

# 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)<sup>1)</sup>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)<sup>2)</sup>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)<sup>3)</sup>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、0 m、5 m、10 m、20 m、30 m、40 m、海底上1 m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。

### 3. 水・塩収支の経年変動

有明海をFig.2に示すように湾奥・湾中央における上層・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5 mは有明海で密度躍層の発達する深さである(柳・下村、2004)<sup>4)</sup>。

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。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(h_1 + \eta)}{\partial t} B_{1u} &= R_1 - u_1 A_1 + w_1 B_1 \\ R_1 &= Q_1 + P_1 - q_1, q_1 = k(E_s - E_a)U \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$0 = u_2 A_2 - w_1 B_1 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(h_3 + \eta)}{\partial t} B_{2u} &= R_3 + u_1 A_1 - u_3 A_3 + w_3 B_2 \\ R_3 &= Q_3 + P_3 - q_3, q_3 = k(E_s - E_a)U \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$0 = -u_2 A_2 + u_4 A_4 - w_3 B_2 \quad (4)$$

\*1 応用力学研究所

\*2 大気海洋環境システム学専攻

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(S_1(h_1 + \eta))}{\partial t} B_{1u} &= -u_1 S_{13} A_1 + w_1 S_{12} B_1 \\ k_{1h}(S_3 - S_1) A_1 / L_1 + k_{1v}(S_2 - S_1) B_1 / H_1 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S_2}{\partial t} h_2 B_{1l} &= u_2 S_{24} A_2 - w_1 S_{12} B_1 \\ + k_{1h}(S_4 - S_2) A_2 / L_1 + k_{1v}(S_1 - S_2) B_1 / H_1 \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(S_3(h_3 + \eta))}{\partial t} B_{2u} &= u_1 S_{13} A_1 - u_3 S_{30} A_3 + w_3 S_{34} B_2 \\ + k_{1h}(S_1 - S_3) A_1 / L_1 + k_{3h}(S_0 - S_3) A_3 / L_2 \\ + k_{3v}(S_4 - S_3) B_2 / H_2 \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S_4}{\partial t} h_4 B_{2l} &= -u_2 S_{24} A_2 + u_4 S_{40} A_4 - w_3 S_{34} B_2 \\ + k_{1h}(S_2 - S_4) A_2 / L_1 + k_{3h}(S_0 - S_4) A_4 / L_2 \\ + k_{3v}(S_3 - S_4) B_2 / H_2 \end{aligned} \right\} (8)$$

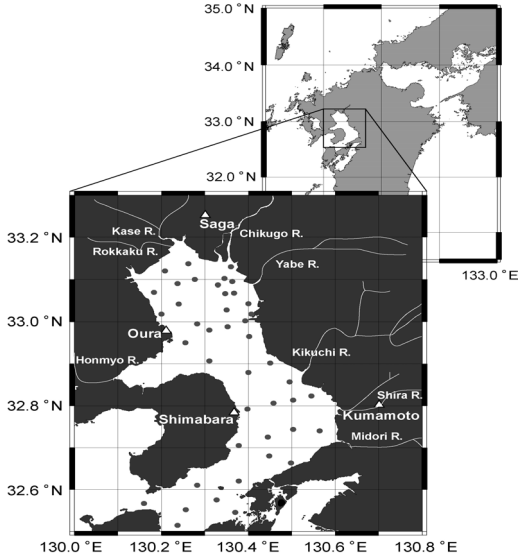


Fig.1 Ariake Bay with the observation stations of salinity and water temperature.

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 ( $\eta$ ) の時間変動を考慮して計算した。 $k$  ( $= 0.17 \text{ mm d}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s m}^{-1}$ ; 石崎・斉藤, 1978<sup>5)</sup>) 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、 $S_{ij} (= (S_i + S_j) / 2)$  はボックス  $i$  とボックス  $j$  の境界の塩分である。また、 $S_0$  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 (m <sup>2</sup> )	A2 (m <sup>2</sup> )	A3 (m <sup>2</sup> )	A4 (m <sup>2</sup> )		
$6.9 \times 10^4$	$9.3 \times 10^4$	$4.5 \times 10^4$	$9.7 \times 10^4$		
B1 (m <sup>2</sup> )	B2 (m <sup>2</sup> )	B1u (m <sup>2</sup> )	B1l (m <sup>2</sup> )	B2u (m <sup>2</sup> )	B2l (m <sup>2</sup> )
$2.3 \times 10^8$	$6.3 \times 10^8$	$2.5 \times 10^8$	$2.1 \times 10^8$	$8.4 \times 10^8$	$4.2 \times 10^8$

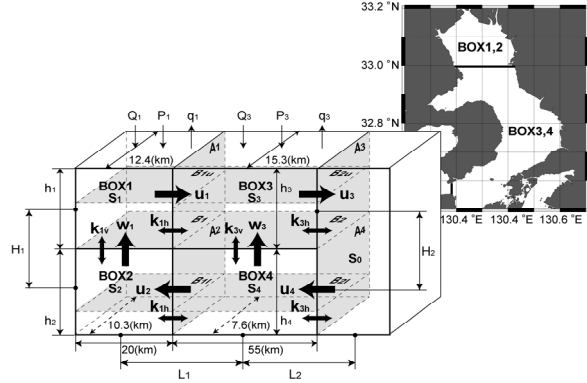


Fig.2 Division of boxes in Ariake Bay.

$k_{ih}$ 、 $k_{iv}$  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  $R_1$  に対して  $S_1$  は大きく低下している。

(1)~(8)式中に未知数は  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $w_1$ 、 $w_3$ 、 $k_{1h}$ 、 $k_{3h}$ 、 $k_{1v}$ 、 $k_{3v}$  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  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $w_1$ 、 $k_{1h}$ 、 $k_{1v}$  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。

$$m_t = w_1 a_t + k_{1h} b_t \quad (9)$$

ここで、

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

$m_t$ 、 $a_t$ 、 $b_t$  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、

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

となる。このとき、(9)式の左辺と右辺の誤差方程式は、

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

となり、誤差の二乗和Sは

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

と表せる。Sが最小となる条件は、

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

$$\mathbf{A}'\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{A}'\mathbf{L} \quad (13)$$

であるので、

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

となる。(12)式の誤差の2乗和Sが最小となる時の解、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 $w_1$ 、 $k_{1h}$ を求めることができる。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、湾奥の未知数 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $w_3$ 、 $k_{3h}$ 、 $k_{3v}$ 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、湾奥ついで以下の式が得られる。

$$n_t = w_3 c_t + k_{3h} d_t \quad (15)$$

ここで、

$$n_t = \left[ \frac{\partial(S_3(h_3+\eta))}{\partial} B_{2u} - S_{30} \left( \frac{\partial(h_3+\eta)}{\partial} B_{2u} - R_3 \right) + \frac{\partial S_4}{\partial} h_4 B_{2l} - u_1 A_1 (S_{13} - S_{30}) - u_2 A_2 (S_{40} - S_{24}) - k_{1h} \frac{(S_1 - S_3)A_1 + (S_2 - S_4)A_2}{L_1} \right] c_t = [B_2(S_{40} - S_{30})]_l d_t = \left[ \frac{(S_0 - S_3)A_3 + (S_0 - S_4)A_4}{L_2} \right]$$

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 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{L}$ は以下ようになる。

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

(16)式により、(11)～(14)式と同様にして未知数 $w_3$ 、 $k_{3h}$ を求めた。そして、得られた $w_3$ 、 $k_{3h}$ と湾奥のボックス1、2の解 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $k_{1h}$ を(3)、(4)、(8)式に代入し、残りの未知数 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $k_{3v}$ を算出した。

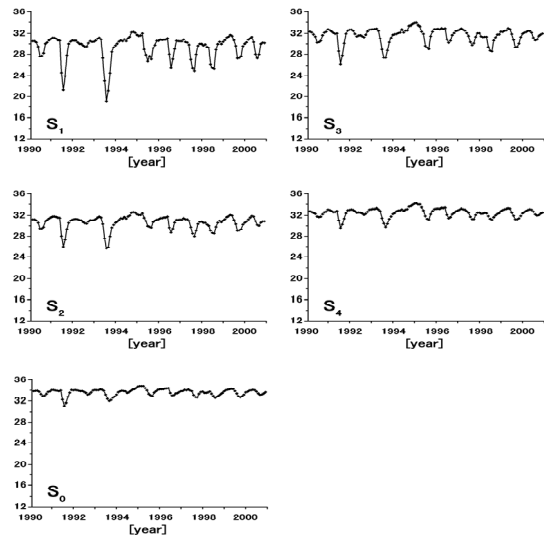


Fig.3 Temporal variations in S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub> and S<sub>0</sub> in Ariake Bay.

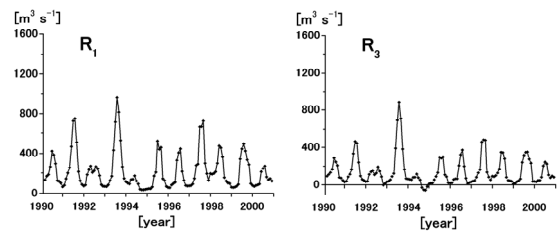


Fig.4 Temporal variations in R<sub>1</sub> and R<sub>3</sub>.

### 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、 $\alpha$ 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ため、得られた $\alpha$ 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、湾奥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、 $\alpha$ 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)に示すように湾奥に流入する河川流量( $Q_3$ )

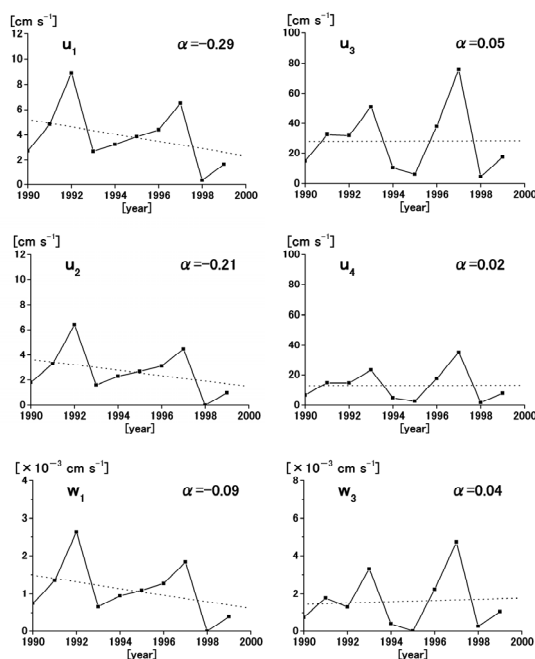


Fig.5 Year-to-year variations in estimated velocities related to vertical circulation in Ariake Bay. Broken line shows the fitted trend and  $\alpha$  means the estimated slope.

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)<sup>3)</sup>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）<sup>6)</sup>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）<sup>7)</sup>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、 $\alpha$ 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)<sup>8)</sup>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)<sup>8)</sup>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

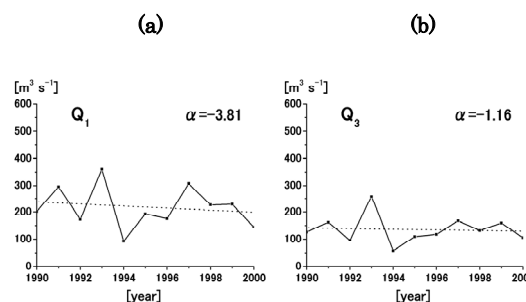


Fig.6 Year-to-year variations in river discharge into the head of the bay ( $Q_1$ ) and that into the center of the bay ( $Q_3$ ).

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。

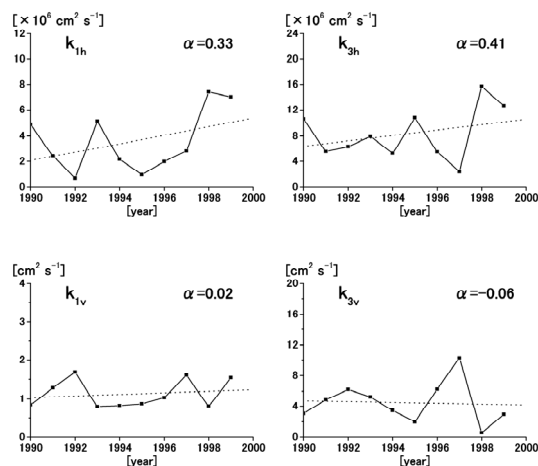


Fig.7 Year-to-year variations in estimated horizontal and vertical dispersion coefficients in Ariake Bay. Broken line shows the fitted trend and  $\alpha$  means the estimated slope.

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)<sup>8)</sup>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）<sup>9)</sup>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

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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).