

有明海陸域からの流入負荷の流域依存特性

緒方 直人¹・大串 浩一郎²・手塚 公裕³

¹学生会員 佐賀大学大学院工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

E-mail: 13577008@edu.cc.saga-u.ac.jp

²正会員 佐賀大学教授 佐賀大学大学院工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

E-mail: ohgushik@cc.saga-u.ac.jp

³正会員 日本大学助教 日本大学工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

E-mail: m_tezuka@civil.cc.nihon-u.ac.jp

有明海は赤潮発生頻度の増加など環境異変が問題になっている。閉鎖性の強い有明海の環境異変解明のためには陸域負荷の長期変動を知る必要がある。しかし、既往の検討のほとんどは一部の代表年を対象とした断続的な検討にとどまっているため、長期変動の解析としては不十分である。そこで本研究では、既往の検討から推定した有明海の流入量と負荷量をGISで時空間解析を行い、有明海陸域からの流入負荷の流域依存特性を明らかにした。その結果、緑川支川加勢川流域の湧水や白川流域の有機物含有量の高い黒ボク土の影響等の流域依存特性を把握することができた。

Key Words : Ariake Sea, inflow loads, long-term variation, basin-dependent characteristics, specific discharge

1. はじめに

有明海では、1980年代に漁獲量の減少が始まり、2000年12月に生じた大規模赤潮に伴うノリ不作をきっかけに環境異変が注目された。2002年には「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」が施行され、その後、有明海における環境異変の原因解明と対策が進められてきたが、明らかにされていない問題が未だに多く存在している。

有明海の環境異変解明に関する検討として、堤ら¹⁾や小松ら²⁾は有明海の赤潮発生のメカニズムや物質輸送の変化に関する検討を行っている。しかし、有明海は閉鎖性が強いいため陸域の影響についても詳しい検討が必要である。

環境省有明海・八代海総合調査評価委員会の報告書³⁾では、1965～2001年の年流入負荷量の一部が算定されている。朴ら⁴⁾は、有明海流入河川流域の分布型流出モデルを構築し、土地利用等の環境変化が流出量に与える影響を考察している。しかし、これらの報告では幾つかの代表年を対象とした断続的な検討にとどまっている。有明海の環境変化のメカニズムを把握するためには、陸域からの流入負荷の変動は降雨パターンなどに影響を受けるため長期間を対象として連続的に押さえておく必要がある。

一方、有明海陸域からの流入負荷が海洋環境に及ぼす影響を定量的に把握するためには、流域の構成要素（土壌、地質、土地利用等）を詳細に考慮することが可能な分布型流出モデルの構築が有効であるといわれている⁵⁾。分布型流出モデルを構築するためには、対象地域の流域特性を把握する必要があるが、有明海陸域の流域特性について検討を行っている研究はほとんどない。

そこで本研究では、過去30年間(1981～2010年)の有明海陸域からの流入量・負荷量を次章に示す推定法により算定し、GISを用いて時空間解析を行うことにより、有明海陸域からの流入負荷の流域依存特性を明らかにした。

2. 研究方法

(1) 流域区分

本研究における有明海の流域区分(図-1)として、全一級河川(筑後川、菊池川、緑川、白川、矢部川、六角川、嘉瀬川、加勢川(緑川支川)、牛津川(六角川支川)、本明川)および塩田川(二級河川であるが面積が大きい)を順流域と感潮域に区分し、その他を直接流入域とした。また、流入水量とCOD、T-N、T-P負荷量の推定結果を比較するため、一部の感潮域・直接流入域を東部感潮域・直接流入域、西部感潮域・直接流入域と定義

した。

(2) 有明海に流入する水量と負荷量の推定方法

流入水量と負荷量の推定の流れを図-2に示す。

a) 順流域の流入水量の推定

順流域最下流の観測所の時刻流量データ(1981~2010年)を国土交通省より収集した。その際にデータの欠測がある場合は、著者らが提案したデータ補間法⁶⁾によりRMSE(Root Mean Square Error)が小さくなるように欠測を補間した。既往の検討⁶⁾を参考にし、タンクモデルは直列4段とした。流域平均雨量の推定にはティーセン法、蒸発散量の推定にはソーンスウェイト法を用いた。このときの時間雨量は国土交通省と気象庁より、月平均気温は気象庁より提供を受けたデータを用いた。

流量観測所の長期的な時刻流量データが得られた後、各流量観測所の比流量を求め、比流量に順流域面積を乗じることで、各順流域の河川流量を算出した。六角川と

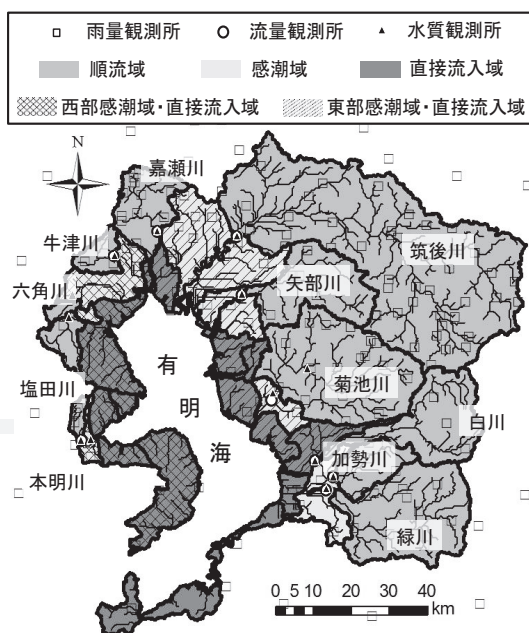


図-1 有明海陸域の流域区分と各観測所

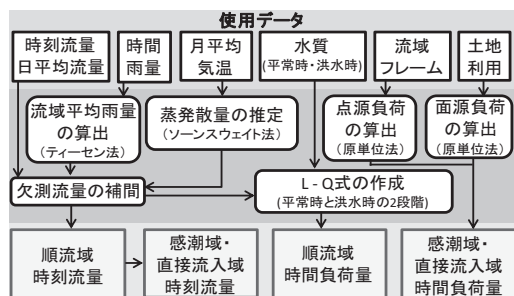


図-2 流入水量・負荷量の推定の流れ

塩田川では流量観測が行われていなかったため、牛津川の比流量を各流域の面積に乗じて両河川の流量を求めた。

b) 順流域の流入負荷量の推定

順流域最下流の観測所の水質データ（1981~2010年）を国土交通省、農林水産省、環境省より収集し、流量と負荷量の関係式（L-Q式）を作成した。本研究では、収集した定期調査と洪水時調査の全データを用い、観測所毎に平常時と洪水時のL-Q式を作成した。その際の両者のしきい値となる流量を段階的に変化させ、相関係数が高くなるL-Q式を探索した。その結果、全河川で $0.1\text{m}^3 \cdot \text{km}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 付近に変化点がみられたため、これを分類基準に用いる比流量とした。

c) 感潮域の流入水量の推定

感潮域と直接流入域の河川流量は、近隣順流域の比流量に各流域面積を乗じて算出した。

d) 感潮域の流入負荷量の推定

点源負荷の推定のため、有明海水域に係る下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書(有明流総)⁷⁾の流域フレーム(1995, 2000, 2005, 2010年)と原単位を用い、これらを乗じて算出した。有明流総で取り扱っていない年の推定には、流域毎に線形補間を行った。面源負荷の推定のため、国土数値情報の土地利用データ(1976, 1987, 1991, 1996, 2006年)から各流域の土地利用種別面積を算出し、有明流総の原単位⁷⁾を乗じて求めた。土地利用データのない年の場合には、流域毎に線形補間を行った。感潮域と直接流入域の各流域の負荷量を、点源負荷と面源負荷の和とした。

3. 研究結果

(1) 流入負荷量の妥当性の検証

本研究の結果と有明流総(2000年)⁷⁾で算定している有明海主要河川流域の流量、COD、T-N、T-P負荷量の比較を図-3に示す。全流域の流量と各負荷量をそれぞれ合計した値の差は、流量で約14%、CODで約6%、T-Nで約16%、T-Pで約8%であった。これらは、有明流総では、塩田川が含まれていないこと、六角川支川牛津川、緑川支川加勢川を分割したことによる流域の区分の相違などが原因と考えられる。

また、本研究の結果と環境省が推定した年(1981~1985, 1990, 1993~1995, 1998~2001年)の各負荷量の報告値³⁾と比較した結果、差の平均はCODで約12%、T-Nで約4%、T-Pで約10%であった。これらは推定に用いたデータ(土地利用、水質等)の相違が原因と考えられる。

次に、本研究で作成したL-Q式と原単位法で推定した負荷量の整合性の確認を行った。本研究で推定した負荷量の平均値と有明流総の原単位を用いて算出した負荷量

(2000年)⁷⁾を比較したものを図-4に示す。筑後川流域で本研究の推定値と有明流総の原単位で算出したCOD, T-N, T-P負荷量に差が見られた。これは、降雨のパラツキによる流量の増減が原因であると考えられる。また、筑後川流域以外の流域では、本研究より推定した負荷量は原単位法で推定した負荷量とほぼ同様のオーダーを示している。以上の比較から、本研究で推定した流量と負荷量はほぼ妥当な数値であると考えられる。

(2) 推定した流入水量・負荷量の経年変化

推定した流入水量, COD, T-N, T-P負荷量は既往の研究⁸⁾から、概ね同傾向の経年変化を示すことが分かっている。流入水量と各負荷量全てで1993年に最大値となり、1994年に最小値となった。各流域に流入水量と各負荷量の30年間の平均値をとった結果を表-1に示す。流入水量とCOD, T-N, T-P負荷量はほぼ流域面積の影響を受けると考えられる。しかし、流入水量では、緑川支川加勢川流域(191.5km²)と嘉瀬川流域(276.4km²)がほぼ同様の値を示している。COD負荷量では、白川流域(480km²)が緑川流域(680.9km²)よりも高い値を示した。T-N負荷量では、緑川支川加勢川流域が緑川流域(680.9km²)よりも高い値を示した。T-P負荷量では、緑川支川加勢川流域(191.5km²)が矢部川流域(450.9km²)よりも高い値を示した。これらの長期的な変動特性を見るため、推定した各流域の流入量と各負荷量をそれぞれの流域面積で除し比流量と比負荷量にし、時空間解析を行うことにより考察を進

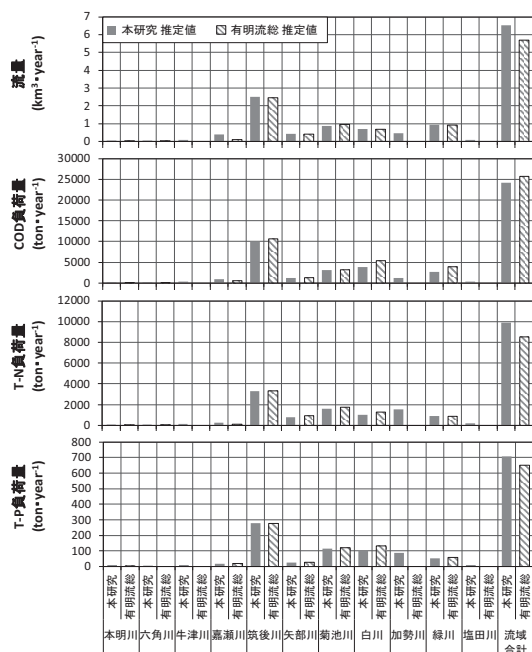


図-3 本研究と有明流総の
流量と各負荷量の比較(2000年)

める。

(3) 流入負荷の時空間解析

a) 流入水量の時空間分布

有明海陸域の比流量分布の経年変化を図-5に示す。緑川支川の加勢川流域の比流量が常に他流域よりも2900m³・km²・day⁻¹以上高い値を示した。加勢川流域には豊富な地下水脈が存在し、江津湖など多数の湧水群が存在している⁹⁾。特に江津湖は年平均湧水量約40万m³・day⁻¹であり、加勢川流域の降水量の約4倍といわれている。その影響を受けて加勢川流域が高い値を示したと考えられる。

1999年の本明川流域付近で他流域よりも高い値を示した。1999年は6月から7月の期間で梅雨前線が活発になり、豪雨となった。それにより本明川流域で多数の洪水被害が生じている。

b) COD負荷量の時空間分布

有明海陸域の比COD負荷量分布の経年変化を図-6に示す。有明海東部感潮域及び直接流入域で他の流域よりも高い値を示した。また、この流域では年々比COD負荷量が平均7.4 kg・km²・day⁻¹減少している。有明海東部感潮域及び直接流入域は、市街地が流域面積の20%を占めており、有明海流入主要河川順流域と比較すると10%以

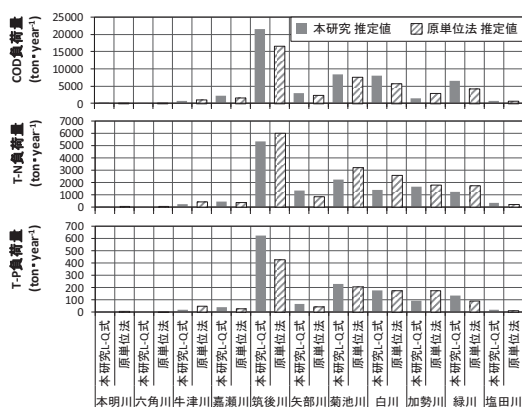


図-4 本研究推定負荷量と
原単位法推定負荷量の比較

表-1 有明海主要河川順流域の30年間の平均流入量

流域名	流域面積 (km ²)	流入水量 (km ³ ・year ⁻¹)	COD負荷量 (ton・year ⁻¹)	T-N負荷量 (ton・year ⁻¹)	T-P負荷量 (ton・year ⁻¹)
本明川	38.0	0.07	452.8	114.9	12.8
六角川	32.3	0.05	263.2	67.7	6.6
牛津川	94.0	0.14	811.9	249.0	18.6
嘉瀬川	276.4	0.53	2260.6	451.0	43.0
筑後川	2316.7	3.76	21574.5	5360.5	623.5
矢部川	450.9	0.66	3044.5	1351.6	69.8
菊池川	897.7	1.18	8320.3	2232.0	230.1
白川	480.0	0.87	8008.1	1405.7	177.2
加勢川	191.5	0.53	1469.8	1654.9	95.8
緑川	680.9	1.13	6526.9	1256.8	134.2
塩田川	101.8	0.16	699.1	376.8	18.9

上高い。過去30年間における有明海陸域の土地利用の変化は市街地が約5%増加、森林が約1.5%減少、田が約2%減少、畑が約1.5%減少と大きな土地利用の変化は見られず、面源負荷の変動は大きくないものと考えられる。従って、有明海東部感潮域及び直接流入域では点源負荷の影響が高いものと考えられる。有明海陸域の西部感潮域・直接流入域と東部感潮域・直接流入域の点源比COD負荷量の経年変化を比較した(図-7)。東部感潮域・直接流入域では西部感潮域・直接流入域より平均4倍程度点源COD負荷量が高いことが分かる。東部感潮域・直接流入域の内訳として生活系が約60%と産業系が約35%占めている。また、生活系・産業系負荷量が経年的に減少しているため、東部感潮域・直接流入域の比COD負荷量が減少していると考えられる。

1993年の白川流域において比COD負荷量が他流域よりも2.5倍程度高い値を示した。白川流域には、「ヨナ」と呼ばれる黒ボク土が多く分布している¹⁰⁾。「ヨナ」には有機物含有量が多く、比重が軽いので土壌が降雨などにより流出しやすいという特徴がある¹¹⁾。白川の雨量データを確認した結果、1993年の白川流域では年間約4,550mmの降水があり、1時間当たりの降水量が20mmを超えた回数が約30回と通年に比べ2.5倍程度高いことが分かった。そのため、白川流域では降雨により「ヨナ」が巻き上げられ、流域の末端に流出したことによってCOD負荷量が高くなったものと考えられる。

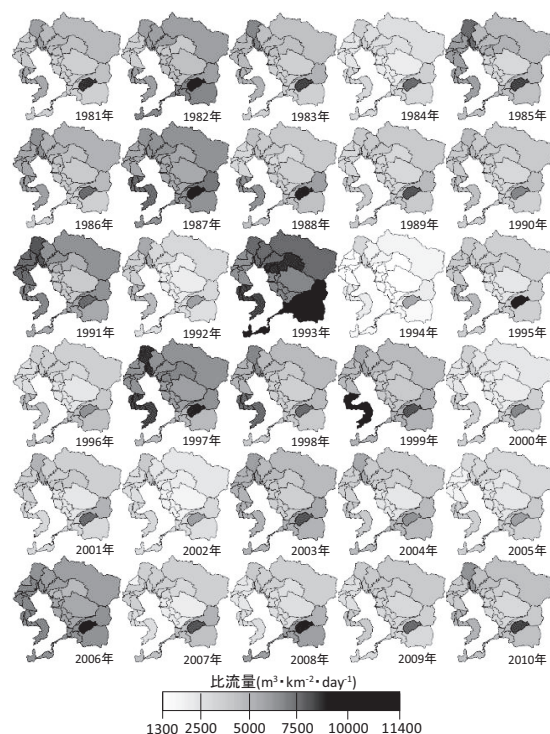


図-5 比流量の時空間分布

c) T-N負荷量の時空間分布

有明海陸域の比T-N負荷量分布の経年変化を図-8に示す。有明海東部感潮域・直接流入域で他の流域よりも高い値を示し、経年的な変化は見られなかった。比COD負荷量と同様の理由から、点源負荷の影響が高いものと考えられる。有明海陸域の西部感潮域・直接流入域と東部感潮域・直接流入域の点源比T-N負荷量の経年変化を図-9に示す。東部感潮域・直接流入域では生活系・産業系負荷量が高いことが分かる。また、点源合計比T-N負荷量は、30年間を通して大きな変化は見られないが、生活系負荷量では2000年から2005年にかけて増加傾向がみられ、産業系負荷量では1981~2010年の期間で減少傾向

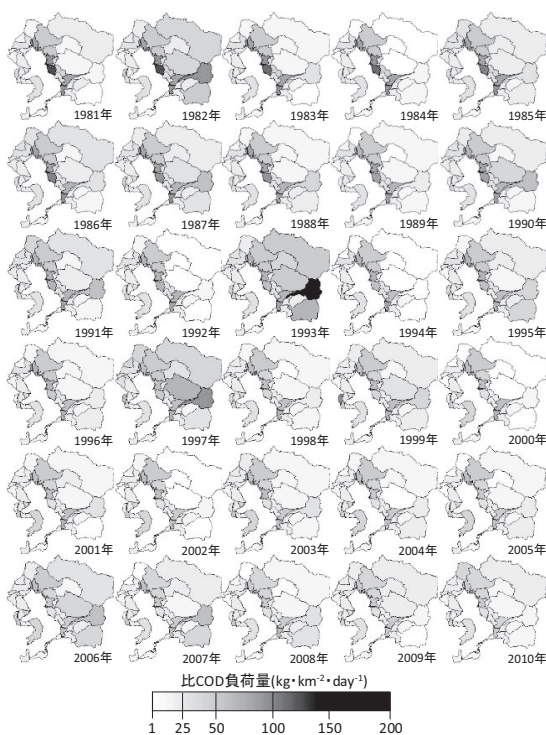


図-6 比COD負荷量の時空間分布

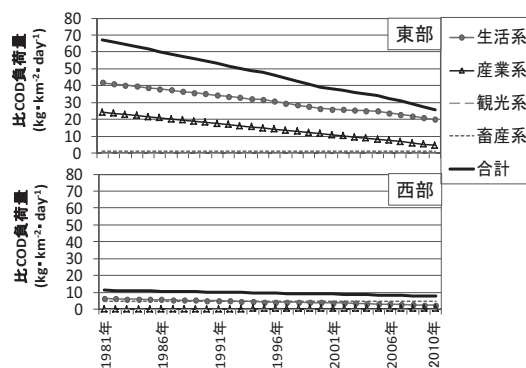


図-7 点源比COD負荷量の経年変化

がみられた。

加勢川流域で比T-N負荷量が常に高い値を示した。加勢川流域の源である江津湖の湧水水質と他河川順流域末端地点の水質データを比較した結果、江津湖の水質の方が最低でも4倍程度高い値を示した。このことにより、加勢川流域の比T-N負荷量が高い値を示したと考えられる。

d) T-P負荷量の時空間分布

有明海陸域の比T-P負荷量分布の経年変化を図-10に示す。有明海東部感潮域及び直接流入域で他の流域よりも高い値を示した。また、この流域では30年間で比T-P負荷量が平均 $4 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 減少している。比COD, 比T-N負荷量と同様の理由から、点源負荷の影響が高いもの

と考えられる。有明海陸域の西部感潮域・直接流入域と東部感潮域・直接流入域の点源比T-P負荷量の経年変化を図-11に示す。東部感潮域・直接流入域では生活系と産業系からの負荷量が高い値を示していることが分かった。また、生活系・産業系負荷量が経年的に減少しているため、東部感潮域・直接流入域の比T-P負荷量が減少していると考えられる。一方で、西部感潮域・直接流入域の比T-P負荷量はほぼ変動が見られなかった。

4. 結論

本研究では1981~2010年の有明海への流入水量、COD、

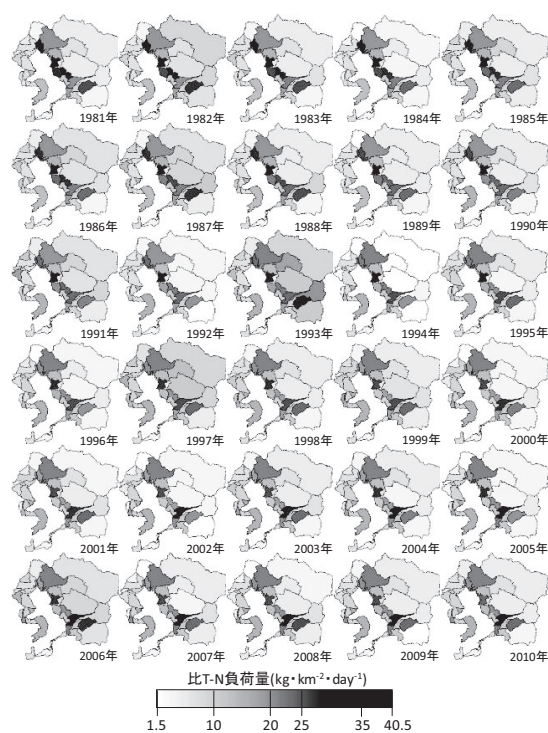


図-8 比T-N負荷量の時空間分布

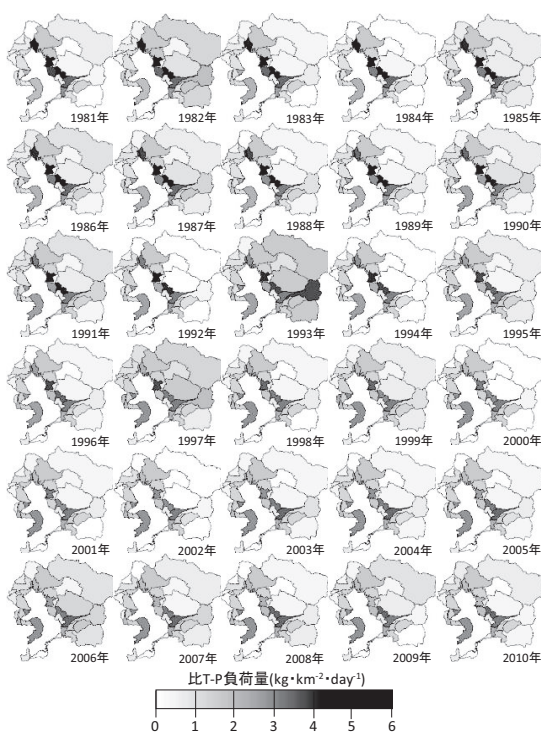


図-10 比T-P負荷量の時空間分布

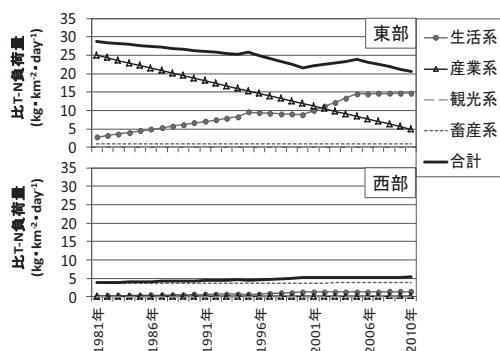


図-9 点源比T-N負荷量の経年変化

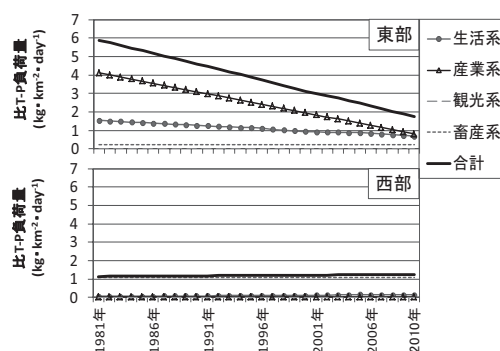


図-11 点源比T-P負荷量の経年変化

T-N, T-P負荷量を推定し、それぞれの時空間分布を作成することができた。その結果から以下の知見が得られた。

- (1) 緑川支川加勢川の比流量が他流域よりも $2900\text{m}^3 \cdot \text{km}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ 以上高い値を示した。また、比T-N負荷量が他の順流域より4倍以上高くなることが分かった。これらは流域内の湧水の影響と考えられた。
- (2) 白川流域の比COD負荷量が他流域よりも2.5倍程度高い値を示した。その原因は、有機物含有量が多く、比重の軽い黒ボク土の影響と考えられた。
- (3) 東部感潮域・直接流入域において、各比負荷量が30年間常に高い値を示した。また、比COD, 比T-P負荷量では減少傾向を示し、その原因は生活系・産業系の負荷の減少と考えられた。

5. 有明海の環境改善に向けた今後の展開

本研究の最終目標は、有明海陸域の環境変化（土地利用、水利用形態、降雨パターン）が有明海の環境に及ぼす影響を定量的に評価することである。今回明らかとなった有明海の流域依存特性を分布型流出モデルに反映させるため、今後、重回帰分析などにより有明海陸域からの流入負荷の流域依存特性を流域依存度として定量化し、流域の変化（市街地割合の変化、降水量の変化等）が流入負荷に及ぼす影響を把握する。そのデータをもとに有明海陸域の分布型流出モデルの構築並びに有明海海洋モデルを構築し、流域圏の環境変化シミュレーションにより、流域圏の管理方策の提案につなげたい。

謝辞：本研究は、平成24年度笹川科学研究助成および科研費基盤研究（A）（21246078、代表者：松永信博）の助成を受けたものである。データを頂いた国土交通省、農林水産省、環境省、気象庁、データ整理にご協力頂いた佐賀大学流域水工学研究室の皆様には謝意を表します。

参考文献

- 1) 堤 裕昭, 木村 千寿子, 永田 紗矢香, 佃 和則, 山口 一岩, 高橋 徹, 木村 成延, 立花 正生, 小松 利光, 門谷 茂: 陸域からの栄養塩負荷量の増加に起因しない有明海奥部における大規模赤潮の発生メカニズム, 海の研究, Vol.15(2), pp.165-189, 2005.
- 2) 小松利光, 矢野 真一郎, 斎田 倫範, 田井 明: 有明海の潮流ならびに物質輸送の変化に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.326-330, 2006.
- 3) 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会: 委員会報告, 2006.
- 4) 朴童津ほか: 有明海の全流域における環境変化が流出量に与える影響の評価, 水工学論文集, Vol.53, pp.481-486, 2009.
- 5) 立川康人, 永谷言, 寶 馨: 分布型流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報, Vol.46, pp.233-248, 2003.
- 6) M.Tezuka, K. Ohgushi: A practical method to estimate missing discharge data, *IAHR-APD*, pp.547-548, 2012.
- 7) 九州地方整備局: 有明海水域に係る下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書, 2005.
- 8) 手塚公裕, 大串浩一郎, 緒方直人: 有明海における陸域負荷の長期変動の推定および赤潮発生に及ぼす流入水量の影響, 水工学論文集, Vol.57, pp.1735-1740, 2013.
- 9) 九州地方整備局: 緑川水系河川整備計画【原案】, 2011.
- 10) 九州地方整備局: 白川河川改修事業, 2009.
- 11) 矢野 紘之, 軸丸 獄: 雲仙の火山性土に関する研究（第3報）雲仙岳東北部の火山灰土壌の理化学的性質, 佐賀大学農學彙報, Vol.40, p.55-66, 1976.

(2013. 7. 19 受付)

BASIN-DEPENDENT CHARACTERISTICS OF INFLOW LOADS FROM THE ARIAKE SEA BASIN

Naoto OGATA, Koichiro OHGUSHI and Masahiro TEZUKA

Environmental deterioration occurs in the Ariake Sea, such as frequent red tide, recently. It is necessary to understand the long-term change of inflow loads to elucidate the phenomena of this enclosed bay. However, since most of the previous studies often adopted some representative years for the estimation of inflow loads without continuous observations, the long-term estimation becomes insufficient for practical uses. In this study, space-time analysis is carried out to estimate the inflow loads to the Ariake Sea using GIS-based analysis from the authors' previous study. As a result, the basin-dependent characteristics for each river basin of the Ariake Sea basin has been clarified. Especially, springs in the Kase River basin of the Midori River basin in Kumamoto prefecture and high level organic matter contents from the Shira River are pointed out.