

— 論 文 —

## 有明海奥部の貧酸素と諫早湾干拓事業の因果関係の検証\*

松川 康夫\*\*†・佐々木 克之<sup>+</sup>・羽生 洋三<sup>++</sup>

### 要 旨

有明海奥部の水質環境劣化と諫早湾干拓事業の因果関係を検証するため、有明海奥部に貧酸素が発生する7, 8月の水質 (DO, DIN, PO<sub>4</sub>-P), 海面水と海底直上水の密度差, 及び流域の降水量について、1973年から2009年までの経年変化を調べた。水質は佐賀県浅海定線調査のデータ, 降水量は佐賀市のデータを用いた。密度は公式 (UNESCO, 1981) を用いて水温と塩分から算出した。降水量, 密度差, 水質の経年変化の三次近似曲線には顕著なN字あるいは逆N字パターンが共通して現れた。流域を代表する佐賀市の7月の降水量と7, 8月の密度差と水質の三次近似曲線の同調関係および水質のPO<sub>4</sub>-P/DIN比から、近年における7月の降水量の増加が7, 8月の有明海奥部における貧酸素の悪化の主要因であるのに加えて、諫早湾干拓事業に起因し、諫早湾が大きな浄化源から大きな負荷源に変化したことと、潮流が弱まり、海面水と直上水の密度差が増加したことが、貧酸素化を促進させたことが明らかになった。

キーワード：貧酸素, 海洋環境, 干拓事業, 有明海, 諫早湾

### 1. はじめに

諫早湾干拓事業における潮受け堤防建設とその水門閉め切り以降、赤潮と貧酸素などの水質悪化や底質の細泥化が諫早湾に止まらず有明海奥部に至るまで顕著となり、タイラギ斃死などの深刻な漁業被害に悩む漁民は潮受け堤防の開門を提訴した (諫早湾干拓開門請求訴訟)。この中で、福岡高裁は事業者たる国に開門調査を命じ

(2010年12月工事差止等請求訴訟判決)、逆に長崎地裁は開門の提訴を退けている (2011年6月開門等請求訴訟判決)。これらの判決は潮受け堤防閉め切りと漁場環境悪化の因果関係の有無に焦点を当てた研究の重要性を示している。

この因果関係の有無に焦点を当てた研究には、潮位データの解析によってM2潮振幅が減少したことを示した宇野木 (2002)、諫早湾とその周辺で潮流が減少することを数値シミュレーションによって示した灘岡・花田 (2002)、有明海奥部西寄りの海底が貧酸素になりやすくなることを数値シミュレーションによって示した塚本・柳 (2002)、地球自転の効果で筑後川起源の水が諫早湾内を経由して島原半島沿いを流出することを数値シミュレーションで示した山口・経塚 (2003 (灘岡・花田 (2002) の図3.20参照))、堤防閉め切り以前と以後に測定され

\* 2012年9月21日受領; 2014年1月31日受理

著作権: 日本海洋学会, 2014

\*\* 〒241-0833 横浜市旭区南本宿町77-47

† Tel: 045-351-5641

e-mail: matsuyan@k4.dion.ne.jp

+ 〒064-0807 札幌市中央区南7条西23条1-15-422

++ 〒177-0044 東京都練馬区上石神井1-8-2-508

た流速を比較してその差を論じた小田巻ら(2003), 堤防閉め切り以降に有明海の底質が細泥化するとともに底生動物相が細泥と貧酸素に適応したドロクダムシ *Corophium* sp. A とピロードマクラガイの優占系に遷移したことを示した東(2005 a, b), 有明海奥部に出水に伴って発生する赤潮の規模と継続期間が堤防閉め切りによって不連続的に増大したことを示そうとした堤ら(2007), 潮受け堤防建設と水門閉め切りによって有明海のタイラギが減少したことを示した田北・山口(2005), エビ類, スズキ, クロダイなどが減少したことを示した佐々木(2005 a, b, c)がある。こういった研究をさらに発展させる必要があろう。

なお, 諫早湾潮受け堤防閉め切りと有明海環境悪化の因果関係については, その内容として次の二つが指摘されている(日本海洋学会海洋環境問題委員会, 2001)。

第一は, 潮受け堤防閉め切りに伴い有明海の潮流と底泥の巻き上げが減少し, その結果透明度が上昇するとともに, 夏季における成層が強化され, 上層には赤潮, 下層には貧酸素が生じるようになった, という有明海奥部の潮流減少を主要因とする因果関係である。

第二は, 諫早湾の生態系と物質循環はもともと水質浄化型であったのが, 諫早干拓と堤防閉め切りに伴う広大な干潟・浅海域の浄化力の喪失と湾内潮流の顕著な減少によって水質悪化型に転化し, その汚濁物質が有明海奥部のエスチャリー循環を通じて有明海奥部に伝播し, 貧酸素と赤潮が悪化した, という諫早湾の生態系と物質循環の悪化を主要因とする因果関係である。

ここでは前者を潮流仮説, 後者を物質循環仮説と呼ぶことにする。

潮流仮説に関しては, 潮位振幅の減少は堤防閉め切りだけでなく18.6年周期の月の昇降点振動, 地球温暖化に伴う全般的の海面上昇, 九州西部・東シナ海の地殻変動に伴う海面変動の効果も無視できないが, 潮位振幅の減少それ自体は数%に過ぎないこと, 潮位振幅の変化だけでなく地形変化の影響も受ける潮流の方がより大きな影響を受ける可能性があるが, この影響を抽出するには数値シミュレーションの手法が有力であること, ただしその成功のためには地形(海岸地形と海底地形), 干潟を含む境界条件, 密度構造を精度よく表現できるモデルを採用するとともに, 密度躍層面を通過する運動量, 熱,

塩分の拡散係数と流速のシアーと鉛直安定度の関係を適正に設定する必要がある, そのことが最大の課題である, と総括されている(松野・中田, 2004)。

物質循環仮説に関しては, 生態系モデルを用いた研究が有力であるが, シミュレーションにおけるモデル設定条件や現況再現におけるチューニング条件の明示, および潮流モデルの場合にも指摘された密度躍層における成層強度の再現が課題であり, 同時に, 生態系の素過程に関する研究が決定的に立ち遅れている, と総括されている(柳, 2004)。

最近では, 浮遊系と底泥系を統合した生態系モデルの開発とコンピューター・シミュレーション(田中・小田切, 2010, 2011)が展開され, 有明海奥部の赤潮や貧酸素を再現するところまで到達したが, 肝心の諫早湾干潟・浅海域生態系の構造と素過程を含むモデルは開発されていない。そして, 諫早湾における生態系と物質循環の悪化すなわち浄化源から負荷源への変化に焦点を当てた研究は佐々木ら(2003)以外にない。この研究によれば, 堤防閉め切り以前に対し, 以後は負荷源としてCODが $3000 \sim 4800 \text{ty}^{-1}$ , 全窒素が $430 \sim 550 \text{ty}^{-1}$ , 全リンが $20 \sim 70 \text{ty}^{-1}$ , それぞれ増加したと推定された。最近, 手塚ら(2012)は, 調整池の底質(0~10 cm)の間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ は諫早湾の底質のそれらと有意な差はなく, また調整池には $\text{NH}_4\text{-N}$ が7.1t,  $\text{PO}_4\text{-P}$ が1.0t蓄積しており, これらはそれぞれ流域負荷量の5日分と4日分に相当することを指摘した。つまり, 調整池にほぼ1年で溜まる $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ が1年間に排出される, ということである。このことは, 潮受け堤防の水門操作が, 調整池が土砂とヘドロで埋まらないように, 年間に溜まる土砂とヘドロと悪水を適当な間隔で諫早湾に排出することを目的に行われていることを端的に物語る。このように, 調整池は $\text{PO}_4\text{-P}$ , DINなどの流域負荷量をほぼそのまま諫早湾と有明海に排出する負荷源に様変わりしたのである。

このような有明海異変と呼ばれる錯綜した現象の因果関係を解明するには, これらの実証的研究の積み上げとともに, 問題の核心に一気に迫る総観的研究も有効と思われる。本研究は, 主に有明海奥部における水質とその支配的要因の一つと考えられる有明海奥部流域の降水量の経年変化と水質および海洋構造の経年変化を比較し,

諫早湾潮受け堤防閉め切りと有明海奥部の水質環境劣化の因果関係を総観的に検証することを目的としたものである。

## 2. 方法と資料

### 2.1 基本的方法論

有明海の水質環境の劣化を代表するのは夏季の貧酸素である。貧酸素の支配的要因の一つは海域の成層の強化と赤潮の発生であり、特に有明海奥部のように閉鎖性が高い海域にあつては成層強度と赤潮発生の支配的要因は淡水とN(チッソ)、P(リン)などの栄養成分の流入である。したがって、地表水流入の源である流域のPr(月間降水量)と海域の成層強度の指標となる $\Delta\sigma$ (海底直上水すなわち海底上1mの海水と海面水の密度差)、水質環境劣化の指標となる海底直上水のDO(溶存酸素濃度)や海水の栄養塩濃度の経年変化には同調関係が現れるはずである。もし、この過程に諫早湾干拓事業のような巨大インパクトが加われば、同調関係はその時点で変更を受けるであろう。このことによって、因果関係の有無が判定できる可能性がある。

有明海奥部の生態系に対する巨大インパクトの第一は、1987年に潮受け堤防建設を着工し、1997年に堤防を閉め切り、約3,500haの干潟・浅海域生態系を喪失せしめた諫早湾干拓事業である(九州農政局、諫早湾干拓事業の概要：<http://www.maff.go.jp/kyusyu/nn/isahaya/outline/outline.html>)。

第二は、1955年から平均128hay<sup>-1</sup>というスピードで干拓し、1968年に干拓堤防を閉め切り、1980年に総面積3,200haで終結した国営佐賀干拓事業(以下、佐賀干拓)である(九州農政局/有明海の干拓<http://www.maff.go.jp/kyusyu/seibibu/kokuei/18/kantaku/index.html#rekishi>)。この事業も広大な干潟の水質浄化力を喪失せしめるとともに、有明海奥部の潮汐振幅と潮流をほぼ10%減少させた(Manda and Matsuoka, 2006)。

第三に、この2つの巨大インパクトの間の時期すなわち1980年代と1990年代における主な出来事は、福岡県の約1,500haに及ぶ炭坑の陥没と諫早干拓事業における1,500haの干拓である(佐々木, 2005d)。炭坑陥没は

浅海域の増加、干拓は浅海域の減少であるから、この時期は有明海奥部の面積の変化が相対的に小さかった安定期ということになる。

したがって、水質環境については1955年から1980年頃までの佐賀干拓による傾向的劣化期、それ以降の平穩期、そして1989年から1997年にかけての諫早湾潮受け堤防建設と閉め切りによる新たな劣化期の3期に大別できる。そして、1972年に始まり今日にいたる浅海定線調査データの $\Delta\sigma$ と水質項目の経年変化には変曲点を1つ持った(同時に多くは極大と極小を一つずつ持った)三次近似曲線が共通のパターンとして現れるはずであり、二つの事業に伴う水質環境劣化の動向と因果関係をこれらの三次近似曲線と流域降水量の三次近似曲線の同調関係を調べることによって確認できる可能性がある。

### 2.2 資料

#### 2.2.1 流域降水量

有明海奥部の流域は佐賀県、熊本県、福岡県、大分県、長崎県にまたがる(Fig. 1)。流域に降った雨あるいは雪による地表水流出の大部分は有明海奥部に注ぐ。一方、流域の河川流量はダム・堰の建設と利水の変化によって地表水流出とは乖離してきている。また、筑後川や中小河川や干拓地の水門の流量を積算するのも容易でない。筑後川でさえ1970年代まで遡る流量データは公表されていない(国土交通省、水文水質データベース：<http://www1.river.go.jp>)。したがって、成層構造や水質の長期的変化との対応関係を調べるには地表水流出の大本である流域降水量を利用する他はない。

有明海奥部の流域で1970年代初頭まで遡って降水量のデータが揃うのは、流域内では佐賀市、日田市、阿蘇山、また流域と一部が重なる県の県都では長崎市、福岡市、大分市、熊本市の7観測所であり、他は1976年までしか遡れない(気象庁/過去の気象データ検索：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)。有明海奥部の流域における地表水流出を代表する地域降水量が存在するのかわ、これらの資料を用いて検討した。

Drainage Basin of the Inner Ariake Sea (IAS)

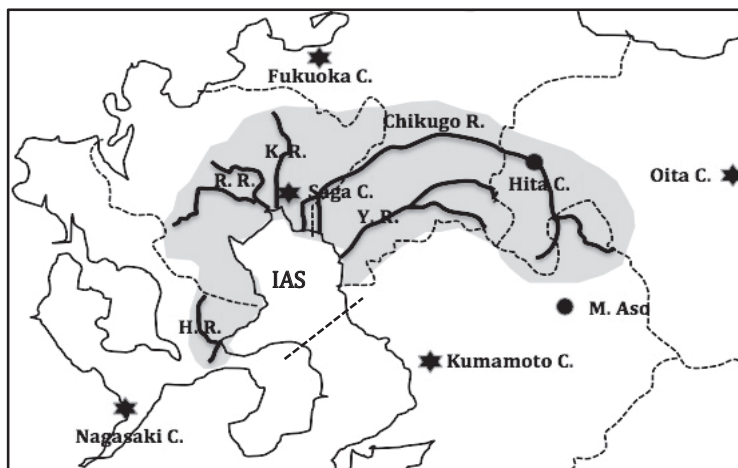


Fig. 1. The drainage basin of the inner Ariake Sea (IAS), the shaded area, with Chikugo River, the biggest, and the other four rivers in it. The dark stars and dots denote the local metro polices and the city as well as the mountain, respectively, where there are official stations for monitoring of precipitation during a long time. The mean flow rate,  $Q$ , in July estimated from  $Pr_7$ ,  $400\text{mm mon}^{-1}$ , drainage basin area,  $A$   $\text{km}^2$ , and runoff coefficient,  $Q/APr=0.7$ , are  $300\text{m}^3\text{sec}^{-1}$  for Chikugo River,  $70\text{m}^3\text{sec}^{-1}$  for Yabe River (Y. R.),  $40\text{m}^3\text{sec}^{-1}$  for Rokkaku River (R. R.),  $30\text{m}^3\text{sec}^{-1}$  for Kase River (K. R.) and  $10\text{m}^3\text{sec}^{-1}$  for Honmyo River (H. R.). The straight broken line indicates the south border of IAS and curved ones do the border of prefectures.

## 2.2.2 水質環境と海洋構造

全国の沿岸海域の  $T$  (水温),  $S$  (塩分),  $DO$ , 各種栄養塩などの水質項目を毎月1回観測する浅海定線調査が1972年4月から国の事業として開始され, 有明海については長崎, 佐賀, 福岡, 熊本の4県が担当し, そのデータセットが公表されている (有明海等環境情報・研究ネットワーク-日本水産資源保護協会: <http://ay.fish-jfrca.jp/ariake/>)。この中で佐賀県のデータセットだけが水深0 m, 5 m, および海底上1 mにおける  $T$ ,  $S$  の他に  $DO$ , 栄養塩濃度などを含み, 1972年4月以降のデータが揃い, しかも Fig. 2 に示されるように観測点が有明海奥部をバランス良く覆っている。したがって, 解析には1973年から2009年までの佐賀県のデータセットを使用した。なお, 佐賀県の調査は大潮の満潮の時間帯に実施されている。

解析項目としては, 水質環境の主な指標である海底直上水 (B-1 m) の溶存酸素濃度すなわち  $DO$  ( $\text{mgL}^{-1}$ ), 成層強度の指標である海底直上水と海面水の密度差すな

わち  $\Delta\sigma$  ( $10^6 \text{kgm}^{-3}$ ), 海域の光合成を担う海面水 (0 m) と海底直上水 (B-1 m) のリン酸態リン濃度すなわち  $PO_4\text{-P}$  ( $\mu\text{molL}^{-1}$ ) および溶存態無機チッソ濃度すなわち  $DIN$  ( $\mu\text{molL}^{-1}$ ) を選択した。 $\Delta\sigma$  は公式 (UNESCO, 1981) を用い,  $T$  と  $S$  から算出した。

## 2.2.3 三次近似曲線

夏季を代表する6, 7, 8月の  $Pr$  と厳しい貧酸素が現れる7, 8月における  $DO$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $PO_4\text{-P}$ ,  $DIN$  の経年変化と同調関係を調べるため, 定点観測データからそれらの月の経年変化と三次近似曲線のグラフを作成した。

## 2.2.4 決定係数 $R^2$

生値の経年変化に対する三次近似曲線の  $R^2$  の値はどれほどか, その値は解析項目や地点によってどのような現れ方をするのかを調べるために,  $R^2$  を計算した。

## 2.2.5 同調関係

夏季の地表水流出をどの地点における何月の  $Pr$  で代



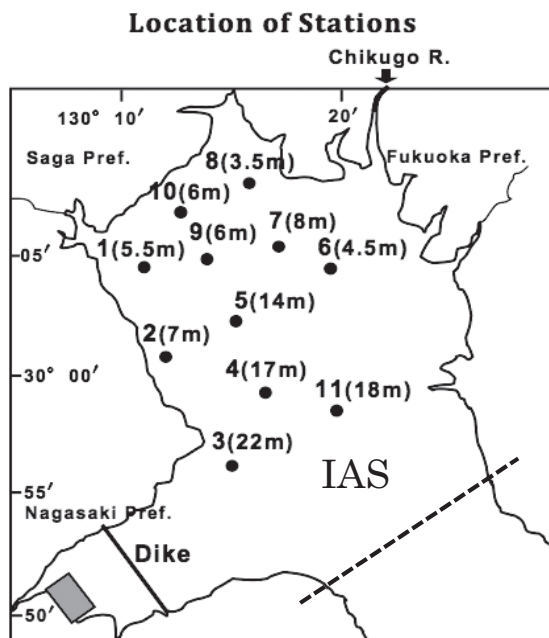


Fig. 2. Location of stations for the monthly observation with station number and depth of the overlying waters at 1m above the bottom (B-1m in parentheses) in the inner Ariake Sea (IAS). The grey rectangular in the innermost of the branch bay at the left bottom, Isahaya Bay, indicates the land reclaimed by drainage with a dike having two floodgates near its northern and southern ends. The dike construction was started in 1989 and the floodgates were closed in 1997.

表させることができるのか、また代表的な Pr と他の項目の同調関係は項目ごと、地点ごとにどのような現れ方を示すのか、さらにこれらの同調関係は諫早干拓事業を契機にどのような変更を受けるのかを調べるため、これらの三次近似曲線を同調させた。

### 2.2.6 同調図の代表性

本文に例示されるのは 1973～2009 年の期間における同調図である。この図の代表性、すなわち、この同調図に示される特徴がどのような期間設定の範囲で現れるのかが、大きな問題である。また、7月だけでなく6月の雨量も関係した場合にこの同調関係が変わるか否かも大きな問題である。これらの問題に関する吟味を行なった。

## 3. 結果

### 3.1 経年変化と三次近似曲線

項目ごと地点ごとのグラフを Figs. 3-7 に示す。生値の経年変化は黒丸付き細線、三次近似曲線は滑らかな太線で示される。

生値の経年変化は全ての項目、月、地点、層において 2～3 年周期の変化（おそらく気象・海洋の南方振動の反映）が顕著であり、傾向的变化を認めることは困難であるが、DO だけが例外であり、逆 N 字パターンの傾向的变化を認めることができる（Fig. 4）。

三次近似曲線には、N 字パターンあるいは逆 N 字パターンが共通して現れる。すなわち、

- ① Pr では、7月の大分市を除く全ての地点において、1980年代初頭に極大、2000年代初頭に極小を示す顕著な N 字パターン（Fig. 3）、
  - ② DO では、7月に諫早湾口周辺（Sts. 3-5, 11）において、また8月には全地点（Sts. 1-11）において、1970年代末に極小、1990年代末に極大を示す顕著な逆 N 字パターン（Fig. 4）、
  - ③  $\Delta\sigma$  では、7月に諫早湾口周辺（Sts. 3-5, 11）から有明海最奥部（Sts. 1, 8-10）において、また8月には諫早湾口周辺（Sts. 3-5, 11）において、DO とは逆に、1970年代末に極大、1990年代末に極小を示す顕著な N 字パターン（Fig. 5）、
  - ④  $PO_4\text{-P}$  では、7月の St. 11 を除く全地点における海面水と海底直上水に、 $\Delta\sigma$  と同じ顕著な N 字パターン、8月には殆ど全ての海面水に DO と同じ顕著な逆 N 字パターン（Fig. 6）、
  - ⑤ DIN では、7月の全地点における海面水と St. 1 を除く地点における海底直上水に  $PO_4\text{-P}$  と同じ顕著な N 字パターン（Fig. 7）、8月の海面水における 1990 年代半ば以降の一貫した減少を共通の特徴とする凸型パターン、
- がそれぞれ認められる。これらのことだけでも、
- a) 有明海奥部における 7, 8 月の海洋構造と水質が、第一義的には流域における 7 月の降水量によって規定されていること、
  - b) 7 月の地表水流出に伴う鉛直安定度の増加と栄養塩

の増加は殆ど7月中に有明海奥部全域に伝播するが、これによるDOの減少は1ヶ月遅れること、  
c) DOと $\Delta\sigma$ では諫早湾起源の影響が7月には有明海奥部の中央部に及んでいること、  
を窺い知るに充分である。

### 3.2 決定係数 $R^2$

計算された決定係数  $R^2$  は Figs. 3-7 のグラフの中に示されている。値のレベルは全般的に低く、殆どが0.002~0.2の値を示し、DOでは0.3~0.4の値が稀に現れるのみである。ただし、興味ある特徴が読み取れる。すなわち、 $R^2$ の値の大小の傾向は、全体として、

- ・項目ごとでは、DO,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , DIN,  $\Delta\sigma$ , Prの順で低下する、
- ・月ごとでは、8月が7月を上回る、
- ・層ごとでは、下層が上層より大きい、
- ・地点ごとでは、諫早湾口部、中央部、最奥部の順で低下する、

という傾向が認められる。要するに、 $R^2$ の大きさは地表水が有明海奥部に流入した地点を基準にした「物質循環の経路における距離あるいは時間」の順となっている。この理由は、

- ①  $\Delta\sigma$ に最も効くのは海面水の塩分、逆にいえば淡水濃度であり、これ自体は物理的に移流・拡散が関与するだけであり、
- ② DINには移流・拡散にプランクトンによる取り込み、沈降、細菌による分解が加わり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ には、DINに関わる素過程の他に、好氣的条件下では懸濁物に結合し、嫌氣的条件下では懸濁物から分離するという、無機的脱着の過程が加わり(城, 1987; 松川, 1990),
- ③ DOでは、①から②の全てが関与した結果として海底直上に到達した有機物と無機物の生物化学的分解が決定要因となるからである。

このように、DOには積分効果が効くので、素過程に含まれる自然のおよび人為的誤差が相殺され、水質項目の中で最も安定した指標となることから、 $R^2$ によって確認できる。

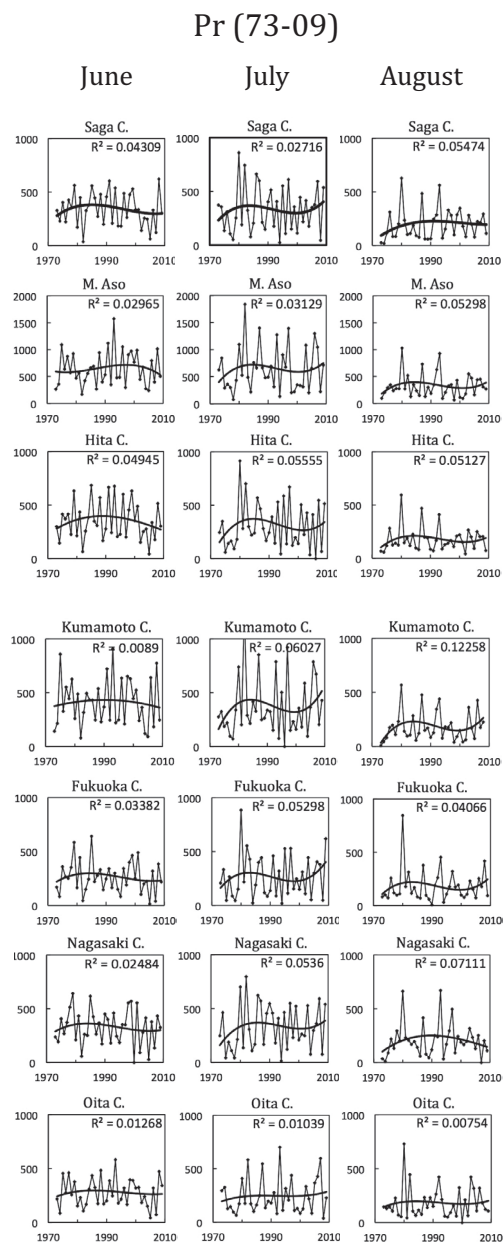


Fig. 3. Year to year changes of precipitation (mm mon<sup>-1</sup>) along with its 3rd approximated curves of June and August since 1973 till 2009 at the main observational stations in the drainage basin (the upper block) and those at the local metropolises of the prefectures (the lower block) the domains of which overlap the drainage basin of the inner Ariake Sea. The Pr<sub>7</sub> is shown in the thick rectangle at the center of the top line. The clear N pattern of the 3rd approximated curves is mostly common in July.

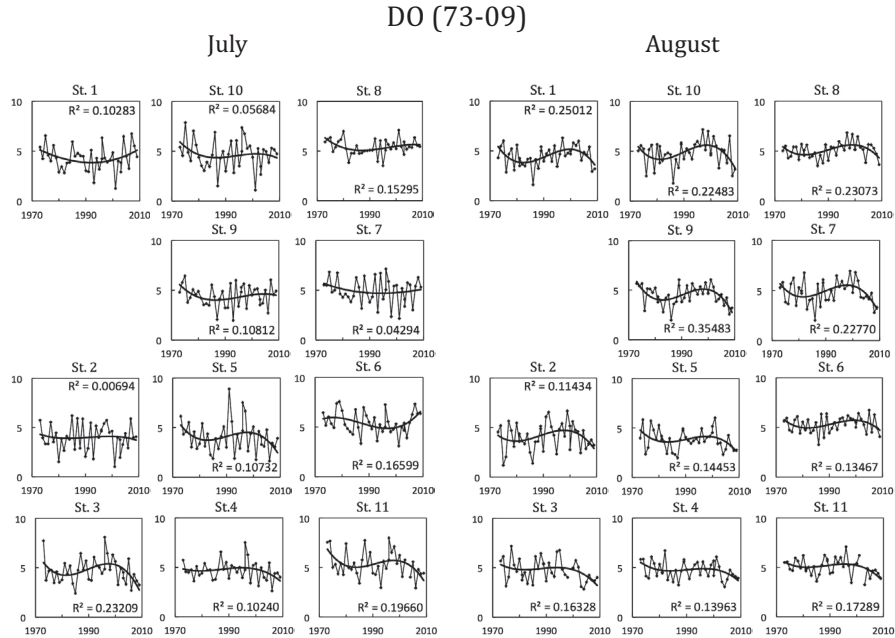


Fig. 4. Year to year changes of DO (mg L<sup>-1</sup>) in the overlying water (B-1m) and its 3rd approximated curves with R<sup>2</sup> at the observational stations in the inner Ariake Sea (see Fig. 2) in July and August since 1973 till 2009. The inversed N patterns with relatively high R<sup>2</sup> appearing dominantly near the mouth of Isahaya Bay in July while wholly in August are noticeable.

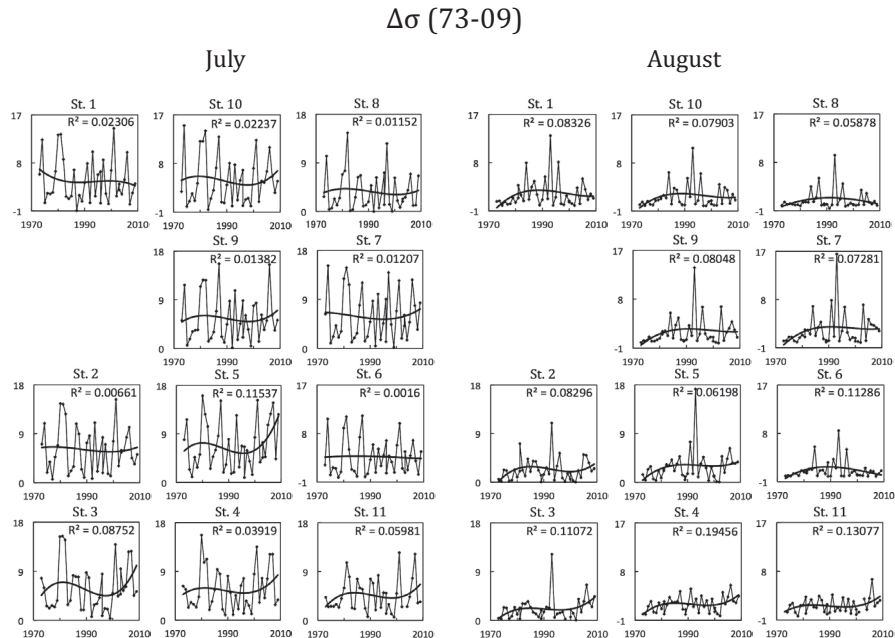
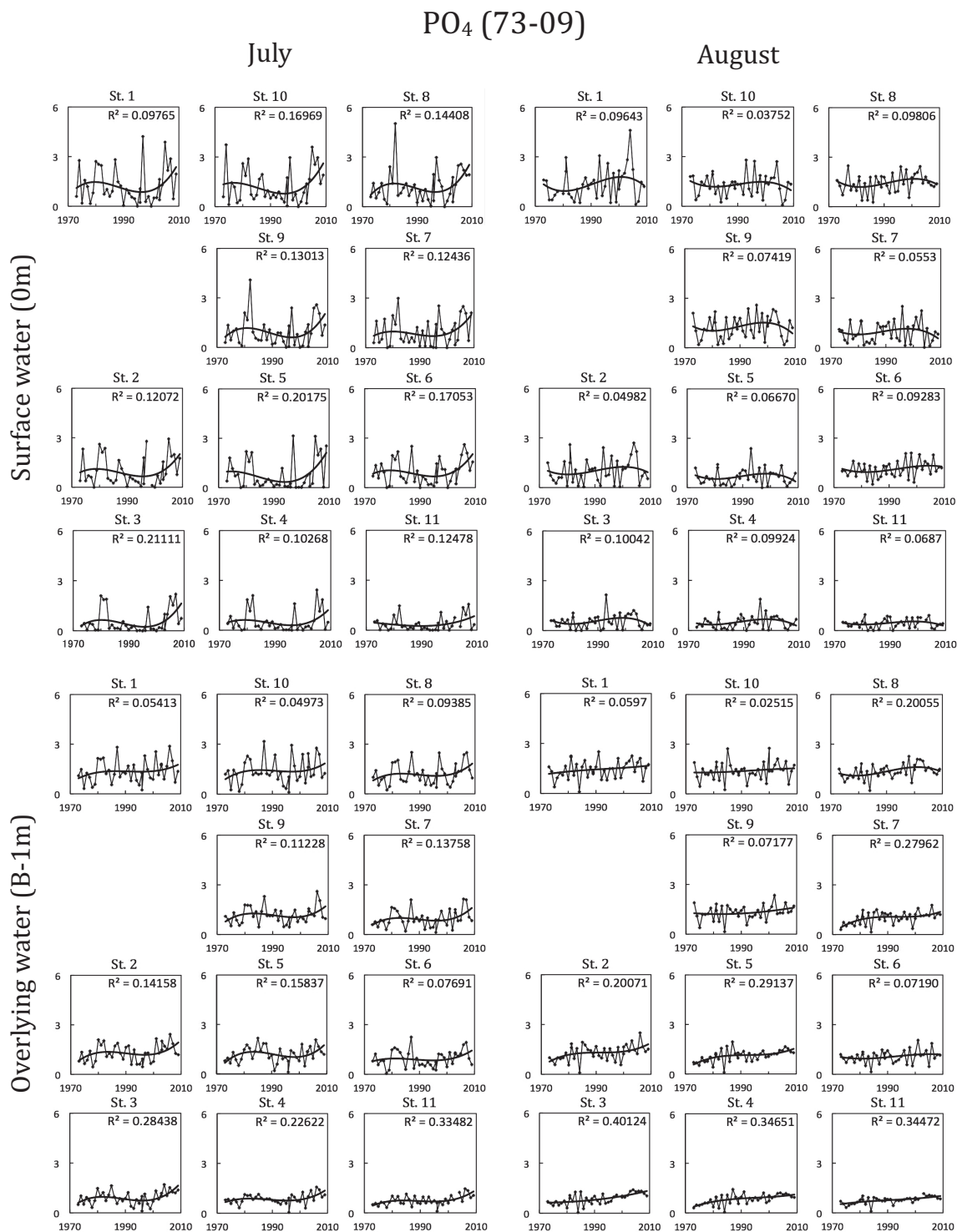


Fig. 5. Year to Year changes of  $\Delta\sigma$ , the difference of  $\sigma = 1000 \times \rho$  (10<sup>6</sup> kg m<sup>-3</sup>) between the surface water (0m) and the overlying water (B-1m), and its 3rd approximated curves with R<sup>2</sup> in July and August since 1973 till 2009 at the observational stations (see Fig. 2). The N pattern appearing near the mouth of Isahaya Bay in August while reaching the inner most of Ariake Sea in July is noticeable.



**Fig. 6.** Year to year changes of PO<sub>4</sub>-P ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) and its 3rd approximated curves with R<sup>2</sup> in July and August since 1973 till 2009 at the observational stations (see Fig. 2). The N pattern appearing almost wholly in the surface and overlying waters in July while the inversed N pattern appearing wholly in the surface waters in August are noticeable.



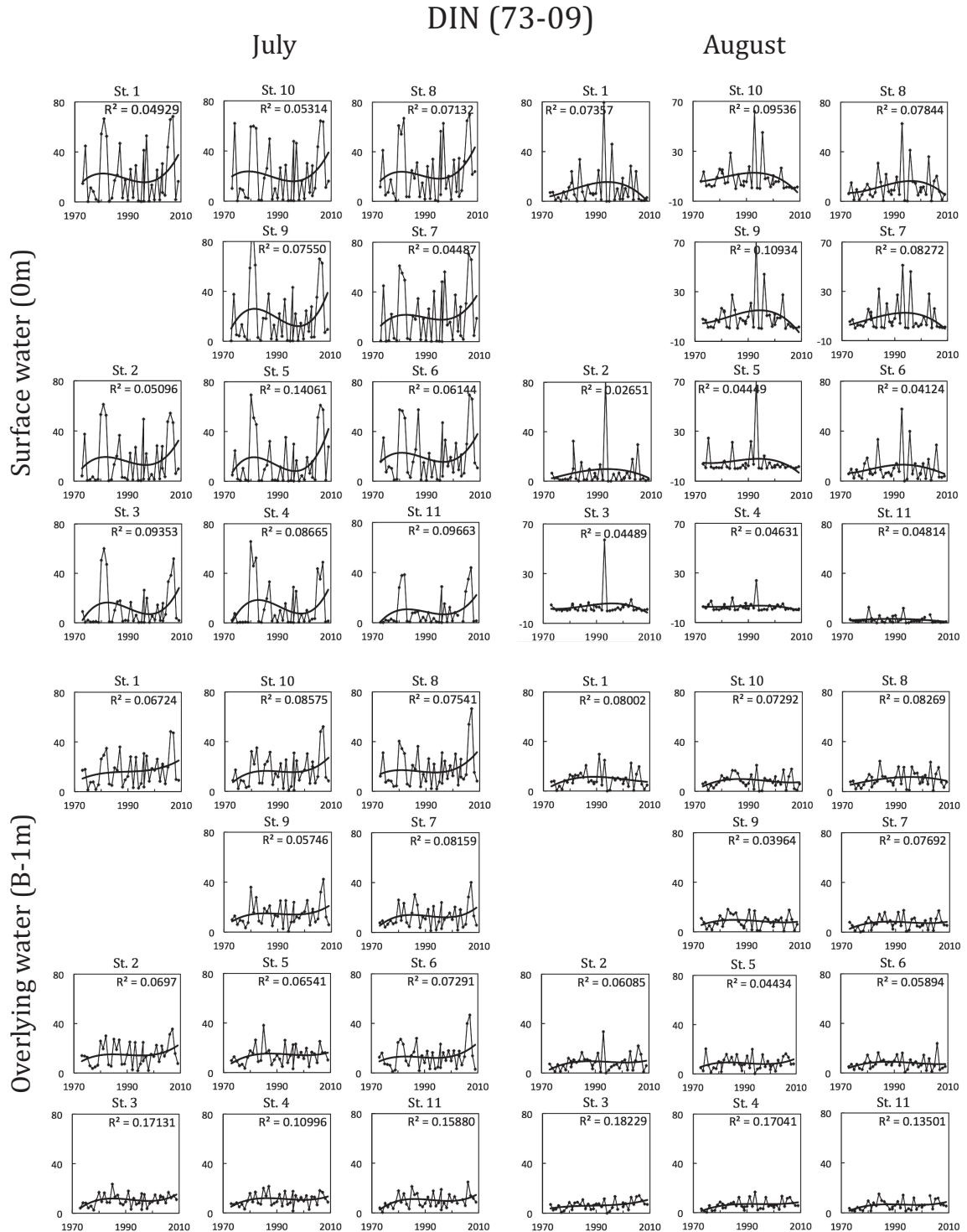


Fig. 7. Year to year changes of DIN ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) and its 3rd approximated curves with  $R^2$  in July and August since 1973 till 2009 at the observational stations (see Fig. 2). The N pattern appearing commonly in the surface and overlying waters in July is noticeable.

3.3 同調関係

佐賀市の7月の降雨量, すなわち Pr7, の三次近似曲線 (赤線) を基準とした同調関係を Figs. 8-12 に示す。その特徴は以下に記述される。なお, DO,  $\Delta\sigma$ , PO<sub>4</sub>-P, DIN のグラフにおいては,

経年変化の三次近似曲線 (黒線) と Pr7 (赤線) の 1980 年以降の同調関係が良好で, しかも近年の傾向的減少あるいは傾向的増加の起点, すなわち DO の極大あるいは  $\Delta\sigma$ , DIN, PO<sub>4</sub>-P の極小の年次, が Pr7 における傾向的増加の起点, すなわち極小 (1999~2000 年) の年次, に先行して同調関係から外れる (黒線が赤線の下を走る, すなわち, Pr7 の効果を上回る) のが明瞭なグラフに灰色,

を配した。灰色を配したのは, 1999~2000 年に先行する時期というのは, 諫早湾干拓事業における潮受け堤防建設基礎工事開始 (1989 年) から潮受け堤防締め切り (1997) の時期に相当し, その時期に同調関係からの外れが始まるということから諫早湾干拓事業の影響を受けていると判断できるからである。

なお, 佐賀干拓による影響が現れる 1980 年代当初までの黒線と赤線の同調関係と諫早干拓事業の影響が現れる 1990 年以降の黒線と赤線の同調関係は相互に独立した事象と考えられる。したがって, グラフの灰色の判定の基準に 1980 年代当初以前における同調の如何を加える必要はなく, グラフが灰色かどうかは専ら 1990 年以降における黒線と赤線の同調関係から判断した。

同調図における水質と  $\Delta\sigma$  の目盛レンジは, それらの三次近似曲線における 1980~1990 年代の線分を Pr7 の三次近似曲線における同年代の線分に重ね合わせる際に殆ど自動的に定まる。

また, これらのグラフでは Pr,  $\Delta\sigma$ , PO<sub>4</sub>-P, DIN の動向を DO の動向に合わせる必要があり, 必要に応じてそれらの軸を反転してある。実際の数値は, 多くが 1980 年代初頭に極大, ほぼ 1995~2000 年に極小となっている。

3.3.1 降水量 : Pr

佐賀市における 7 月の降水量すなわち Pr7 (赤線) に対する同調関係 (Fig. 8) は, 7 月の降水量では, 佐賀平

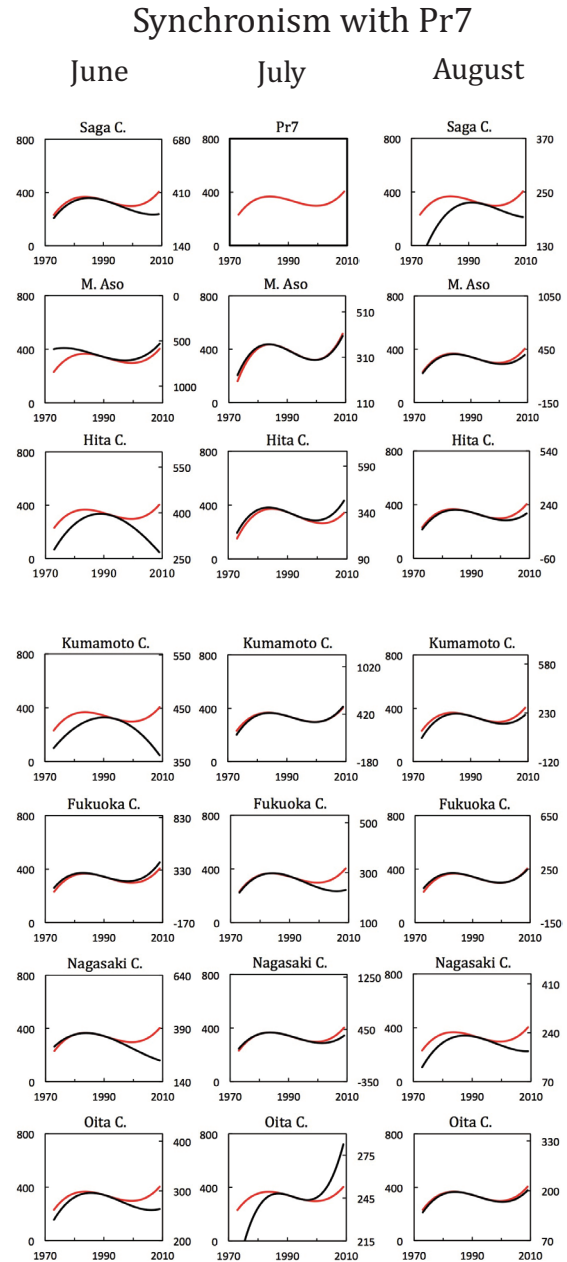


Fig. 8. Synchronism of the 3rd approximated curve of Pr7 (mm mon<sup>-1</sup>) at Saga City in July (the red curve) with the 3rd approximated curves of Pr (mm mon<sup>-1</sup>) at Saga City itself and the other cities as well as the mountain in June, July and August (black curves), since 1973 till 2009. Good synchronism among the Prs in July at Saga C., M. Aso and Kumamoto C., the areas represented by which occupy the most part of drainage basin (see Fig. 1), is noticeable.

野と並んで有明海奥部流域の大きな部分を占める阿蘇山と流域の一部を占める熊本市の降水量が顕著な同調関係を示す。一方、流域の一部が重なる他の県の県都における降水量は1980年以前と2000年以降で同調から外れる。このことは、これらの県都は地理的にも有明海奥部流域から遠く、それらにおける降水量は有明海奥部流域を全面的に代表するものではない、ということの意味する。流域内の日田市のPr7も2000年以降で同調から外れる。ただし、日田市が代表する流域の占める割合は大きくない。また、佐賀市のPr7に対する6月と8月の降水量の同調関係は、佐賀市自体を含め、いずれも良くない。

これらのことから、有明海流域の7月の降水量を佐賀市のPr7で代表させることは妥当、と判断される。

### 3.3.2 海底直上水の溶存酸素：DO

諫早干拓の影響を受けていると判断される灰色のグラフが、7月は諫早湾口周辺 (Sts. 3-5, 11) に限られていたのが、8月には有明海最奥部まで拡大 (Sts. 2-5, 11 and 7, 9) している (Fig. 9)。また、特に8月には、同調から外れた程度が諫早湾口に近ほど大きい。これらのことは、

- ① 近年における貧酸素の進行は基本的には流域における降水量の増加に起因するが、
  - ② 諫早湾に起源を持つ貧酸素の進行がそれに加わっていること、
- を強く示唆する。

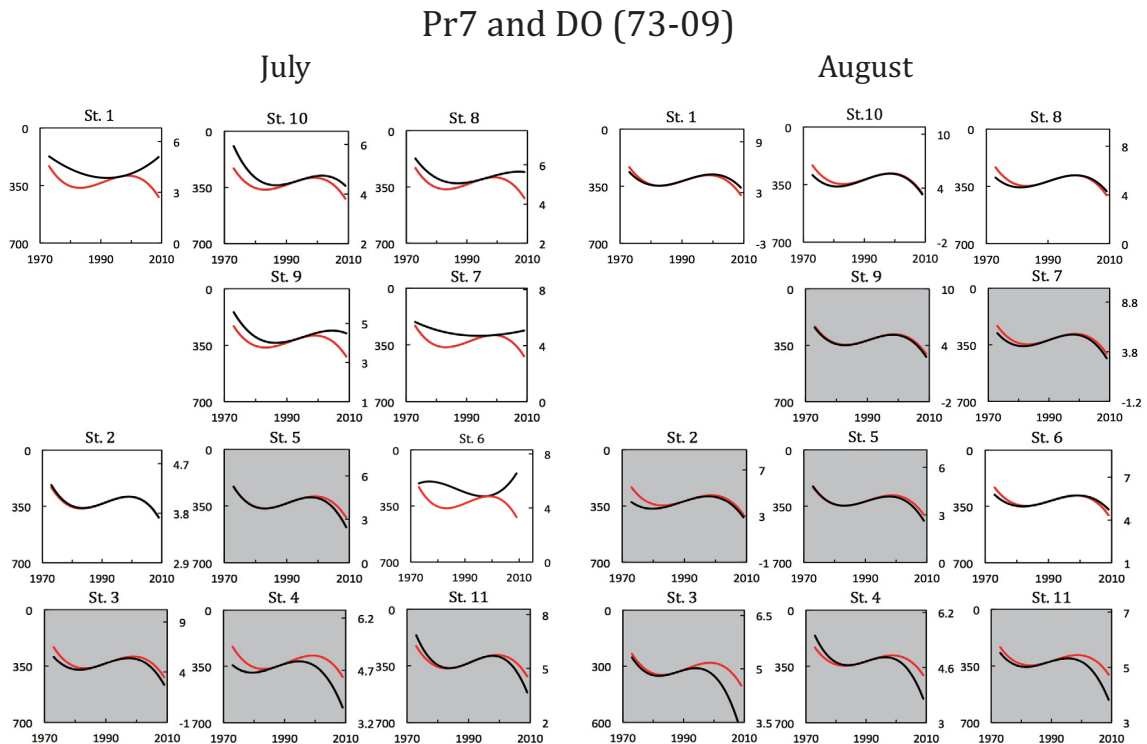


Fig. 9. Synchronism of the 3rd approximated curve of Pr7 ( $\text{mm mon}^{-1}$ ) at Saga City in July (the red curve) with the 3rd approximated curves of DO ( $\text{mg L}^{-1}$ ) in July and August (black curves) since 1973 till 2009 at the observational stations (see Fig. 2). The grey-colored graphs indicate the clear degradation of oxygen deficiency starting before a period of the minimum of Pr7 at the end of 1990s. The grey-colored appearing near the mouth of Isahaya Bay in June while dominantly in August are noticeable.

3.3.3 海底直上水と海面水の密度差： $\Delta\sigma$

灰色のグラフが、DO の場合とは逆に、7月に諫早湾口 (Sts. 3, 4, 11) から中央部 (St. 5) を経て最奥部 (Sts. 7, 9, 10) まで及んでいたのが、8月には諫早湾口部 (Sts. 3, 4, 11) に限定される (Fig. 10)。これらのことは、

- ① 近年における  $\Delta\sigma$  の増加は基本的に Pr7 の増加に起源があるが、
  - ② 諫早湾にも起源があること、
  - ③ 諫早湾に起源のある貧酸素の進行の要因は、諫早湾に起源のある  $\Delta\sigma$  の増加、すなわち海面から海底への DO 輸送の阻害だけではなく、おそらく諫早湾に起源のある有機懸濁物の増加、すなわち海底直上における酸素消費の増加でもあること、
- を強く示唆する。

3.3.4 リン酸態リン：PO<sub>4</sub>-P

灰色のグラフの現れ方の特徴は、

- ・ 7月には、灰色のグラフが St. 11 の海面水を除いた全ての地点の海面水と海底直上水に現れ、PO<sub>4</sub>-P が Pr7 の効果を上回って年々増加しつつあること、
  - ・ 8月には、殆ど灰色のグラフは現れないが、海面水では DO と同様な逆 N 字パターンが支配的で、7月とは逆に PO<sub>4</sub>-P は年々減少しつつあること、
  - ・ 8月の海底直上水では (海面水に対する PO<sub>4</sub>-P の値は上下が反転していることに注意)、St. 6 と St. 8 を除いて、一貫した経年的増加が支配的となること、
- である (Fig. 11)。これらのことは、
- ① 7月における PO<sub>4</sub>-P の近年の増加は基本的には7月の降水量 Pr7 の増加に起因するが、諫早湾にも起源

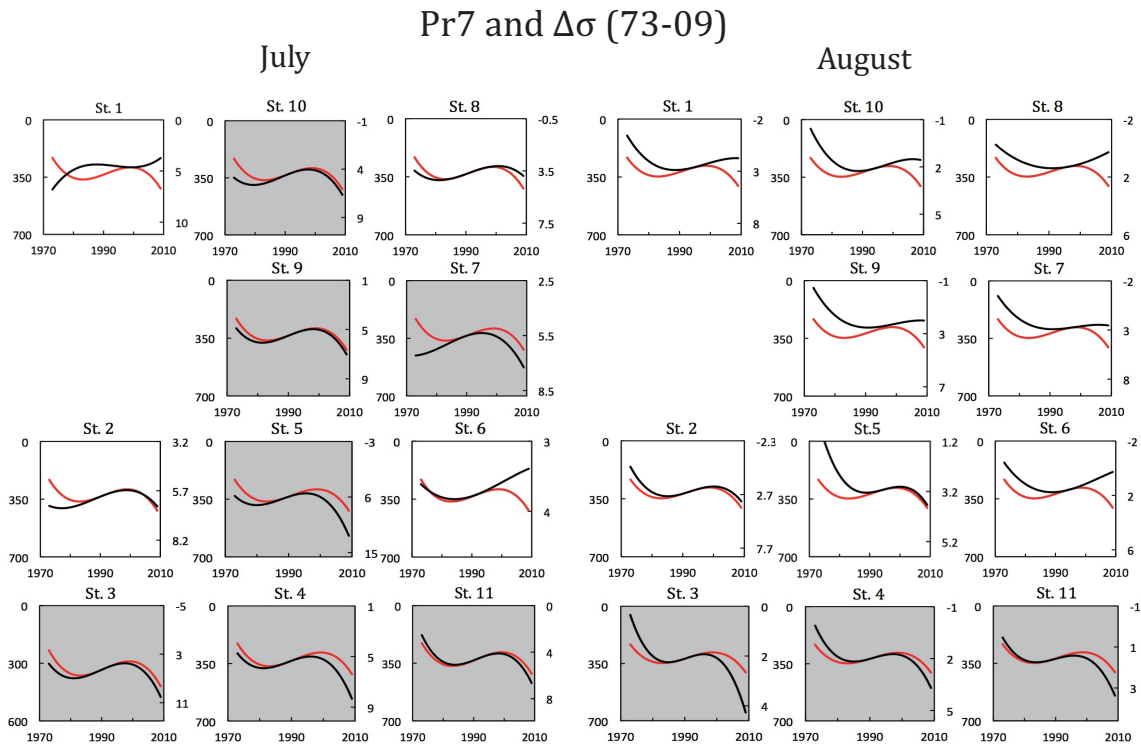


Fig. 10. Synchronism of the 3rd approximated curve of Pr7 (mm mon<sup>-1</sup>) at Saga City in July (the red curve) with the 3rd approximated curves of  $\Delta\sigma$  (10<sup>6</sup> kg m<sup>-3</sup>) in July and August (black curves) since 1973 till 2009 at the observational stations (see Fig. 2). The grey-colored graphs indicate the clear increase of  $\Delta\sigma$  starting before a period of the minimum of Pr7 at the lasts of 1990s. The grey-colored appearing only near the mouth of Isahaya Bay in August while dominantly in July are noticeable.



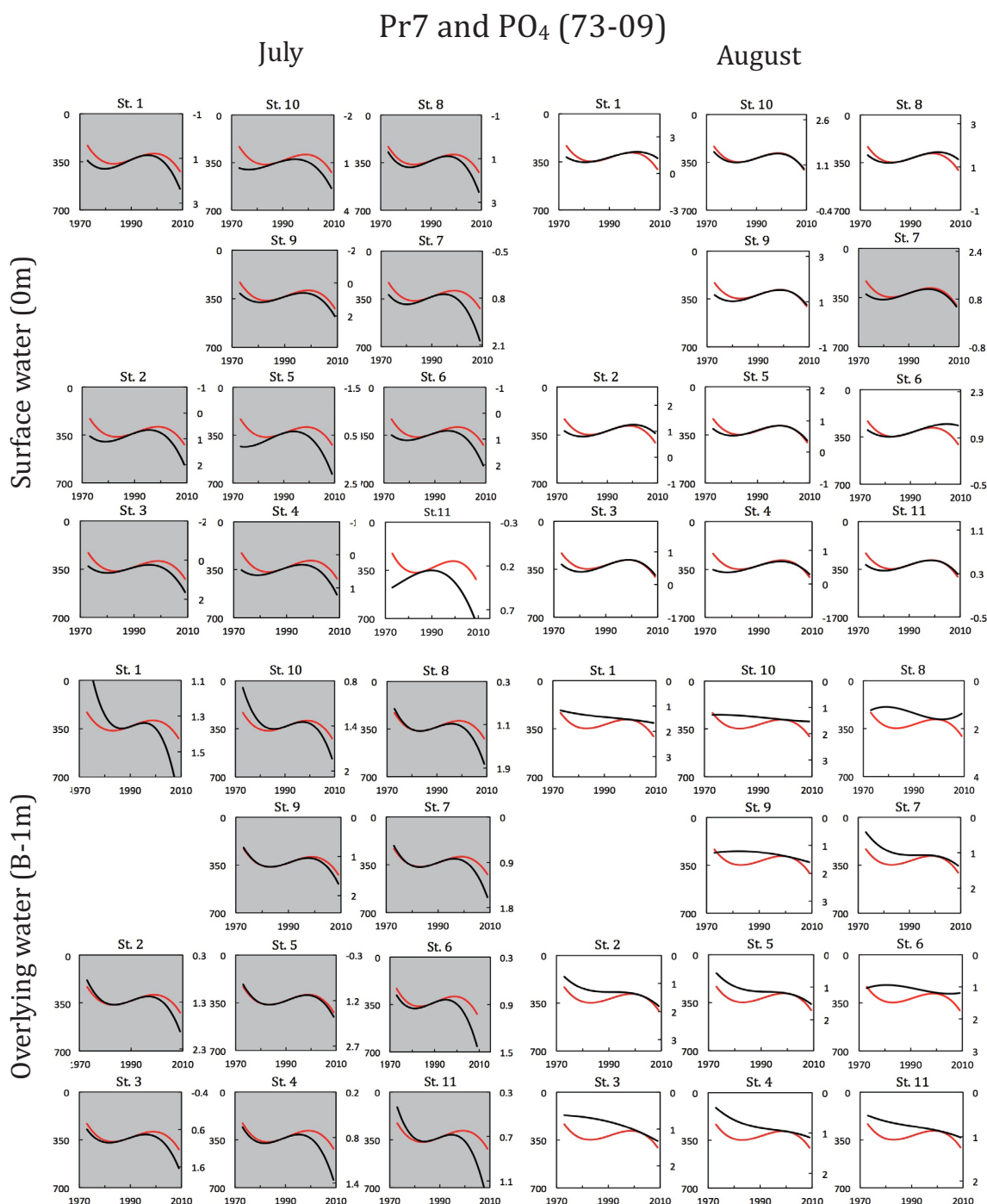


Fig. 11. Synchronism of the 3rd approximated curve of Pr7 (mm mon<sup>-1</sup>) at Saga City in July (the red curve) with the 3rd approximated curves of PO<sub>4</sub>-P (μmol L<sup>-1</sup>) in the surface waters (upper block) and the overlying waters (lower block) at the observational stations (Fig. 2) in July and August (black curves) since 1973 till 2009. The grey-colored graphs indicate the clear increase of PO<sub>4</sub>-P in July starting before a period of the minimum of Pr7 at the lasts of 1990s. The grey-colored appearing almost wholly in the surface and overlying waters in July are noticeable.

があること、

- ② 諫早湾起源の  $\text{PO}_4\text{-P}$  の増加は、潮流や吹送流に伴う拡散に、海水のエスチャリー循環による輸送が加わり、速やかに有明海奥部全域に及ぶこと、
- ③ 諫早干拓事業以降、7月の海面における  $\text{PO}_4\text{-P}$  は年々増加し、逆に8月の海面水における  $\text{PO}_4\text{-P}$  は年々減少し、その差は拡大しつつあること、この差の相当部分は7月から8月にかけての光合成による消費すなわち赤潮であり、その効率が年々上がりつつあること、これらの赤潮の枯死あるいは糞粒化および無機的吸着によって海面水の  $\text{PO}_4\text{-P}$  は効率よく沈降するため、8月の海面水では  $\text{PO}_4\text{-P}$  の枯渇が進行しつつあること、
- ④ 8月の海底直上水 (Sts. 6, 8 を除く) における  $\text{PO}_4\text{-P}$  の経年的増加は、7月に光合成と無機的吸着によって海底に堆積した  $\text{PO}_4\text{-P}$  の積み残しが年々増えていること、あるいは  $\text{PO}_4\text{-P}$  の無機的溶脱を促す8月の貧酸素が年々悪化していること (Fig. 4 の8月の全ての地点 (Sts. 1-11) において近年の DO の三次近似曲線の勾配は負である)、あるいはその両方が起こっていること、

を強く示唆する。

### 3.3.5 溶存無機態チッソ : DIN

灰色のグラフの現れ方の特徴は、

- ・ 7月には、St. 1の直上水を除けば、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の場合と同じく、海面水と海底直上水の全地点に及び、DIN が Pr7 の効果を上回って年々増加しつつあること、
- ・ 8月の海面水においては、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の場合と異なり、有明海最奥部から諫早湾口に至る湾軸に添う地点 (Sts. 8, 9, 5, 4 および 3) に灰色が現れるが、その他の地点も含めた全地点において、DIN が年々減少しつつあること、
- ・ 8月の直上水においては (海面水に対する DIN の値は上下が反転していることに注意)、近年、赤線と黒線との差が有明海最奥部に近づくほど大きくなっており、すなわち、実際の濃度が地表水流出の増加に伴って増加するはずの濃度を下回る度合いが大きくなっており、近年における8月の貧酸素が諫早湾口付近 (Sts. 3, 4, 11) から有明海最奥部 (Sts. 1, 8, 10)

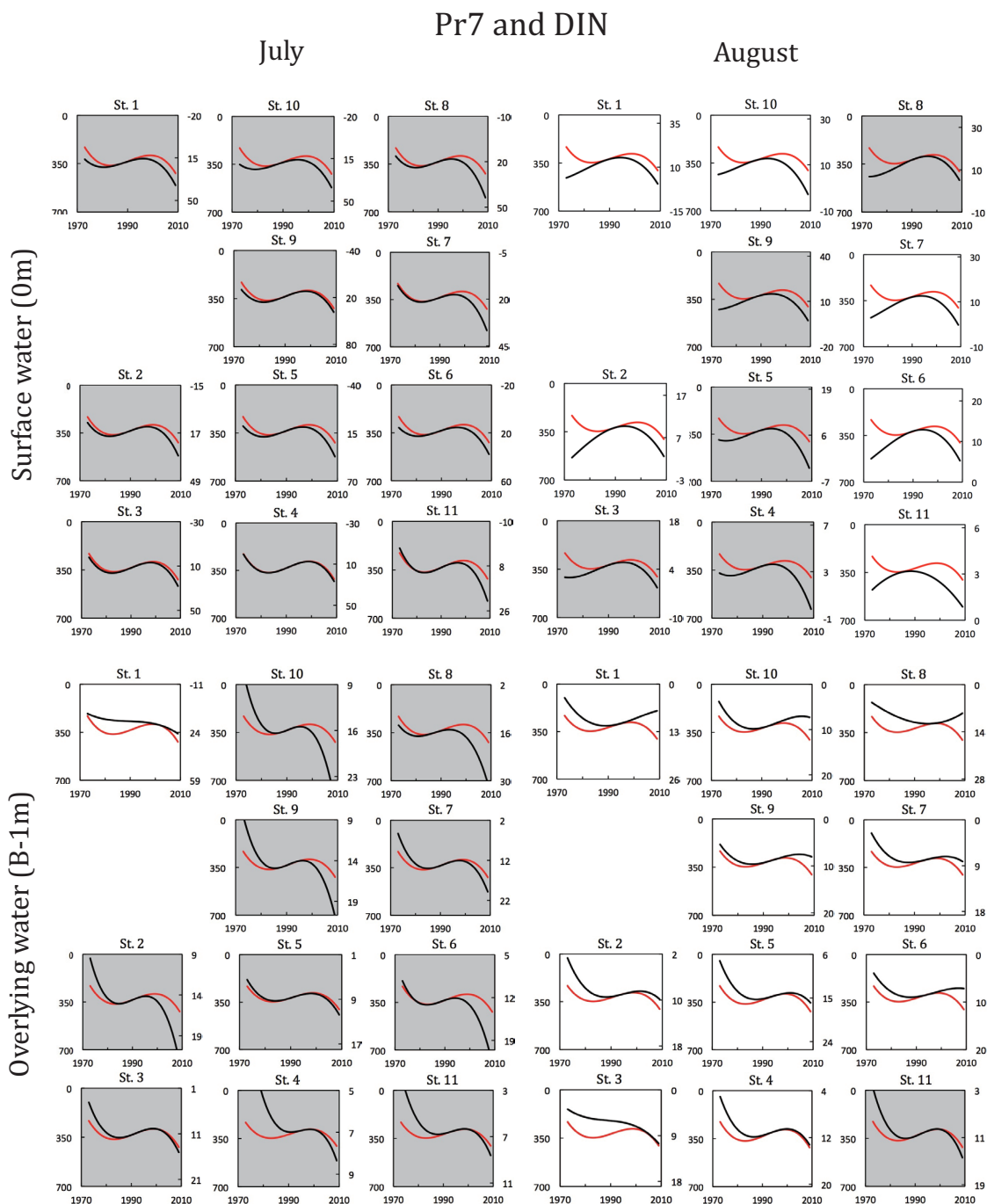
に近づくほど酷くなる (Fig. 4) のに符合していること、

である (Fig. 12)。これらのことは、

- ① 7月における最近の全般的な DIN の増加は、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の場合と同じく、基本的には流域降水量の増加に起因するが、諫早湾にも起源があること、
  - ②  $\text{PO}_4\text{-P}$  と異なって DIN には懸濁物に対する顕著な無機的脱着はないが、潮流や吹送流に伴う拡散や、光合成による懸濁物化と沈降、および分解と溶出に海水のエスチャリー循環が加わって、諫早湾起源の DIN の増加は速やかに有明海奥部全域に及ぶこと、
  - ③  $\text{PO}_4\text{-P}$  の場合と同様に、諫早湾干拓事業以降、7月の海面における DIN は年々増加し、逆に8月の海面水における DIN は年々減少し、その差は拡大しつつあること、この差の相当部分は7月から8月にかけての光合成による消費すなわち赤潮であり、その効率が年々上がりつつあること、これらの赤潮の枯死あるいは糞粒化によって海面水の DIN は効率よく沈降するため、8月の海面水では DIN の枯渇が進行しつつあること、
  - ④ 8月の直上水においては、諫早干拓に伴う貧酸素により、前項に記述した  $\text{PO}_4\text{-P}$  の溶脱による増加とともに、DIN の脱窒による消費も進んでいること、
- を強く示唆する。

なお、Fig. 12 の8月の海面水に現れた灰色のグラフが Fig. 11 に現れない理由は次の通りである。すなわち、

- a) 7月の出水時においては大量の DIN の流入があり、光合成はリン制限となるが、8月の  $\text{PO}_4\text{-P}$  は Redfield 比を上回り、DIN に対して常に充分にある (Fig. 13)。したがって、7月の海面水の DIN を主に構成する有明海奥部流域起源の DIN と諫早湾起源の DIN は全て7月から8月にかけて光合成で利用され、両者の寄与が明瞭に現れることになる。
- b) 一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$  は陸起源の他に、通常の上層水 (海面水を含む) と下層水 (海底直上水を含む)、とりわけ下層水に、Redfield 比を上回って過剰に存在する (Fig. 13)。したがって、7月から8月の光合成に寄与するのは、諫早湾起源と有明海奥部流域起源の供給の他に、上層に過剰に存在していた  $\text{PO}_4\text{-P}$  による供給や、鉛直拡散やエスチャリー循環に伴う湧昇に



**Fig. 12.** Synchronism of the 3rd approximated curve of Pr7 ( $\text{mm mon}^{-1}$ ) at Saga City in July (the red curve) with the 3rd approximated curves of DIN ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) in the surface waters (upper block) and the overlying waters (lower block) at the observational stations (Fig. 2) in July and August (black curves) since 1973 till 2009. The grey-colored graphs indicate the clear increase of DIN in July while the clear decrease of DIN in August both starting before a period of the minimum of Pr7 at the lasts of 1990s. The grey-colored appearing almost wholly in the surface and overlying waters in July while mainly in the surface water in August are noticeable.

よる下層からの物理的供給, さらには渦鞭毛藻類 (Watanabe *et al.*, 1991; Amano *et al.*, 1998; 田中・小田切, 2010) や珪藻類のリゾソレニア・マット (Shipeet *et al.*, 1999; Villarealet *et al.*, 1999) の鉛直移動による生物的供給の総和となる。これらの多様な供給によって諫早湾起源の供給が覆い隠されてしまうと考えられる。

### 3.4 期間 1973-2009 に現れた同調関係の代表性

本文が採用した期間 1973-2009 が示す同調関係は他の多くの期間を広く代表していることが判明した。

#### 3.4.1 全期間 1993 ~ 2011 における同調関係の現れ方

本文が採用した期間すなわち 1973-2009 の代表性を吟味するため, 地理的に有明海奥部の中央海域を代表す

ると思われる St. 5 (Fig. 2) に着目し, 諫早湾起源の影響が現れ易い 8 月の DO (以下, DO8) と 7 月の  $\Delta\sigma$  (以下,  $\Delta\sigma 7$ ) に対する 7 月の佐賀市における降雨量 (以下, Pr7) の同調関係を示した全期間のグラフには, 諫早湾起源の影響が及んでいると判定される灰色のグラフが広範に現れた (Fig. 14a and b)。

また, St. 5 の代表性を知るために, 期間全体の中核部分を代表すると思われる黒太実線枠の 5 期間すなわち 1973-2006, 1973-2009 (本文で採用), 1978-2006, 1978-2009, 1975-2007 と, 周辺部分を代表すると思われる黒太点線枠の 4 期間すなわち 1973-2003, 1973-2011, 1978-2004, 1978-2011 について, DO8 と  $\Delta\sigma 7$  の全観測地点すなわち Sts. 1-11 における灰色のグラフの現れ方を見ると, この 9 期間では, 白色グラフの領域と隣り合わせの期間である 1978-2009 を除いた全期間において, St. 5 に灰色のグラフが現れた場合には全て, 灰色のグラフが有明海最奥部を代表する St. 9 や St. 10 にまで及んでおり, 逆もまた真なりとなっている (Figs. 15a-h and 16a-h)。つまり, St. 5 は有明海奥部中央海域だけでなく, 有明海最奥部海域をも代表している。

このことから, 諫早湾起源の影響が St. 5 (すなわち有明海奥部中央海域および有明海最奥部) に及んでいると判定される灰色のグラフの数は,

DO8 は 42 期間 (Fig. 14a),

$\Delta\sigma 7$  は 51 期間 (Fig. 14b で 1978-2009 を除く),

PO<sub>4</sub>07 (7 月の海面水の PO<sub>4</sub>-P) は 26 期間 (図は省略),

PO<sub>4</sub>B7 (7 月の直上水の PO<sub>4</sub>-P) は 47 期間 (同上),

DIN07 (7 月の海面水の DIN) は 36 期間 (同上),

DINB7 (7 月の直上水の DIN) は 24 期間 (同上),

の前後と推定される。したがって, 本文が採用した期間すなわち 1973-2009 はこれらに近い数の期間を代表しており, その代表性は十分に高いと判定できる。

DO8 と  $\Delta\sigma 7$  において灰色のグラフがこれほど広範にあらわれることは, 諫早湾干拓事業の影響が有明海奥部中央海域から最奥部まで及ぶことが少なくないことを強く示唆する。この結果は, 諫早湾干拓事業の影響は諫早湾内と諫早湾口周辺に限られるという大方のコンピュータ・シミュレーションの結果と一致しない。

PO<sub>4</sub>B7 と DIN07 における灰色のグラフの数が PO<sub>4</sub>07

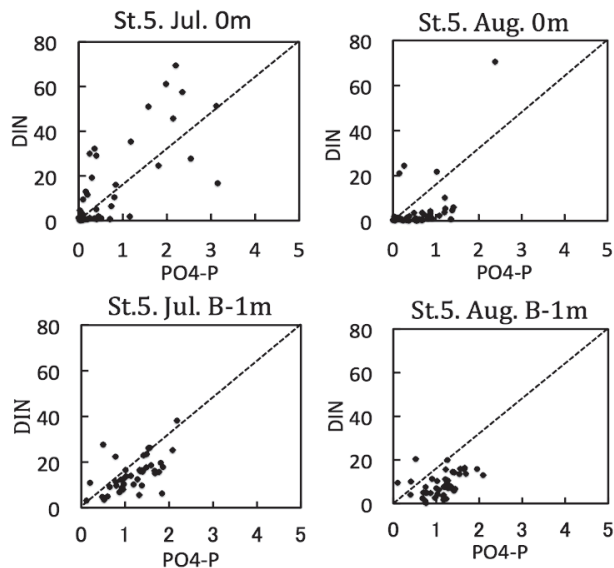


Fig. 13. Plots of PO<sub>4</sub>-P ( $\mu\text{molL}^{-1}$ ) and DIN ( $\mu\text{molL}^{-1}$ ) of the surface waters (0 m) and the overlying waters (B-1 m) in July and August since 1972 till 2009 at St. 5, which represents the central part of the inner Ariake Sea (see Fig. 2). The oblique lines indicate DIN/PO<sub>4</sub>-P=16, the Redfield ratio. Excess of DIN against PO<sub>4</sub>-P occurring in the surface waters in July probably due to occasional big runoffs while inverse in August is noticeable.



Periods of the grey-colored graph at St. 5

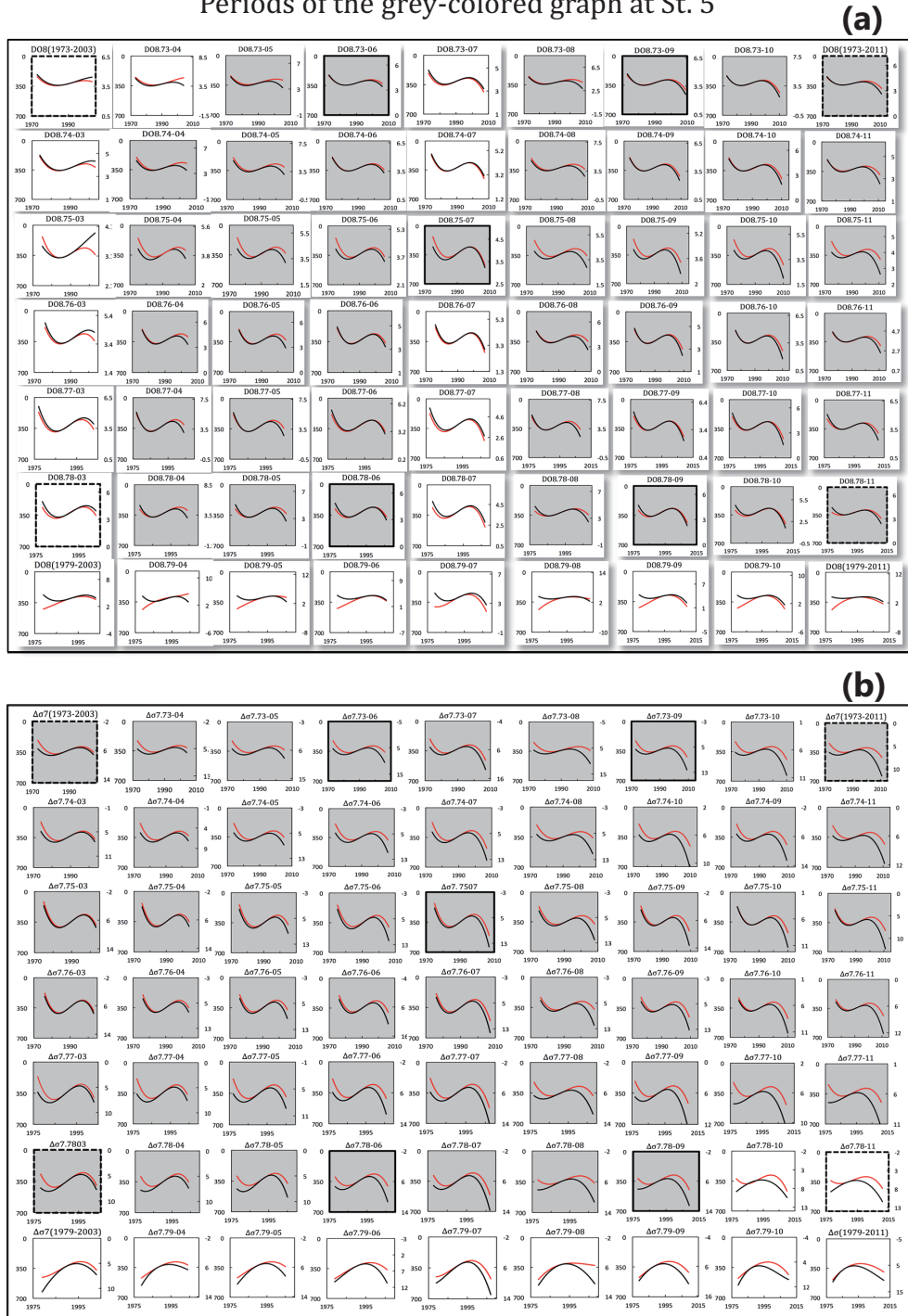


Fig. 14. Synchronism of DO8, DO in August, (a) and  $\Delta\sigma 7$ ,  $\Delta\sigma$  in July, (b) at St. 5 in the inner Ariake Sea with Pr7 in the 63 periods from 1973-2003 to 1979-2011. Grey-colored graphs indicate decrease of DO8 and increase of  $\Delta\sigma 7$  caused by the development of the Isahaya Bay. The five thick solid graphs including the period, 1993-2009, treated in this paper may be considered as samples for the main part while the four thick dotted ones are for the border part.

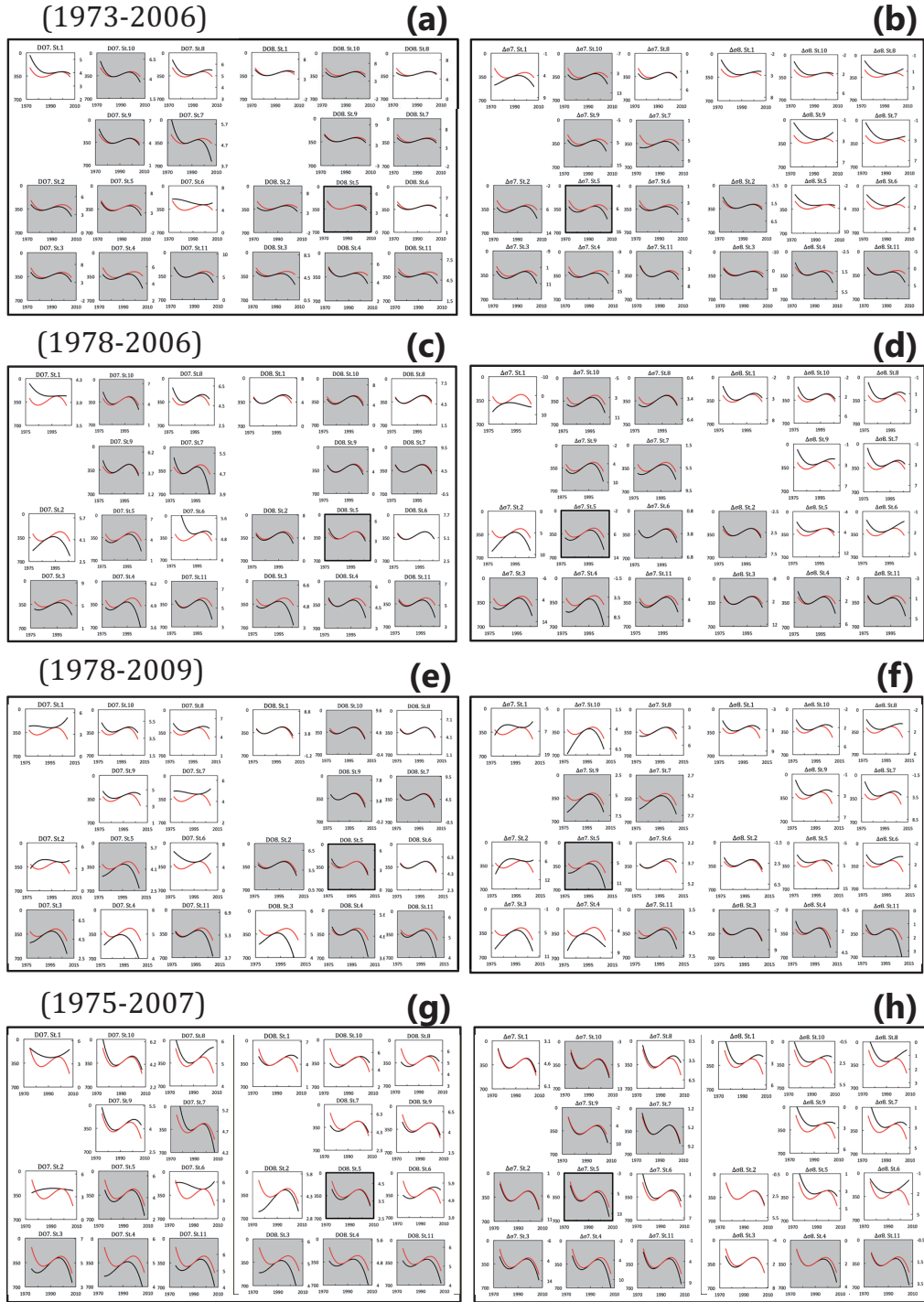


Fig. 15. The graphs of DO8 (a) and  $\Delta\sigma_7$  (b) at the whole observational stations sampled for the main part (see Fig. 14). The left 11 blocks in Fig. 14a and b indicate graphs in July while the right ones do in August. Grey-colored graphs appear also in the inner most area of the inner Ariake Sea, Sts. 9, 7 and 1, 10, 8, when grey-colored graphs do at St. 5, the thick solid ones in a and b, and *vice versa* except only DO8 in the period, 1975-2007.

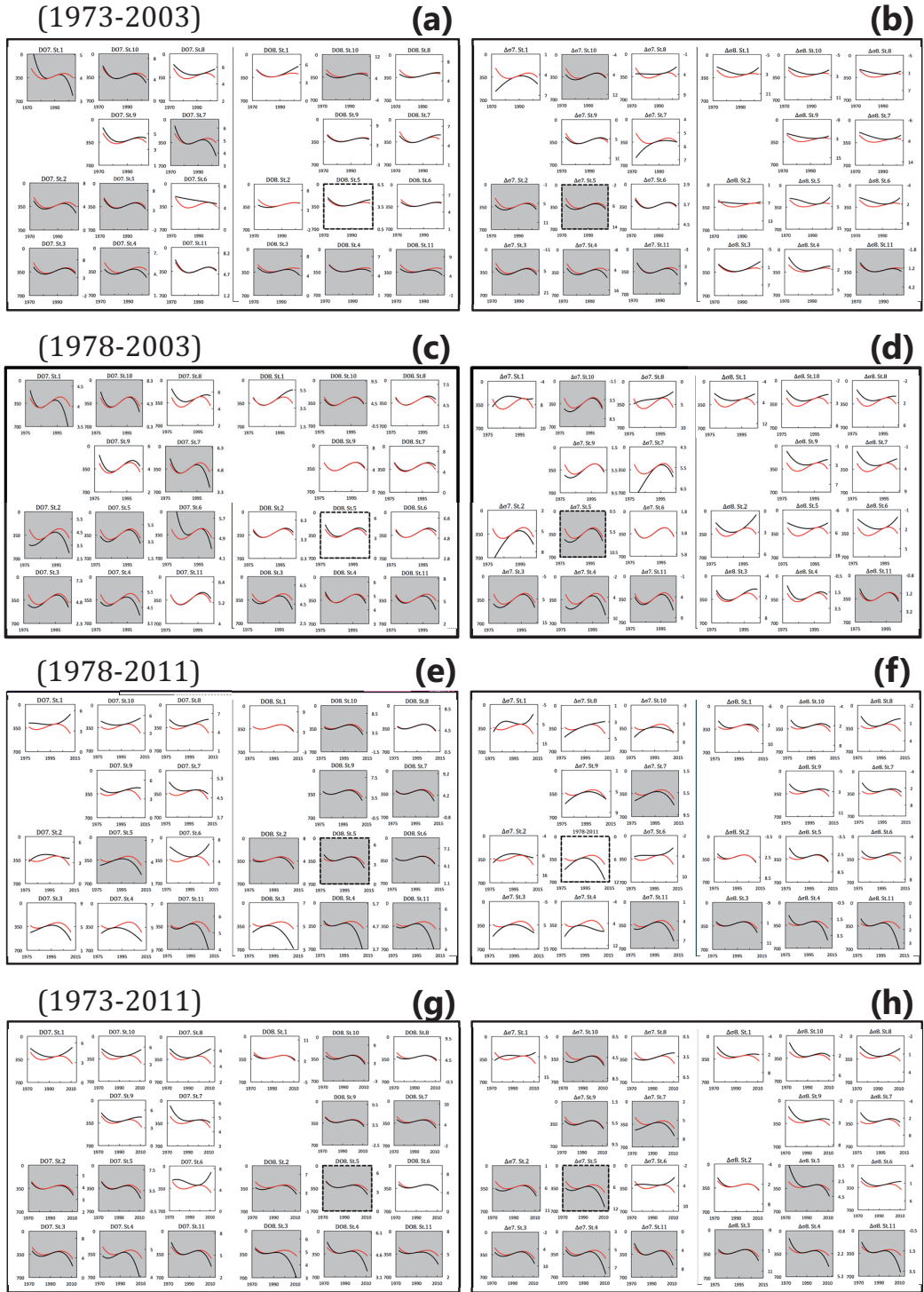


Fig. 16. The graphs of DO8 (a) and  $\Delta\sigma 7$  (b) at the whole observational stations sampled for the border part (see Fig. 14). The left 11 blocks in Fig. 16a and b indicate graphs in July while the right ones do in August. Gray-coloured graphs appear also in the inner most area of the inner Ariake Sea, Sts. 9, 7 and 1, 10, 8, when gray-coloured graphs do at St. 5, the thick dotted ones in Fig. 16a and b, and *vice versa*.

と DINB7 におけるそれを大きく上回っている。このことは、諫早湾を起源とする影響が  $PO_4\text{-P}$  においては下層を、DIN においては上層を通じて有明海奥部海域の中央部から最奥部に波及することを示す。諫早湾起源の  $PO_4\text{-P}$  は無機的脱着によっても容易に上層から下層に沈降し、有明海奥部のエスチャリー循環に乗って最奥部に速やかに波及できる。また、無機的脱着の能力を有しない DIN は上層に長く留まるが、成層が強まる 7 月には海面の風に対する海水の応答と数日周期の気象擾乱による拡散も増大し、これらにもともと大きな潮汐拡散も加わって、諫早湾起源の DIN も速やかに有明海最奥部に波及できる、ということが示唆される。

#### 3.4.2 7 および 8 月の水質環境に 6 月の佐賀市の雨量も関係するとした場合の同調関係の現れ方

Fig. 8 の最上段左のグラフに示されるように、佐賀市における 6 月の雨量の極小年次は 7 月のそれよりも遙かに遅れる。したがって、7 月の雨量に 6 月の雨量を加えた雨量の極小年次は 7 月の雨量のそれよりも遅れ、DO の極大年次、および  $\Delta\sigma$ 、 $PO_4\text{-P}$ 、DIN の極小年次に対する遅れが拡大する。この結果、灰色のグラフの数は増え、諫早湾干拓事業の影響は一層顕著に現れることになる。

## 4. 考察および結論

### 4.1 諫早湾干拓事業は有明海奥部の水質環境の劣化を促したか

1990 年代後半以降の有明海奥部における海底直上水の DO の全般的かつ傾向的減少 (Fig. 4) には、ほぼ 2000 年を起点とする有明海奥部流域における 7 月の降水量 Pr7 に起因する成分とともに、DO の減少の起点がこれよりも先行する諫早湾を起源とした成分が加わっている (Fig. 9)。また、この諫早湾を起源とする DO の減少の起点は、総じて諫早湾潮受け堤防の建設から締め切りの時期 (1989 ~ 1997 年) に相当し、しかも減少の程度は諫早湾口周辺ほど顕著である。このような結果が、貧酸素が弱まる大潮の満潮時の観測データから得られることの意味は大きい。なぜなら、貧酸素が最も顕著とな

る小潮の 2 ~ 3 日後に観測が行われていれば、さらに明瞭な結果が得られたことを意味するからである。ちなみに、貧酸素の発生する 6 ~ 9 月の DO は、大潮の 2, 3 日後に極大、小潮の 2, 3 日後に極小となり、貧酸素期 (7, 8 月) における小潮後の極小と直近の大潮における極大の差は、伊勢湾中部国際空港の事例 (西條ら, 2008) も含めて、水深 5 m 前後の岸寄りの地点でほぼ  $5\text{ mgL}^{-1}$ 、水深 10 m 前後の地点でほぼ  $1 \sim 3\text{ mgL}^{-1}$  である (西海水研・有明海貧酸素水塊広域連続観測情報, <http://www.ariake-do.jp/ariake/top.html>)。したがって、ここに示された大潮時の結果は諫早干拓事業が有明海の水質環境の劣化を促したことの確かな証拠と判定せざるを得ない。

この結果は、諫早湾起源の DO の減少や  $\Delta\sigma$ 、 $PO_4\text{-P}$ 、DIN の増加が湾奥流域起源のそれらの減少や増加に対して無視できない大きさで有明海奥部の中央海域や最奥海域に及ぶことを示したが、この定量的証拠は、開門調査を含め、諫早湾起源の負荷が諫早湾干拓事業の前後でどう変わったのかに関する定量的研究とともに、それらを組み込んだ有明海の富栄養化モデルによるシミュレーションによって得られるものである。

### 4.2 諫早干拓による貧酸素の悪化はいかなるメカニズムによってもたらされたか

緒言で述べたように、このメカニズムについては潮流仮説と物質循環仮説が提起されており、この両者について吟味する。

#### 4.2.1 潮流仮説の吟味

これまでの大部分のシミュレーションの結果は、諫早湾潮受け堤防の締め切りによって潮流が弱まるのは諫早湾内と諫早湾口周辺に留まる、というものであった。しかし、本研究の解析で得られた結果は、成層構造が発達する 7 月には、諫早湾を起源とする判別可能な  $\Delta\sigma$  の増加が有明海最奥部にまで及ぶ (Fig. 10 および Figs. 15b and 16b) ことを示した。これは、潮流の減衰とそれに伴う成層構造の発達がシミュレーションによって十分に再現されていない可能性を示唆する。理論的には、松野・中田 (2004) が指摘したように、潮流の非線形効果



による乱流混合と密度場と流動場のカップリングが適正にモデル化できていない可能性と重なる。7～8月は成層構造が最も発達し、上層と下層が諫早湾の地形変更や有明海奥部の海底地形に異なった応答を示す可能性が最も高まる時期でもあり、潮流の非線形効果による乱流混合と密度場と流動場のカップリングに関する現場的調査研究の推進と潮流シミュレーションモデルの改善が期待される。

本文が取り上げた期間1973-2009においては、Fig. 10に現れた諫早湾起源の $\Delta\sigma$ の増加が、Fig. 9に現れた諫早湾起源のDOの減少の直接的要因であるとは考えられない。その理由は、諫早湾起源の $\Delta\sigma$ の増加が有明海最奥部まで及ぶのは7月であるのに対して、DOの減少が有明海最奥部まで及ぶのは8月だからである。ただし、期間1973-2006と1978-2006(それぞれFig. 15a)および1973-2003と1978-2004(Fig. 16a)においては、灰色のグラフすなわち諫早湾起源のDOの減少が8月のみならず7月においても湾奥に達している。したがって、7月における諫早湾起源の $\Delta\sigma$ の増加が7月の諫早湾起源のDOの減少の直接的要因となっている可能性がある。

なお、Figs. 4-7を見る限り18.6年周期の月の昇降点振動や傾向的な海面上昇に対応するような変動は判別できない。したがって、月の昇降点振動に伴うM2潮振幅の変動や傾向的な海面上昇に伴うM2潮振幅の減衰は、この間の有明海奥部における貧酸素の経年的動向に影響を与えた要因ではない、と判定せざるを得ない。

#### 4.2.2 物質循環仮説の吟味

Figs. 11, 12を見れば、7月の海面水と海底直上水における諫早湾を起源とした $\text{PO}_4\text{-P}$ とDINの増加は殆ど湾奥全域に及んでおり、また諫早湾起源の $\text{PO}_4\text{-P}$ とDINの増加が年々進行しつつある8月の海面水における光合成の増加すなわち赤潮の悪化と貧酸素の悪化に対して判別可能な貢献をしている。このことは、諫早湾を起源とする富栄養化こそが、Fig. 9に示された、8月における諫早湾起源の、有明海最奥部に及ぶDO減少の要因であることを示している。なお、7月の諫早湾起源の $\Delta\sigma$ の増加すなわち成層の強化が、先に記述した7月から8月にかけての光合成の増加すなわち赤潮の悪化とそれに続

く8月の貧酸素の悪化に、有意に貢献したことは容易に想像できる。また、これとともに進行しつつある8月の海面水における $\text{PO}_4\text{-P}$ とDINの枯渇は、有明海奥部が鉛直移動の可能な渦鞭毛藻類に適合的な海域になりつつあること、そして、この8月の貧酸素の悪化と渦鞭毛藻類に適合的な栄養環境への移行は、有明海奥部における魚介類の生残を益々困難にしているであろうこともまた、容易に想像できることである。

では、いかなるメカニズムによって諫早湾干拓事業は有明海奥部の富栄養化と貧酸素にこれほど顕著な影響を及ぼすほどのN, P負荷を生み出したのであろうか。

諫早湾は、その流域から主に本明川などを通じて流入する負荷の浄化の場であっただけでなく、有明海奥部流域から流入する負荷の浄化の場でもあったと考えられる。なぜなら、有明海最奥部に流入する負荷は主に筑後川を始めとした大小の河川水とともに流入するが、この河川水は地球自転の効果と潮流の非線形効果によって佐賀県沿岸寄りに南下し、かなりの部分が諫早湾に流入し(山口・経塚, 2003; 灘岡・花田, 2002の図3.20参照)、これに含まれる栄養塩や有機物が諫早湾の干潟・浅海域生態系によって利用され、浄化されていたと考えられるからである。

ちなみに、干潟・浅海域における浄化とは、

- ① 上げ潮や時化の波浪によって巻き上げられた堆積物と湾内外から負荷された懸濁物が、上げ潮や波浪の非線形効果によって湾口から湾奥へ輸送されて堆積し、好氣的な干潟・浅海域生態系を形成し、それを維持すること(物理的浄化)、
- ② 好氣的な干潟・浅海域生態系における堆積物およびこの堆積物が分解されて生じた栄養塩と系外から供給された栄養塩の三者によって生物多様性と巨大なバイオマスが維持され、夏季の貧酸素が形成される時期には過剰な栄養成分を吸収した結果このバイオマスがさらに増加し、またその増加分が人間や渡り鳥などによって取り上げられ、冬季の栄養供給が枯渇する時期には過剰なバイオマスが枯死し、生物の再生産が活発化する春に分解されて、栄養供給源となること(生物的浄化)、
- ③ 余分なDINおよび $\text{PO}_4\text{-P}$ が、干潟・浅海域における脱チソ細菌による $\text{NO}_3\text{-N}$ や $\text{NO}_2\text{-N}$ の $\text{N}_2$ ガス

への転化および  $\text{PO}_4\text{-P}$  の土粒子への吸着と永久堆積などによって、取り除かれること（化学的浄化）で特徴づけられ、これらの浄化作用が諫早干拓によってことごとく消失したと言える。具体的には、潮受け堤防閉め切りと潮流の激減によって①が殆どなくなると同時に、調整池の閉め切りと淡水化によって調整池の干潟・浅海域生態系それ自体と②③が失われた。さらに、調整池に不断に溜まる堆積物（土壌成分と有機物と  $\text{PO}_4\text{-P}$ ）と水中の濃厚な栄養塩とアオコからなる悪水が本明川の出水に合わせ、不断にかつ計画的に、そして干潟・浅海域生態系とは無関係に、水門から諫早湾に排出されるようになったために、潮受け堤防の外側に展開していた干潟・浅海域生態系自体も破壊され、その浄化力①～③も失われた。この結果、調整池から排出される本明川流域の負荷と諫早湾口から流入する有明海奥部流域の負荷が、諫早湾干拓事業以前のように浄化されることなく、諫早湾内において顕著な赤潮と貧酸素を形成し、島原半島沿いに流出する過程で有機懸濁物に取り込まれた DIN と  $\text{PO}_4\text{-P}$  および懸濁物に無機的に吸着した  $\text{PO}_4\text{-P}$  が沈降し、有明海奥部のエスチャリー循環や広義の水平拡散を通じて有明海奥部全域に伝播するようになったと言える。

このように、諫早湾干拓事業は、諫早湾から排出される実質の負荷が、潮受け堤防水門から排出される負荷だけではなく、これに、本明川流域と諫早湾口から流入する有明海奥部流域の汚濁負荷を浄化していた諫早湾の干潟・浅海域生態系の全浄化力すなわち①、②、③の総和にしてしまったと言える。さらに、干潟・浅海域の泥の中に閉じ込められていた積年の汚濁物質のなかで潮受け堤防建設工事によって封印を解かれた部分がこれに付け加わった可能性も考えられる。これらのことを考慮すれば、7月の  $\text{PO}_4\text{-P}$  と DIN に諫早湾干拓事業の影響がかくも顕著に現れたのも不思議ではない。

#### 4.3 有明海環境劣化に関する研究の課題

本研究が明らかにしたように、有明海環境劣化と諫早湾干拓事業の間には因果関係が存在し、その因果関係は諫早干拓事業によって諫早湾が有明海奥部に対する巨大な浄化源から巨大な負荷源に転化したこと、この諫早湾

起源の栄養負荷に7月の諫早湾起源の成層強化が加わったことに起因する。したがって、今後の課題は、研究の照準を「有明海の環境劣化と諫早湾干拓事業の因果関係」に改めることと考えられ、以下のような内容となろう。

- ① 諫早湾干拓事業以前の諫早湾干潟・浅海域生態系を過去のデータあるいは類似の干潟データから極力再現し、その浄化源および負荷源としての機能を定量的に評価すること、また諫早湾干拓事業以降の諫早湾干潟・浅海域生態系について開門調査を含めた現地調査を実施し、諫早湾干拓事業後の諫早湾干潟・浅海域生態系の構造と機能を明らかにすること。
- ② 既存の干潟生態系モデルを改良し、諫早湾干拓事業の前と後の時期に対する二つの諫早湾干潟・浅海域生態系モデルを構築し、有明海の浮遊系モデルと底泥系モデルにつなぎ合せ、諫早湾干拓事業以前と以後における有明海奥部の水質環境を再現すること。原型となるべき有明海生態系モデルは既に構築されている（宇野木・佐々木, 2007; 田中・小田切, 2010, 2011）ので、これらを改良し、的確に運用することが期待される。

また、これからの研究課題には、的確な流動モデルを構築することも加えられる。すなわち、

- a. 流動モデルの境界条件の精度を向上させること、
- b. 流動モデルに成層構造と海底地形を精度良く組み込むこと、
- c. 密度躍層を通過する運動量と熱および物質の鉛直乱流混合係数を適切に組み込むこと、

である。b および c については新たな研究（松野・中田, 2004; 丹羽, 2006; 斎田ら, 2010）の進展が期待される。

開門調査は、これらの研究が進展する大きな契機となり得る。開門による調整池への海水の導入は干潟・浅海域生態系の何らかの回復、すなわち、悪水の排出源から浄化源への切り替わりとなり得るし、この効果が劇的な展開を見せる可能性も期待できるからである。

## 謝辞

編集委員会のきめ細かい校閲と査読者のきめ細かいコメントに感謝する。これらによって論文の完成度は高められた。また、有明海と諫早湾の研究に取り組んだあるいは今も取り組んでいる全ての先達、浅海定線調査を継続し貴重なデータを取得している佐賀県水産試験場、調査結果のデータベース化と公表の実務を担っている独立行政法人水産総合研究センター・西海区水産研究所ならびに日本水産資源保護協会、これらを資金的にバックアップしている水産庁、ならびに全国各地の降雨量を長期にわたって測定し、この結果を公表している気象庁に敬意を表する。これらなしに本研究と論文は成立しなかった。

## References

- Amano, K., M. Watanabe, K. Kohata and S. Harada (1998): Conditions necessary for *Chattonella antiqua* red tide outbreaks under stable stratification. *Limnol. Oceanogr.*, **43** (1), 593–602.
- 東 幹夫 (2005a): 3章, 有明海環境異変とその要因, 5. 底質の変化, p.94–104, In 有明海の生態系再生をめざして, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 東 幹夫 (2005b): 4章, 有明海生態系異変とその要因, 2. 底生動物相の経年変化, p.118–128, In 有明海の生態系再生をめざして, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 城 久 (1987): 大阪湾におけるリンの循環—形態別リンの分布特性—, 沿岸海洋研究ノート, **24** (2), 158–168.
- Manda, A. and K. Matsuoka (2006): Changes in tidal currents in the Ariake sound due to reclamation. *Estuaries and Coasts*, **29** (4), 645–652.
- 松川康夫 (1990): 内湾における窒素, 磷の挙動, 沿岸海洋研究ノート, **28** (1), 43–48.
- 松野 健・中田英昭 (2004): 有明海の流れ場を支配する物理過程. 沿岸海洋研究, **42** (1), 11–17.
- 灘岡和夫・花田 岳 (2002): 有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防閉め切りの影響. 海洋工学論文集, **49**, 401–405.
- 丹羽淑博 (2006): 深層乱流に供給される内部波エネルギーの空間分布に関する数値的研究. 海の研究, **15** (5), 395–416.
- 日本海洋学会海洋環境問題委員会 (2001): 有明海環境悪化機構究明と環境回復のための提言. 海の研究, **10**, 241–246.
- 小田巻 実・大庭幸広・柴田宣昭 (2003): 有明海の潮流新旧比較観測結果について. 海洋情報部研究報告, **39**, 33–61.
- 斎田倫徳・田井 明・志岐慎介・多田彰秀・矢野真一郎・小松利光 (2010): 有明海における乱流エネルギー散逸率の変動特性. 日本流体力学会年会 2010, pp.290.
- 西條八東・寺井久滋・永野真理子・鮎川和泰・八木明彦・梅村麻希・加藤義久・川瀬基弘・佐々木克之・松川康夫 (2008): 中部国際空港建設による水質, 底質, 底生生物群集の劣化. 海の研究, **17** (4), 281–295.
- 佐々木克之 (2005a): 4章, 有明海生態系異変とその要因, 4.22 タイラギ漁業壊滅過程, p.146–151, In 有明海の生態系再生をめざして, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 佐々木克之 (2005b): 4章, 有明海生態系異変とその要因, 4.3 水産動物(エビ類, タコ類, イカ類) 漁業, p.151–153, In 有明海の生態系再生をめざして, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 佐々木克之 (2005c): 4章, 有明海生態系異変とその要因, 4.5 魚類漁業, p.157–161, In 有明海の生態系再生をめざして, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 佐々木克之 (2005d): 2章, 開発行為, 1. 有明海における干潟の減少, p.39–41, In 有明海の生態系再生をめざして, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 佐々木克之・程木義邦・村上哲生 (2003): 諫早湾調整池からの COD・全窒素・全リンの排出量および失われた浄化量の推定. 海の研究, **12** (6), 573–591.
- Shipe, R. F., M. F. Brzezinski, C. Pilskaln, T. A. Villareal: (1999): *Rhizosolenia* mats: An overlooked source of silica production on the open sea. *Limnol. Oceanogr.*, **44** (5), 1282–1292.
- 田北 徹・山口敦子 (2005): 4章, 有明海生態系異変とその要因, 3. 魚類の変化, p.128–132, In 有明海の生態系再生をめざして, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 田中昌宏・小田切光典 (2010): 有明海奥部の貧酸素水塊形成過程とそのモデル化. 海岸工学, **66** (1), 1011–1015.
- 田中昌宏・小田切光典 (2011): 生態系モデルによる有明海奥部の貧酸素水塊発生対策の検討. 海岸工学, **67** (2), 1896–1900.
- 手塚公裕・片野俊也・濱田孝治・加瑞・日野剛徳・速水祐一・伊藤祐二・大串浩一郎 (2012): 諫早湾及び隣接する調整池における底質の栄養塩分布. 海の研究, **21** (3), 69–81.
- 塚本秀史・柳 哲雄 (2002): 有明海の潮汐・潮流. 海と空, **78**, 31–38.
- 堤 裕昭・堤 彩・高橋篤志・木村千寿子・永田紗矢香・佃 政則・小森田智大・高橋徹・門谷 茂 (2007): 有明海奥部における夏季の貧酸素水発生域の拡大とそのメカニズム. 海の研究, **16** (3), 183–202.
- 宇野木早苗 (2002): 有明海における潮汐と流れの変化—諫早湾干拓事業の影響を中心にして. 海と空, **78** (1), 19–30.
- 宇野木早苗・佐々木克之 (2007): 有明海異変の発生システムについて. 海の研究, **16** (4), 319–328.
- 柳 哲雄 (2004): 生態系モデルは有明海を再現できるか. 沿岸海洋研究, **42** (1), 61–65.
- 山口創一・経塚雄策 (2003): 生態系モデルによる有明海の貧酸素水塊の再現性について. MEC モデルワークショップ (第4回), pp.99–113.
- Villareal, T. A., C. Pilskaln, M. Brzezinski, F. Lipschultz, G. B. Gardner (1999): Upward transport of oceanic nitrate by migrating diatom mats. *Nature*, **397**, 423–425.
- Watanabe, M., K. Kohata, T. Kimura (1991): Diel vertical migration and nocturnal uptake of nutrients by *Chattonella antiqua*. *Limnol. Oceanogr.*, **36** (3), 593–602.

## Causality between hypoxia of Ariake Sea environment and reclamation in Isahaya Bay, Japan

Matsukawa, Yasuo \*, Katsuyuki Sasaki \*\* and Yozo Hanyu \*\*\*

### Abstract

Year-to-year changes of water quality, density difference between the surface and bottom waters in the inner Ariake Sea and precipitation in its surrounding area from 1972 to 2009 are investigated to verify causality between environmental condition in the inner Ariake Sea and Reclamation in Isahaya Bay. Data of water qualities from routine measurements by Saga Prefecture and precipitation at Saga City are used. Water density is calculated from temperature and salinity using the formula (UNESCO, 1981). Results show “N” and “inverse-N” patterns in the 3rd approximated curves for year-to-year time series of the water quality, density difference and precipitation, and significant relationships between the precipitation in July at Saga City and the density difference and the water quality and its DIN/PO<sub>4</sub>-P ratio. These results mean that the progressive hypoxia of the inner Ariake Sea in July and August is caused by not only the recent increase of the precipitation in July but also the change of the environmental condition in Isahaya Bay from a big sink to a big source of the nutrients due to the reclamation and closing near a half of the bay with a long dike to keep fresh water together with consequent weakening of tidal currents and enhancement of density difference in the inner Ariake Sea.

**Key words** : marine environment, hypoxia, Ariake Sea, reclamation, Isahaya Bay

(Corresponding author's e-mail address: matsuyan@k4.dion.ne.jp)

(Received 21 September 2012; accepted 31 January 2014)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2014)

---

\* Minamihonjuku-cho 77-47, Asahi-ku, Yokohama 241-0833, Japan.

\*\* Nishi 23jo 1-15-422, Minami 7jo, Chuo-ku, Sapporo 064-0807, Japan.

\*\*\* Kamishakujii 1-8-2-508, Nerima-ku, Tokyo 177-0043, Japan.