を表す。ボックス1に関係する大気蒸気 圧データは佐賀地方気象台のデータ、ボックス3に関係 する大気蒸気圧データは熊本地方気象台のデータ、風 速データは長崎海洋気象台による島原のデータ(Fig.1 参照)を用いた。S_iはボックスiの平均塩分であり、 S_{ii} (=(S_i + S_i)/2)はボックスiとボックスjの境界の塩 分である。また、S。は湾口における塩分であるが、上 下層でほとんど同一なので上下層同じ値を用いた。解 析には、これらの観測値を3ヶ月移動平均したデータを 用いた。u_i、w_iはそれぞれボックスiの水平・鉛直移流、

Table 1 Dimensions of each box.

h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	h4 (m)		
5.0	2.3	5.0	18.6	-	
H1 (m)	H2 (m)	L1 (m)	L2 (m)	=	
3.7	11.8	37500	32500	_	
A1 (m²)	A2 (m ²)	A3 (m²)	A4 (m²)	-	
6.9×10 ⁴	9.3 × 10 ⁴	4.5×10^{4}	9.7 × 10 ⁴	-	
B1 (m ²)	B2 (m ²)	B1u (M ²)	B11 (m ²)	B2u (M ²)	B2I (m ²)
2.3 × 10 ⁸	6.3 × 10 ⁸	2.5 × 10 ⁸	2.1 × 10 ⁸	8.4×10 ⁸	4.2 × 10 ⁸



Fig.2 Division of boxes in Ariake Bay.

k_{ib}、k_{iv}はボックスiの水平・鉛直分散係数を表す。水 平分散係数は主に潮流振幅に依存するので、上下のボ ックスで等しいと仮定した。

各ボックスと湾口の平均塩分の変動をFig.3に、ボッ クス1、3に対する正味の淡水流入量の変動をFig.4に示 す。1991年、1993年夏季のように、大きなR1に対して S1は大きく低下している。

(1)~(8)式中に未知数はu1、u2、u3、u4、w1、w3、 k1h、k3h、k1v、k3vの10個あり、式は(1)~(8)式の8つ であるため、このままでは未知数を求めることは出来 ない。そこで、最小二乗法を用いて未知数を求める。

まず、湾奥の未知数u1、u2、w1、k1h、k1vを決定す る。(1)、(2)式の水収支式をそれぞれ(5)、(6)の塩収支 式に代入し、得られた式をボックス1とボックス2でま とめると、湾奥について以下の式が得られる。

$$m_t = w_1 a_t + k_{1h} b_t \tag{9}$$

$$\begin{split} m_t &= \left[\frac{\partial (S_1(h_1 + \eta))}{\partial t} B_{1u} - S_{13} \left(\frac{\partial (h_1 + \eta)}{\partial t} B_{1u} - R_1 \right) + \frac{\partial S_2}{\partial t} h_2 B_{1l} \right] \\ a_t &= \left[B_1 (S_{24} - S_{13}) \right]_t \\ b_t &= \left[\frac{\left\{ (S_3 - S_1) A_1 + (S_4 - S_2) A_2 \right\}}{L_1} \right]_t \end{split}$$

m_t、a_t、b_tはすべてデータから計算可能であり、各月 に関する経年変動が同一であると仮定すると、1990年 ~2000年の各年において、12か月分の(9)式(t=1~12) が得られる。これを行列で表すと、

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_{12} & b_{12} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} w_1 \\ k_{1h} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{12} \end{pmatrix}$$
(10)

となる。このとき、(9)式の左辺と右辺の誤差方程式は、

$$\mathbf{V} = \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X} \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{12} \end{pmatrix} \tag{11}$$

となり、誤差の二乗和Sは

$$S = \mathbf{V}^{t}\mathbf{V} = (\mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X})^{t}(\mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X})$$
$$= \mathbf{L}^{t}\mathbf{L} - 2\mathbf{X}^{t}\mathbf{A}^{t}\mathbf{L} + \mathbf{X}^{t}\mathbf{A}^{t}\mathbf{A}\mathbf{X}$$
(12)

と表せる。Sが最小となる条件は、

$$\frac{\partial \mathbf{V}^{t} \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}} = -2\mathbf{A}^{t}\mathbf{L} + 2\mathbf{A}^{t}\mathbf{A}\mathbf{X} = 0$$

 $\mathbf{A}^{t}\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{A}^{t}\mathbf{L}$ (13)

であるので、

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^{t} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{t} \mathbf{L}$$
(14)

となる。(12)式の誤差の2乗和Sが最小となるときの解、 すなわち、(14)式から海域の水・塩の収支を最も良く 再現する w_1 、 k_{1h} を求めることが出来る。このようにし て求めた w_1 、 k_{1h} を用いて、(1)、(2)、(6)式より残りの 未知数 u_1 、 u_2 、 k_{1v} を算出した。

次に、湾央の未知数u₃、u₄、w₃、k_{3h}、k_{3v}を決定する。 (3)、(4)式の水収支式をそれぞれ(7)、(8)の塩収支式 に代入し、得られた式をボックス3とボックス4でまと めると、湾央ついて以下の式が得られる。

$$n_{t} = w_{3}c_{t} + k_{3h}d_{t}$$
(15)

$$z = \overline{c},$$
$$n_{t} = \left[\frac{\partial(S_{3}(h_{3}+\eta))}{\partial t}B_{2u} - S_{30}\left(\frac{\partial(h_{3}+\eta)}{\partial t}B_{2u} - R_{3}\right) + \frac{\partial S_{4}}{\partial t}h_{4}B_{2l} - u_{1}A_{1}(S_{13} - S_{30}) - u_{2}A_{2}(S_{40} - S_{24}) - k_{1h}\frac{(S_{1} - S_{3})A_{1} + (S_{2} - S_{4})A_{2}}{L_{1}}\right]_{t}$$
$$c_{t} = \left[B_{2}(S_{40} - S_{30})\right]_{t}$$
$$d_{t} = \left[\frac{\left\{(S_{0} - S_{3})A_{3} + (S_{0} - S_{4})A_{4}\right\}}{L_{2}}\right]_{t}$$

である。(9)式により得られた u_1 、 u_2 、 k_{1h} を(15)式の n_t に代入し、(9)式と同様にして未知数 w_3 、 k_{3h} を解く。このとき**A、X、L**は以下のようになる。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} c_1 & d_1 \\ c_2 & d_2 \\ \vdots & \vdots \\ c_{12} & d_{12} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} w_3 \\ k_{3h} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{12} \end{pmatrix}$$
(16)

(16)式により、(11)~(14)式と同様にして未知数w3、k3h
 を求めた。そして、得られたw3、k3hと湾奥のボックス
 1、2の解u1、u2、k1hを(3)、(4)、(8)式に代入し、残りの未知数u3、u4、k3vを算出した。



Fig.3 Temporal variations in S_1 , S_2 , S_3 , S_4 and S_0 in Ariake Bay.



Fig.4 Temporal variations in R_1 and R_3 .

4. 解析結果

最小二乗法による計算の結果求められた u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 、 w_1 、 w_3 の経年変動をFig.5に示す。図中の点線は回 帰直線であり、 α はその傾きを表す。これらの流速は 大きな経年変動を繰り返しているので、得られた α は 統計的には有意ではないが、11年間のトレンドとして は湾奥で負、湾央で正の値をとっている。

湾奥で鉛直循環流速が近年小さくなっている主な理 由は、Fig. 6(a)に示すように(図中の点線は回帰直線、 α はその傾きを示す)、湾奥に流入する河川流量(Q_1) が近年減少してきていることに因ると考えられる。一 方Fig. 6(b)に示すように湾央に流入する河川流量(Q_3)



Fig.5 Year-to-year variations in estimated velocities related to vertical circulation in Ariake Bay. Broken line shows the fitted trend and α means the estimated slope.

もわずかに(湾奥ほどではない)減少してきているに も関わらず、湾央で鉛直循環流速が大きくなっている 理由は、すでにYanagi and Abe(2005)³⁾が明らかにし ているように、有明海の潮流が弱くなったために、鉛 直粘性係数が小さくなり、その結果鉛直循環流が強化 されたためであると考えられる。

今回得られた、有明海では近年湾央で鉛直循環流が 強くなり、湾奥で鉛直循環流が弱くなっているという 結果は、有明海全域の海水交換は近年良くなってきて いる(柳・阿部、2003)⁶⁾のに対して、有明海湾奥の 海水交換は近年悪くなってきている(柳・阿部、2005) ⁷⁾ことと定性的には一致している。

Fig. 7に示すように(図中の点線は回帰直線、αはその傾きを示す)、湾奥と湾央の水平分散係数は近年やや 大きくなってきている(統計的には有意ではない)。 一方、湾奥と湾央の鉛直分散係数は横ばいである。こ れらの理由は現在のところよくわからない。

5. 議論

鉛直循環流は河口循環流のみならず、吹送流や潮汐 残差流によっても励起される。木谷(2005)⁸⁾は有明 海では近年北風が弱まり、冬季の北風が励起する吹送 流による鉛直循環流(上層を湾外に、下層を湾奥に向 かう)が弱くなっている可能性を指摘している。木谷 (2005)⁸⁾の指摘は、今回我々が求めた湾央の鉛直循環 流が近年強くなっていることと一致しない。このこと



Fig.6 Year-to-year variations in river discharge into the head of the bay (Q_1) and that into the center of the bay (Q_3) .

は、有明海湾央における鉛直循環流の主成分が吹送流 ではなく河口循環流であることを示唆している。



Fig.7 Year-to-year variations in estimated horizontal and vertical dispersion coefficients in Ariake Bay. Broken line shows the fitted trend and α means the estimated slope.

一方、湾奥の鉛直循環流は近年弱くなっているので、 木谷(2005)⁸⁾が指摘したような吹送流の影響が考え られるが、今回の解析結果から吹送流と河口循環流の 影響を分離することは不可能である。両者の寄与率に 関する定量的な議論は、今後数値モデルにより吹送流 と河口循環流による鉛直循環流の経年変動を再現した 後に行う予定である。

また潮汐残差流による鉛直循環流は、有明海のよう に湾奥に向かって浅くなる湾では、上層を湾奥に下層 を湾口に向かう方向に励起される(Shiraki and Yanagi, 2006)⁹⁰ので、逆河口循環流の流向となり、 有明海で卓越している鉛直循環流とは逆向きになる。 したがって、潮汐残差流としての鉛直循環流は有明海 では無視出来るほど小さいと考えられる。

6. おわりに

以上の解析の結果、有明海では、近年湾奥で鉛直循 環流が弱まり、湾央で鉛直循環流が強まっていること が明らかとなった。

今後、さらに研究を進めて、このような鉛直循環流 の経年変動と有明海奥部における貧酸素水塊・赤潮発 生機構の関連の有無の解明に関する研究を行いたいと 考えている。

謝辞

本研究のもととなる塩分データを長年にわたってと り続けられている有明海沿岸各県の担当者、データの 取りまとめにあたられている独立行政法人西海区水産 研究所の関係者に敬意を表します。また本研究は(財) 自然保護基金による「人間活動による有明海における リン・窒素・珪素循環の変化」(研究代表者:柳 哲 雄)の一部であることを付記する。

参考文献

- 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 明海奥部海域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,12,85-96.
- 柳 哲雄・塚本秀史(2004): 有明海における潮汐振幅 の経年変動. 海の研究, 13, 295-300.
- Yanagi, T. and R. Abe (2005): Increase of water exchange due to decrease of tidal amplitude in Ariake Bay, Japan. Continental Shelf Research, 25, 2174-2181.
- 4) 柳 哲雄・下村真由美(2004): 有明海における成層度の 経年変動. 海の研究, 13, 575-581.
- 5) 石崎 廣·斉藤 実(1978):瀬戸内海の蒸発量.沿岸海 洋研究ノート, 16, 11-20.
- 6) 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, 12, 269-275.
- 7)柳 哲雄・阿部良平(2005):有明海奥部における塩分と DIP・DIN 収支の経年変動.海の研究, 14, 21-33.
- 8) 木谷浩三(2005): 有明海における北方成分風の変動について. 海と空, 80, 175-183.
- 9) Shiraki,Y. and T.Yanagi (2006): Dependence of estuarine circulation on tidal amplitude. (to be submitted).