

## 瀬戸内海におけるリン・窒素の起源の経年変動

柳, 哲雄  
九州大学応用力学研究所

田中, 剛  
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://doi.org/10.15017/1526167>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 146, pp.129-135, 2014-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

# 瀬戸内海におけるリン・窒素の起源の経年変動

柳 哲雄\*1・田中 剛\*2

(2013年12月1日受理)

## Year-to-year variation in origins of phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea, Japan

Tetsuo YANAGI and Tsuyoshi TANAKA

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

### Abstract

The origins of total phosphorus and total nitrogen in the Seto Inland Sea, Japan are investigated by the unit response function method, using the observed data during 1991~1995 and 2002~2006.

**Key words** : *eutrophication, oligotrophication, unit response function, average residence time*

## 1. はじめに

1955~1970年の日本における高度経済成長期、瀬戸内海沿岸には多数の工場が集中立地された。そして主に周辺工場から排出された栄養物質による富栄養化で、瀬戸内海の赤潮発生件数は急増し、1977年には年間約300件に達した。これに対して1978年から行われたCOD負荷総量削減政策(後にリン・窒素も加えられる)の効果により、現在の瀬戸内海における赤潮の発生件数は年間約100件程度になっている。

この間、瀬戸内海の平均TP (Total Phosphorus; 全リン)・TN (Total Nitrogen; 全窒素)濃度はそれぞれ、0.28mg/l、0.028mg/l程度とほぼ一定であったが、2007年からは急減し始めて、現在の瀬戸内海では貧栄養化と呼べるような現象が生じ、ワリの色落ちや底引き網漁獲量の急減などが社会問題化している(柳, 2014)<sup>1)</sup>。

瀬戸内海の栄養塩濃度を「きれいで、豊かな海」にふさわしい濃度に維持するためにはまず、瀬戸内海に存在する栄養物質であるTP・TNの起源を明らかにしておく必要がある。

本稿では単位応答関数法(Yanagi and Tanaka, 2013)<sup>2)</sup>を用いて、瀬戸内海のTP・TNの起源、及びその経年変動を明らかにすることを試みる。

## 2. 取得データ

河川から瀬戸内海に流入してくるTP・TN負荷量は河川流量と河川水中のTP・TN濃度の積から推定可能である。瀬戸内海における22の1級河川(Fig.1)の毎日の河川流量と毎月のTP・TN濃度は国土交通省により観測されていて、HP(<http://www.river.go.jp>)から取得可能である。これを元に毎月のTP・TN負荷量を算出した。この他に2級河川や中小河川を通じて瀬戸内海に負荷されるTP・TNもあるので、1級河川の流域面積(33,098 km<sup>2</sup>)に対する瀬戸内海的全流域面積(48,280 km<sup>2</sup>)の比(1.46)を1級河川からの負荷量に乗じて河川からのTP・TN負荷量とした。計算期間は1991~1995年と2002~2006年である。

瀬戸内海におけるTP・TN濃度と塩分・水温は環境省による広域水質調査により年4回(2、5、8、11月)、Fig.2に示した全域123点の表層・底層で観測されている。それらのデータは環境省のHP(<http://www2.env.go.jp/water-pub/>)

\*1 九州大学応用力学研究所

\*2 九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

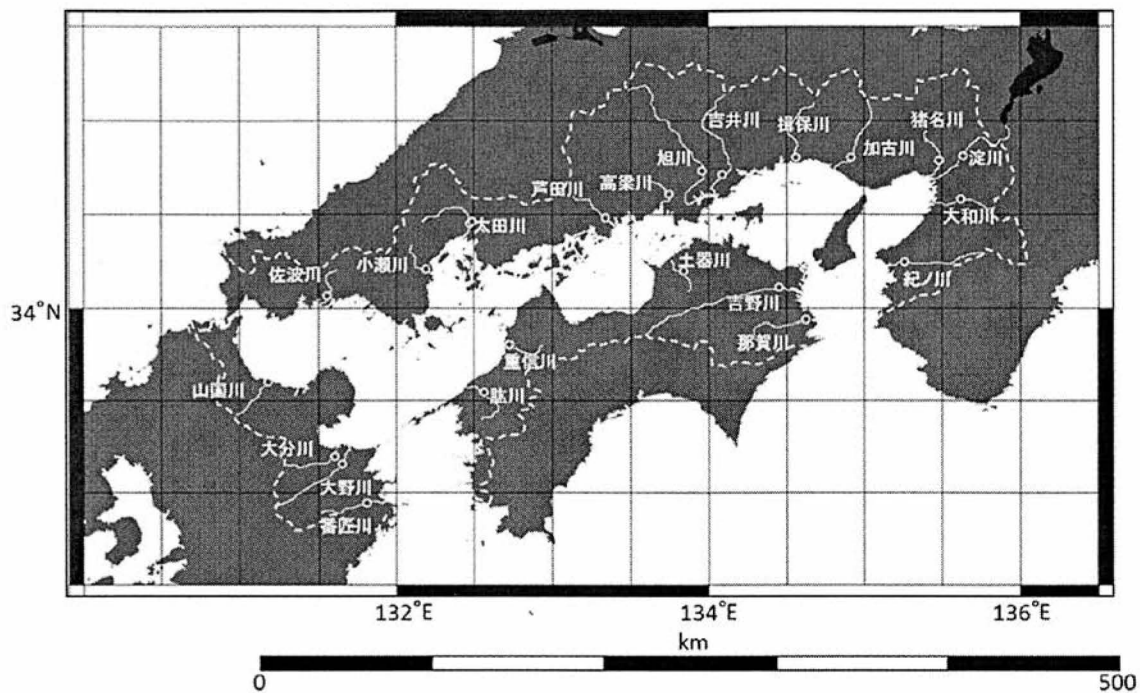


Fig.1 Main rivers which empty into the Seto Inland Sea and observation points of river discharge and TP and TN concentrations (circle). Broken line shows the watershed area.

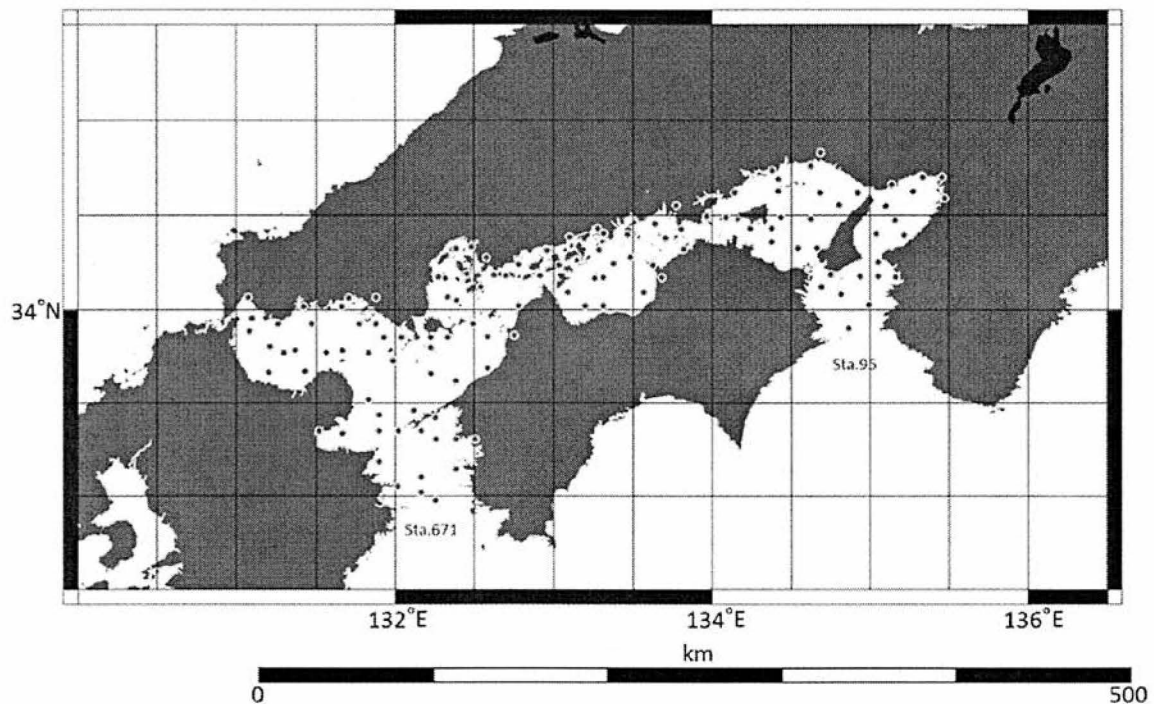


Fig.2 Observation points of salinity, bottom water temperature and TP and TN concentrations.

mizu-site/) にまとめられていて、取得可能である。本研究では、全点の表層・底層の塩分、TP・TN 濃度を平均して、3 ヶ月ごとの瀬戸内海の平均塩分、TP・TN 濃度を算出し、全点の底層水温を平均して、底層平均水温を算出した。

このようにして算出した毎月の河川流量、TP・TN 負荷量、

3 ヶ月ごとの瀬戸内海の平均塩分、平均底層水温、平均 TP・TN 濃度を Fig.3、Fig.4 に示す。7～9 月の梅雨・台風時期に河川流量が増加して、TP・TN 負荷量は大きくなり、瀬戸内海の平均塩分は 7～9 月に低下し、TP・TN 濃度は 7～12 月に高くなっている。

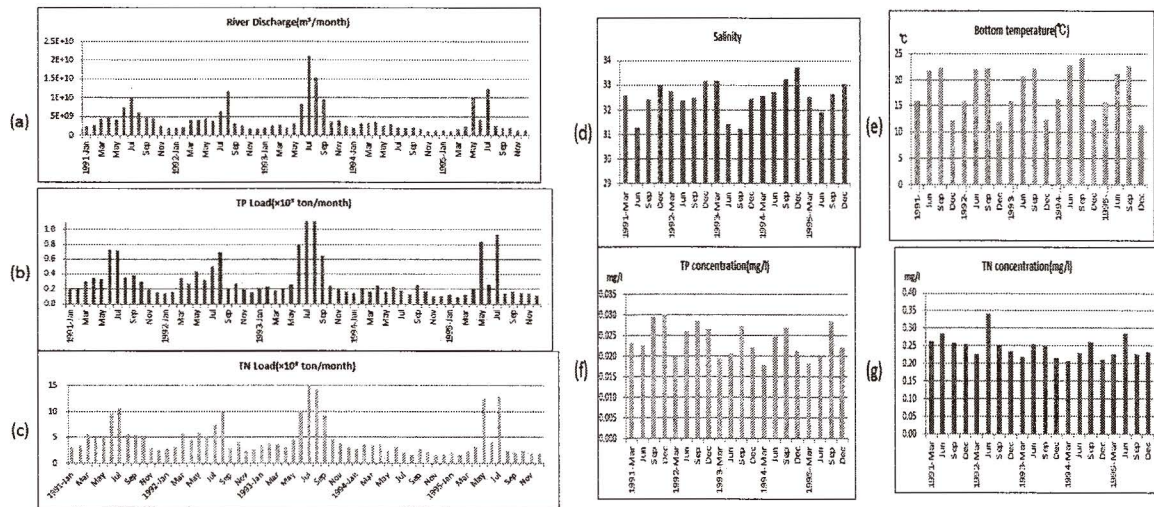


Fig.3 Monthly variations in river discharge (a), TP load (b), TN load (c), average salinity (d), average bottom water temperature (e), TP concentration (f) and TN concentration (g) in the Seto Inland Sea during 1991-1995.

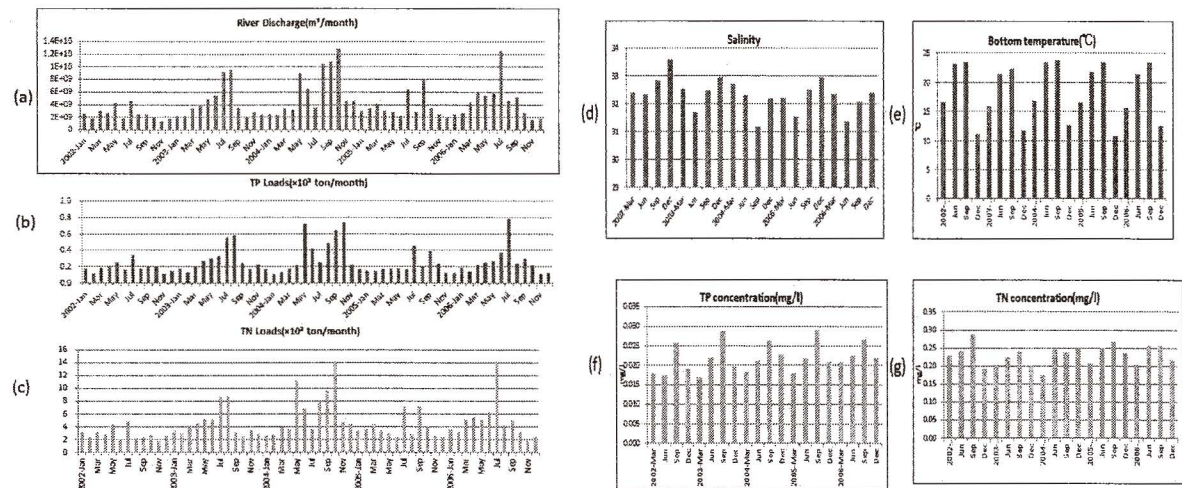


Fig.4 Monthly variations in river discharge (a), TP load (b), TN load (c), average salinity (d), average bottom water temperature (e), TP concentration (f) and TN concentration (g) in the Seto Inland Sea during 2002-2006.

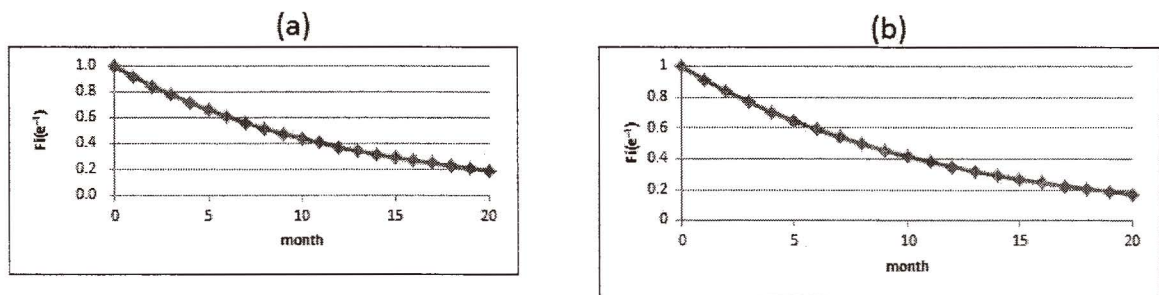


Fig.5 Estimated unit response function for fresh water in the Seto Inland Sea during 1992-1995 (a) and 2003-2006 (b).

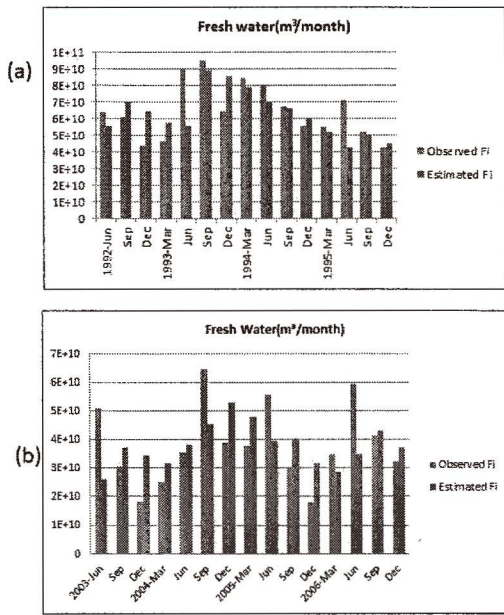


Fig. 6 Observed and estimated fresh water standing stocks in the Seto Inland Sea during 1992-1995 (a) and 2003-2006 (b).

は月  $i$  の河川流量を示す。瀬戸内海の海面の降水・蒸発量の効果は無視している。両者は年間平均でほぼ釣り合っているからである(柳, 1997)<sup>3)</sup>。瀬戸内海における淡水の平均滞留時間は約 8 ヶ月だと言われているので(柳, 1997)<sup>3)</sup>、(1)式では 14 ヶ月前までの河川流量が瀬戸内海の平均塩分に与える影響を考慮している。(1)式の右辺が河川流量に対する単位応答関数を表す。(1)式の未知数は  $b$  だけなので、これを 1992 年 6 月から 1995 年 12 月と 2003 年 6 月から 2006 年 12 月までのそれぞれ 15 ケの式を最小二乗法で解くことにより推定する。

次に TP・TN 負荷量変動に対する瀬戸内海の平均 TP・TN 濃度変動の応答関数を次式により求める。

$$C_i = C_0 + \frac{1}{V} (L_i + L_{i-1}e^{-b} + L_{i-2}e^{-2b} + \dots + L_{i-20}e^{-14b}) + \alpha T_i \quad (2)$$

ここで  $C_0$  (mg/l)は外洋の TP・TN 濃度、 $L_i$ (kg)は月  $i$  の TP・TN 負荷量、 $\alpha$  (mg/l・°C<sup>-1</sup>)は底質からの TP・TN 溶出による TP・TN 濃度を表す。底質からの TP・TN 溶出量は底層水温に比例すると仮定してある。ここで瀬戸内海における大気からの TP・TN 負荷量は河川からの負荷量に対してそれ

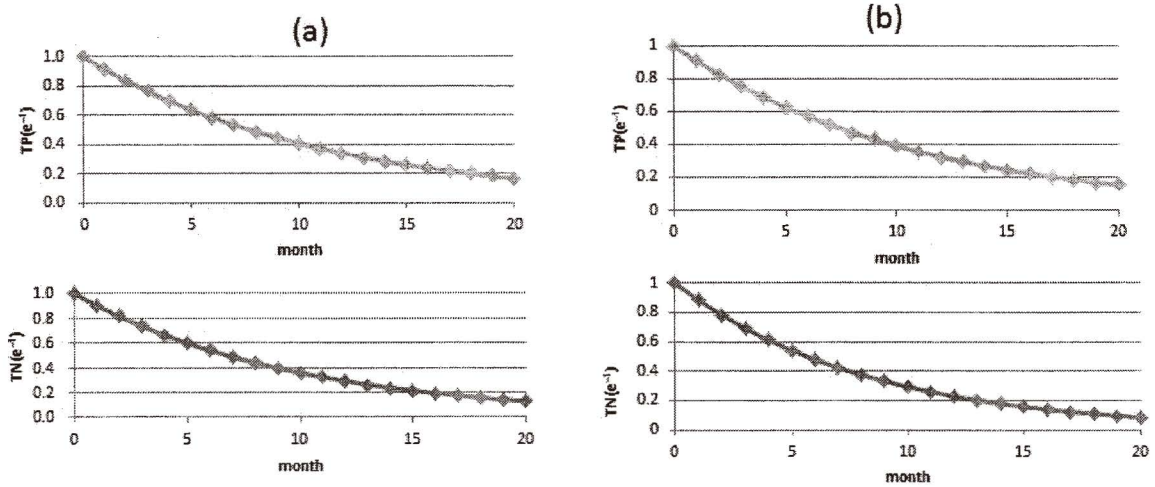


Fig.7 Estimated unit response function for TP and TN in the Seto Inland Sea during 1992-1995 (a) and 2003-2006 (b).

### 3. 解析方法

まず、毎月の河川流量変動に対する瀬戸内海の淡水存在量( $F_i$  km<sup>3</sup>)変動の応答関係を求める。 $F_i$  は次式で推定出来る。

$$F_i = V \frac{S_0 - S_i}{S_0} = R_i + R_{i-1}e^{-b} + R_{i-2}e^{-2b} + \dots + R_{i-20}e^{-14b} \quad (1)$$

ここで  $V$  は瀬戸内海の容積(880 km<sup>3</sup>)、 $S_0$  は外洋の塩分 (Fig.2 に示した Sta.671 底層の塩分で 34.71(1991-1997)、33.67(2001-2006))、 $S_i$  は月  $i$  の瀬戸内海の平均塩分、 $R_i$

それぞれ小さい(TP: 3%、TN:13%、柳, 1997)<sup>3)</sup>ので無視してある。

(2)式の未知数は  $C_0$ 、 $b$ 、 $\alpha$  の三つなので(1)式と同様それぞれ 15 ケの式を用いた最小自乗法で推定可能である。

河川から瀬戸内海に流入する淡水・TP・TN の瀬戸内海における平均滞留時間 ( $\tau$ ) は次式により推定可能である (Takeoka, 1984)<sup>4)</sup>。

$$\tau = \int_0^{\infty} e^{-bt} dt = \frac{1}{b} \quad (3)$$

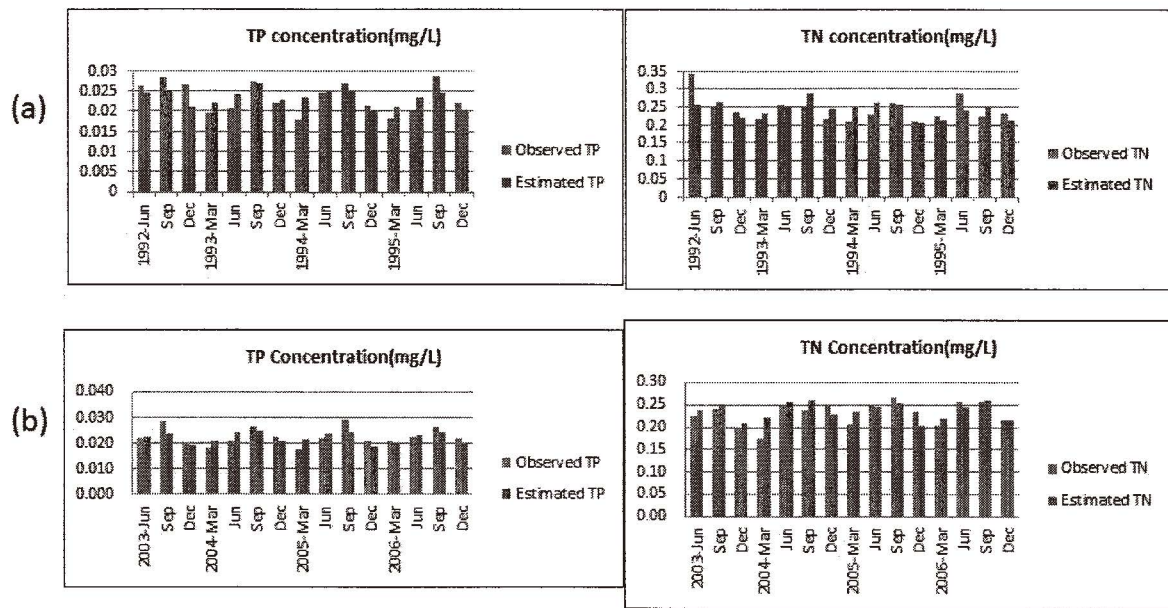


Fig.8 Observed and estimated average TP · TN concentrations in the Seto Inland Sea during 1992-1995 (a) and 2003-2006 (b).

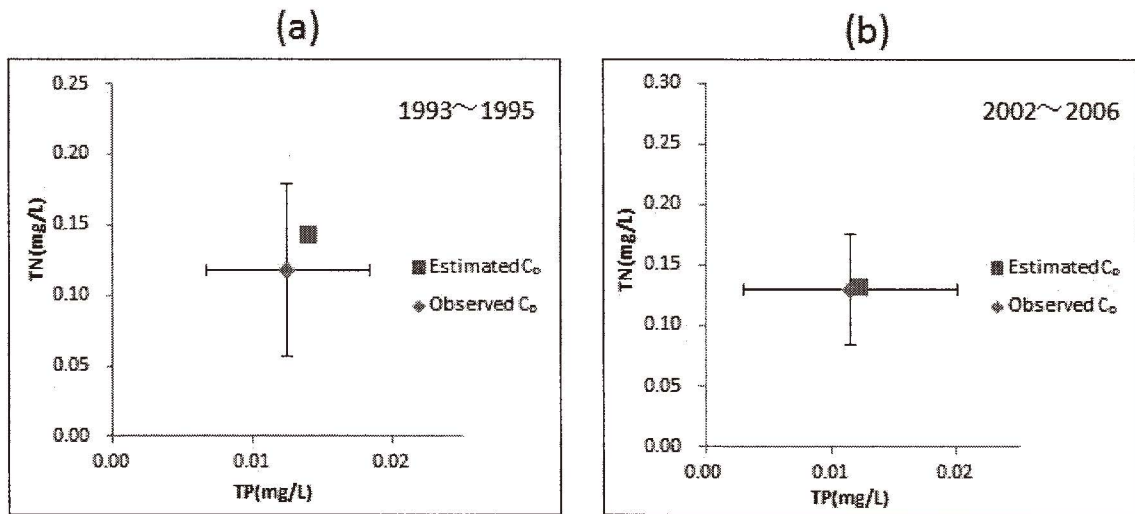


Fig.9 Estimated and observed  $C_0$  for TP and TN in the open sea during 1992-1995 (a) and 2002-2006 (b). Vertical and horizontal bars indicate the standard deviations of the observed values.

#### 4. 結果

(1)式から推定された  $b$  は  $0.082\text{month}^{-1}$  (1992~1995) と  $0.088\text{month}^{-1}$  (2003~2006) である。推定された河川から瀬戸内海に流入する淡水の単位応答関数を Fig.5 に示す。瀬戸内海に存在する淡水量の観測結果と計算結果の比較を Fig.6 に示す。計算結果は観測結果をほぼ再現している。

(2)式から推定された TP の  $b$  は  $0.090\text{month}^{-1}$  (1992~1995) と  $0.092\text{month}^{-1}$  (2003~2006)、TN の  $b$  は  $0.103\text{month}^{-1}$  (1992~1995) と  $0.123\text{month}^{-1}$  (2003~2006) であった。河川から流入する TP・TN の瀬戸内海における単位

応答関数を Fig.7 に示す。1992~1995 年と 2003~2006 年の観測された TP・TN 濃度と、(2)式で計算された TP・TN 濃度の時間変動比較結果を Fig.8 に示す。計算値は観測値をほぼ再現している。

(3)式から得られた淡水の平均滞留時間は 12.2 ヶ月 (1992~1995) と 11.4 ヶ月 (2003~2006)、TP の平均滞留時間は 11.1 ヶ月 (1992~1995) と 10.8 ヶ月 (2003~2006)、TN の平均滞留時間は 9.7 ヶ月 (1992~1995) と 8.1 ヶ月 (2003~2006) であった。

(2)式により推定された外洋の  $C_0$  (TP・TN 濃度) は、それ

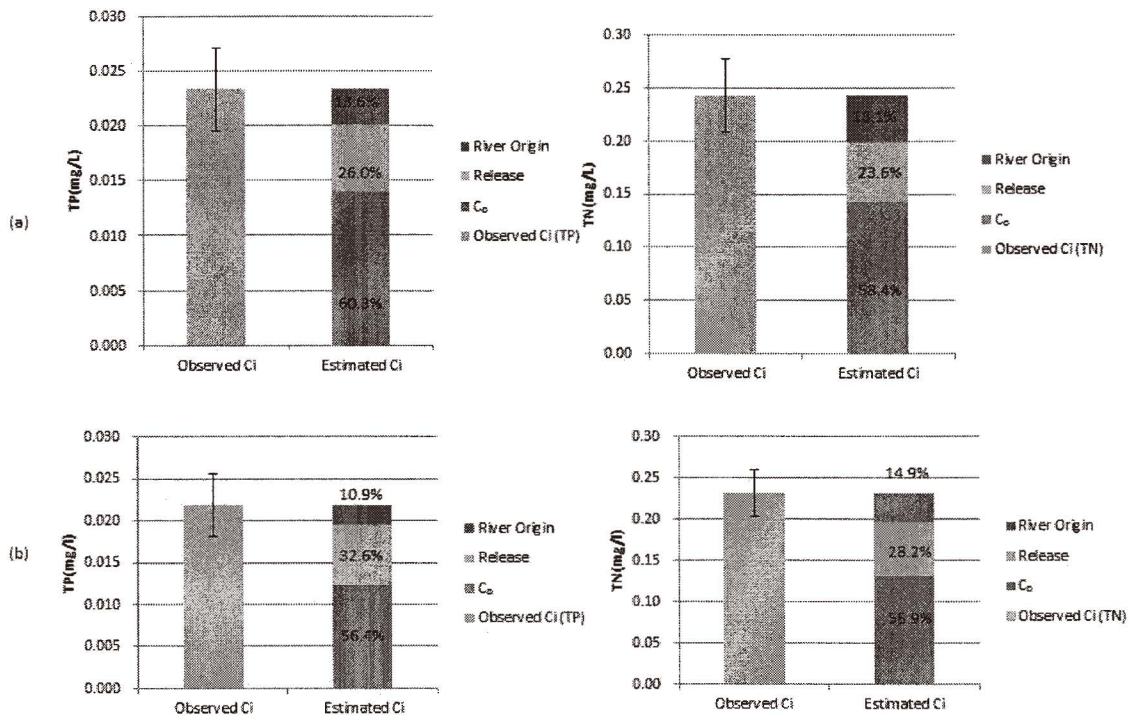


Fig.10 Observed and estimated TP and TN concentration in the Seto Inland Sea during 1992-1995 (a) and 2002-2006 (b). Vertical bar indicates the standard deviation of observed values.

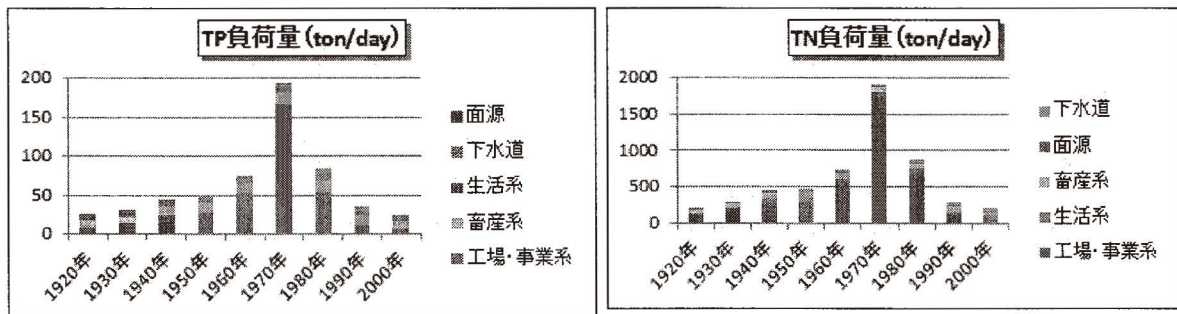


Fig.11 Year-to-year variations in TP and TN loads to the Seto Inland Sea from the land.

ぞれ、0.014mg/l、0.14mg/l (1992～1995)と 0.012mg/l、0.13mg/l (2003～2006)であった。この値の妥当性をチェックするために、推定値を豊後水道最南端の測点 (Sta.671; Fig.2 参照) と紀伊水道最南端の測点 (Sta.95) の底層の TP・TN 観測値と比較した。結果を Fig.9 に示す。推定値は観測値よりやや大きく、かつ観測値の標準偏差内にあり、この方法による外洋 TP・TN 濃度推定の妥当性を示唆している。

1992～1995 年と 2002～2006 年の瀬戸内海に存在する TP・TN の起源を Fig.10 に示す。外洋起源の TP は 56～60%、TN は 57～58%とそれぞれ半分以上を占める。底質起源の TP は 26～33%、TN は 24～28%と約 3 割弱を占める。河川起源の TP は 11～14%、TN は 15～18%と 2 割弱を占めるに過ぎない。

### 5. 議論

Fig.10 によれば観測された瀬戸内海の平均 TP・TN 濃度は 1990 年代より 2000 年代の方がそれぞれ 0.023mg/l→0.022mg/l、0.24mg/l→0.23mg/l と低下している。これは後述するように河川起源の TP・TN 負荷量が減少し、黒潮が離岸したためだと考えられる。

さらに、Fig.10 によると外洋・底質・河川起源の TP・TN が瀬戸内海に存在する TP・TN に占める割合は 1990 年代と 2000 年代では異なっている。まず、河川起源の TP・TN 濃度は 1990 年代→2000 年代にかけて、それぞれ、0.003mg/l→0.002mg/l、0.04mg/l→0.03mg/l と減少し、瀬戸内海に存

在するTP・TN中の河川起源TP・TNが占める割合もそれぞれ1.7%、3.2%減少している。これは環境省による負荷総量削減政策の効果だと考えられる。すなわち、Fig.11に示すように1970年以降陸上でのTP・TN発生量は大きく減少している(国土技術政策総合研究所 <http://www.nilim.go.jp/>)、その結果河川を通じて瀬戸内海に負荷されるTP・TN量も減少した結果、瀬戸内海でのTP・TN存在量に占める河川起源の割合も減少したと考えられる。

次に底質からの溶出に起因するTP・TN濃度は0.006mg/l→0.007mg/l、0.06mg/l→0.07mg/lと増加し、占める割合も26%→32%、24%→28%と増加している。そこで、環境省により観測された瀬戸内海の底質中のTP・TN濃度の変動を調べた(<https://www2.env.go.jp/water-pub/mizu-site/>)。1991~1995年の間に調査された瀬戸内海全域の底質中の平均TP・TN濃度はそれぞれ0.52mg/g、1.66mg/gであったが、2001~2005年の平均TP・TN濃度はそれぞれ0.58mg/g、1.73mg/gと若干増加している。このような底質中のTP・TN濃度増加が溶出起源TP・TN濃度とその占める割合の増加に結びついたと考えられる。

外洋起源のTP・TN濃度は1990年代から2000年代にかけて、それぞれ0.014mg/l→0.012mg/l、0.14mg/l→0.13mg/lと減少し、占める割合もそれぞれ60%→56%、58%→57%と減少している。瀬戸内海のTP・TN濃度変動に黒潮流軸変動が関係していることはよく知られている。すなわち黒潮流軸が日本に接岸すると亜表層の冷水(TP・TN濃度が高い)が陸棚縁に沿って湧昇し、瀬戸内海のTP・TN濃度は高くなり、離岸すると表層の暖水(TP・TN濃度が低い)が瀬戸内海に接近し、TP・TN濃度は低くなる(藤原・高志、2002)<sup>5)</sup>。足摺岬沖の黒潮流軸位置は1991~1995年の平均は31°33'Nだったが、2001~2005年は31°25'で、潮岬沖のそれは1991~1995年が32°47'、2001~2005年が32°32'と、両岬とも2000年代の方が離岸していた。このような黒潮離岸が2000年代の外洋TP・TN濃度の低下と低い割合を生じたと考えられる。

1990年代と2000年代を平均した淡水・TP・TNの平均滞留時間はそれぞれ11.8ヶ月、11.0ヶ月、8.9ヶ月である。これは瀬戸内海の収支計算結果をもとに推定された柳(1997)<sup>3)</sup>の淡水・TP・TNの平均滞留時間の推定値7.7ヶ月、

9.2ヶ月、8.9ヶ月よりやや長い、ほぼ同程度の数字となっている。ただ、収支計算結果から推定した平均滞留時間は淡水が最も短いに対して、単位応答関数から求めた平均滞留時間は淡水が最も長くなっている理由は明らかではないが、表層と底層の観測値だけを用いて水柱の塩分・TP・TN存在量を推定しているためかもしれない。TPよりTNの平均滞留時間が短いのは脱窒の影響だと考えられる。

## 6. おわりに

以上の研究の結果、瀬戸内海に存在するTP・TNの起源は約5割強が外洋、3割弱が底質、2割弱が河川であること、1990年代と2000年代を比較すると河川からのTP・TNは減少、底質からのTP・TNは増加、外洋からのTP・TNは減少していることが明らかとなった。

2007年以降の瀬戸内海全域の平均TP・TN濃度が急激な減少傾向を示している主な原因は河川からのTP・TN負荷量の減少に加えて、底質からのTP・TN溶出量が減少しているためだと考えられる。今後最新のデータセットを用いて検証してみたい。

## 参考文献

- 1) 柳 哲雄(2014)瀬戸内海における富栄養化・貧栄養化の力学. 沿岸海洋研究(印刷中).
- 2) Yanagi, T. and T. Tanaka (2013) Origins of phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea, Japan. Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 144, 13-18.
- 3) 柳 哲雄(1997)瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支. 海の研究, 6, 157-161.
- 4) Takeoka, H. (1984) Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. Continental Shelf Research, 3, 311-326.
- 5) 藤原建紀・高志利宣(2002) 黒潮系亜表層水の陸棚への這い上がりと内湾への影響. 月刊 海洋, 号外 No. 31, 1-4.