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

ESTIMATE OF LONG-TERM VARIATION OF INFLOW LOADS, AND
THE EFFECT OF INFLOW DISCHARGE ON RED TIDE IN THE ARIAKE SEA

手塚公裕¹・大串浩一郎²・緒方直人³

Masahiro TEZUKA, Koichiro OHGUSHI and Naoto OGATA

¹正会員 博士（工学） 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター（〒840-8502 佐賀市本庄町1番地）

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

³学生会員 佐賀大学理工学部都市工学科（〒840-8502 佐賀市本庄町1番地）

It is necessary to grasp a long term inflow load for the study of enclosed bay. The Ariake Sea is one of such bay and there are some missing data of river discharge flowing into this bay. In this study, our developed method to estimate the missing discharge data is applied to all major rivers flowing into this bay. Amounts of inflow loads are calculated using L-Q curves and pollutant load factors. Long term changes of the river discharges and loads into the bay are estimated from 1981 to 2010. A characteristic of inflow discharge's change and a relationship between red tide occurrences and the inflow discharges are also discussed. The inflow discharge and loads of COD, T-N and T-P are found not to be changing in the Ariake Sea from 1981 to 2010. An increase of the inflow discharge is considered to be a trigger for a red tide occurrence not in winter but in the season between spring to autumn in the Ariake Sea.

Key Words: Ariake Sea, inflow river discharge, inflow loads, long-term variation, red tide

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の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、環境異変の原因解明と対策が進められてきた。しかし、明らかにされていない問題は未だに数多くあり、その最大の原因は過去のデータの不足と考えられる。

閉鎖性の強い有明海は陸域の影響を強く受ける。従って海洋環境変化の原因を解明するためには陸域負荷の長期変動を把握する必要がある。しかし、1981～2010年における有明海流入一級河川の順流域末端地点で時刻流量データに欠測がない年は2008年のみであり、データの欠測が陸域負荷を推定する際の障害となっている。

環境省有明海・八代海総合調査評価委員会の報告書¹⁾では、1965～2001年の年流入負荷量の一部が算定されている。また、朴ら²⁾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のみが対象であり長期的変動の検討が不十

分である。一方、秋季における降雨は、流入負荷を増大させ赤潮を誘発すると考えられている³⁾。しかし、流入負荷と赤潮の長期変動や流入水量と赤潮発生時期の関係については明らかにされていない。

以上のことより、本研究では、過去30年間（1981～2010年）の有明海流入河川流量データの欠測を補間し、流入水量の長期変動を推定すると共に流入水量の変動特性および流入水量と赤潮発生の関係について検討した。

2. 流入水量・負荷量のデータセットの構築

(1) 流域区分

本研究における有明海流域のブロック区分（図-1）は、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）⁴⁾をベースとし、全一級河川および塩田川（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、直接流入域は県界と流域界で区分した。有明流総では六角川水系牛津川と緑川水系加勢川の順流域が感潮域に区分されていたが、本研究ではGIS解析により順流域と感潮域に区分した。さらに、有明海に流入する区域毎

にブロックをまとめ、西部、東部、奥部に区分した。

(2) 有明海に流入する水量と負荷量の推定方法

流入水量と各負荷量は以下の方法で算出した（図-2）。

a) 順流域の河川流量

順流域最下流の観測所の時刻流量データ（1981～2010年）を収集し、データに欠測がある場合は、図-3に示す欠測流量データの補間方法⁵⁾に従って補間した。

欠測流量の補間に用いたタンクモデルパラメータの同定は、RMSE(Root Mean Square Error)が小さくなるようにSCE-UA(Shuffled Complex Evolution)⁶⁾を用いて探索し、局所解に陥ったと判断された場合は個別にチューニングした。同定には、欠測を補間する年に近く欠測のない年のデータを用いた。計算流量と欠測補間をする年に存在する実測流量を比較して誤差が大きい場合や前後の年と不連続な場合、流出率が近隣流域と著しく異なる場合等は再度チューニングを行った。既往の検討⁵⁾を参考にし、タンクモデルは直列4段とした。流域平均雨量はティーンセン法、蒸発散量はソーンスウェイト法で算出した。

流量観測所の時刻流量データを整備した後、各流量観測所の比流量を求めた。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ブロックの面積に掛けて両河川の流量を求めた。

河川流量のデータセット構築過程でデータエラーに関する問題が生じた。特に深刻な問題は、観測所と時間が同じで流量が異なるものである。これはデータベース作成時の転記ミスや、水位と流量の関係式の更新による流量データの変更等が原因と考えられた。これらのデータは、前後の年との連続性、雨量との関係等から妥当と判断されるものを採用した。また、欠測がないデータであっても明らかな不連続性がみられるケースもあった。例えば、1年間の連続データが前後の年と不連続で、ベースも常に高く、明らかに他の観測所のデータと推測されるケース、 $0\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ のデータが不連続に生じ自動水位

図-1 有明海流域の観測点とブロック区分

観測計のトラブルがあったと推測されるケースがあった。これらは明らかなエラー値と判断し、欠測として扱った。

b) 順流域の負荷量

順流域最下流の観測所の水質データ（1981～2010年）を収集し、流量と負荷量の関係式（L-Q式）を作成した。有明流総⁴⁾ではL-Q式を3段階に分類し、定期調査を[平常時]、洪水時調査を[洪水時]に区分し、間を[中間時]としていた。しかし、この分類は流量と負荷量関係を基にしたものではなく、3つのL-Q式は不自然に結合されていた。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。分類基準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、分類基準に用いる比流量とした。

L-Q式の作成過程でもデータエラーに関する問題が生じた。観測所と時間が同じで水質データが異なることがあった。エラーはT-N、T-Pで確認されたため、異なる分析方法（総量を一括して定量する方法、形態別で定量した後に合算する方法等）の結果が記載されていた可能性がある。本研究では無機態栄養塩とのバランスを考慮し、妥当と考えられる水質データを採用した。

c) 感潮域と直接流入域の河川流量

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ブロック面積を乗じて算出した。

d) 感潮域と直接流入域の負荷量

点源負荷は、有明流総⁴⁾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は、ブロック毎に線形補間を行った。面源負荷は、国土数値情報の土地利用

図-2 流入水量・負荷量の算定方法

図-3 欠測流量データの補間方法

データ（1976，1987，1991，1996，2006年）から各ブロックの土地利用種別面積を算出し，有明流総の原単位を乗じて求めた（図-4）．土地利用データの無い年は，ブロック毎に線形補間を行った．感潮域と直接流入域の各ブロックの負荷量は，点源負荷と面源負荷の和とした．

3. 結果と考察

(1) 流入水量・負荷量の経年変化

1981～2010年の有明海における降水量，流入水量，

図-5 降水量，流入水量，各負荷量の経年変化

COD，T-N，T-P負荷量は，概ね同様の経年変化を示した（図-5）．流入水量と各負荷量は降水量の変動に伴い変化しており，1993年に最大値，1994年に最小値を示した．本研究の結果と環境省が推定した年（1981～1985，1990，1993～1995，1998～2001）の報告値¹⁾を比較した結果，差の平均はCODで約12%，T-Nで約4%，T-Pで約10%であった．これは推定に用いたデータ（土地利用，水質等）やブロック区分の相違が原因と考えられる．

1981～1990年，1991～2000年，2001～2010年の3期間の全ての組み合わせ（3パターン）でF検定とt検定を行った結果，流入水量，COD，T-N，T-P負荷量の全項目，全組み合わせで有意差がなかった（ $p>0.05$ ）．環境省の報告書¹⁾では断続的に各負荷量を推定して，昭和50年代以降は減少傾向にあると記述しているが，経年的な各負荷量の変化はないと考える方が妥当である．

有明海流域の約3割を占める筑後川流域は，全期間平均で流入水量，各負荷量の約3割を占めていた．一方，有明海流域の約2割を占める直接流入域は，全期間平均で流入水量の約2割，COD，T-N負荷量の約3割，T-P負荷量の約4割を占めており，排出される負荷量は筑後川と同等以上であることが明らかとなった．流域面積の割合よりも負荷量の割合が多くなっていたのは，直接流入域には市街地が分布しており，人為的負荷が多いことが原因と考えられる．

各年の流入水量と各負荷量の相関を図-6に示す．流入水量と各負荷量の相関係数は0.85以上であり，強い正の相関がみられた．1981～2010年の期間においては，流入水量と負荷量の関係に及ぼす流域の土地利用や水利用の変化等の人為的影響が軽微であったと考えられる．そこで，本論では流入水量に着目して考察を進める．

(2) ブロック別比流量の経年変化

ブロック別の年平均比流量の経年変化を図-7に示す．

図-6 流入水量と各負荷量の相関

図-4 有明海流域の土地利用の変遷

緑川水系加勢川順流域の比流量が他ブロックに比べて常に高い値を示した。このブロックには、1日約40万 m^3 の湧水がある江津湖や多数の湧水群があり⁷⁾、その影響を受けたものと考えられる。一方、矢部川流域、菊池川流域は他の地域よりも低い傾向がみられた。これらの流域は山林が多く、土地利用の影響を受けている可能性が示唆される。1999年の西部では他ブロックよりも高い値を示した。この年の7月には豪雨（梅雨）があり、本明川流域では多数の洪水被害が生じている。このように、ブロック別の比流量の平面分布を時系列で俯瞰することで、有明海流域の特性の理解を進めることが可能となった。

(3) 流入水量の経月変化

有明海に流入する地域別（西部・東部・奥部）の流入水量および全流入水量に占める各地域の割合の経月変化を図-8に示す。1981～2010年の平均流入水量の割合は、流域面積の割合とほぼ同じで、奥部（約55%）、東部（約38%）、西部（約7%）の順で多かった。また、全流入水量に占める各地域の割合には、奥部と東部に周期性がみられた。奥部では冬季に低く、夏季に高い傾向があり、東部では逆の傾向があった。流域面積は奥部より東部で小さいが、冬季の降水量と流入水量は奥部と東部で同程度であった。従って、この周期性は降雨の流出率もしくは湧水量の相違が影響していると推測される。

1988年と2010年の年間流入水量は約 $14\text{km}^3 \cdot \text{year}^{-1}$ と同程度であったが、ピークが現れる月は1988年では6月、2010年では7月と異なった。また、年間流入水量の最大

値は1993年であったが、月間流入水量の最大値は1982年7月にあり、ピークが異なった。このように月単位にデータを細分化することで年単位では分からなかった流入水量の変動特性を把握することができる。

(4) 全流入水量の季節変動特性の分類

流入水量の経月変化から年間流入水量が同程度であっても流入するパターンが年により異なる可能性が考えられた。そこで、1981～2010年の年毎の全流入水量の月データをクラスター分析により類型化し、流入水量の特性を調べた。その結果、全流入水量は5つのクラスターに分類できることが明らかとなった（図-9）。各クラスターのデータを平均化し、クラスターの特徴を明確にした（図-10）。各クラスターの流入水量の経月変化は次のような特徴があった。クラスターAは7月にピークがあり量は平均的、クラスターBは7月にピークがあり量が多い、クラスターCは7月にピークがあり、量が多く、

図-8 流入地域別の流入水量の経月変化

図-7 ブロック別の年平均比流量の経年変化

6月と8月も多め、クラスターDは6月にピークがあり量は平均的、クラスターEは通年で量が少ない、という特徴であった。

1981～2010年における各クラスターの発生頻度は、Aが10回、Bが6回、Cが1回、Dが7回、Eが6回であり、発生に周期性やトレンドはなかった。これは流入水量の変動が、流域の土地利用や水利用の変遷に伴う経年的な降雨流出率の変化よりも、年による降水量の相違に起因していることを示唆している。

(5) 有明海における流入水量と赤潮の関係

有明海における流入水量と赤潮（最大細胞数・最大面積）の時系列変化を図-11に示す。図中の最大細胞数と最大面積は各赤潮が発生していた全期間にプロットしている。また、クラスター分析により分類した流入水量の

パターンも付記し、赤潮との関係を検討した。なお、赤潮データは水産庁九州漁業調整事務所の資料（九州海域の赤潮）を用いた。ただし、2004年以降は最大面積の不明な赤潮が多いことに留意する必要がある。

春季から秋季にかけて発生する赤潮は、大部分が降雨出水の数日以内に生じ、流入水量に応じて赤潮の最大細胞数と最大面積が大きくなる傾向がみられた。これは流入水量が多い時には栄養塩の供給が増えるためである（図-6）。しかし、その傾向に合致しないケースもあった。クラスターC（2003年）では、流入水量が特に多いが、最大細胞数と最大面積は他のクラスターよりも低かった。これは滞留時間の低下が原因と考えられる。また、流入水量の少ないクラスターEであっても、赤潮が他のクラスターと同様に発生することがあった。従って、流入水量の増加は赤潮発生トリガーとなるが、赤潮の発生規模は海洋構造、日射量、赤潮の構成種、捕食者等の影響を受けるものと考えられる。一方、冬季の赤潮は、他の時期とは異なり、流入水量の増加していない場合でも発生するケースが多くみられた。

春季～秋季（4～10月）と冬季（11～3月）における流入水量と赤潮発生規模指標の関係を図-12に示す。流入

図-9 クラスター分析による全流入水量の分類

図-10 各クラスターの流入水量の経月変化

・最大細胞数と最大面積は、赤潮発生期間の全てにプロットした。

・発生海域が福岡県全域の場合、福岡県の海域面積171km²を最大面積とした。

図-11 有明海における流入水量と赤潮（最大細胞数・最大面積）の時系列変化

水量と赤潮発生規模指標は、堤らの研究³⁾を参考とした。流入水量は赤潮発生前40日間の合計水量とし、赤潮発生規模指標は赤潮の最大面積と発生期間の積とした。春季～秋季の赤潮は、赤潮発生前40日間の流入水量0.4～8km³の範囲で生じていた。また、0.4～5km³の範囲では流入水量が多いほど赤潮発生規模指標の最大値が大きくなる傾向がみられ、最大で35,000程度に達した。一方、冬季の赤潮は0.4～2km³の範囲で赤潮が発生していた。冬季の流入水量は少ないが、赤潮発生規模指標が10,000を超える大規模な赤潮が多数あった。赤潮発生規模指標を同一流入水量時（流入水量0.5～1.0km³）の平均値と比較すると、春季～秋季（約1,200）よりも冬季（約3,900）で有意に高かった（p<0.01）。これらのことから冬季の赤潮は流入水量以外の要因で発生し、春季～秋季の赤潮とは発生メカニズムが異なると推測される。

冬季における赤潮は流入水以外からの栄養塩の供給を受けて発生していると推測される。一般に、底質からの栄養塩溶出は温度の低い冬季では少ないため、陸域と底質以外からの栄養塩の供給源が考えられる。林ら⁸⁾は、秋季から春季にかけてのノリ養殖に用いる酸処理剤が赤潮を誘発している可能性を指摘している。しかし、ノリ養殖時に有明海に投入される酸処理剤中の栄養塩量は赤潮の発生に影響しないとの見解もある⁹⁾。冬季の赤潮に関する研究は少なく、有明海の環境異変を解明する上で重要な課題と考えられる。

流入水量別の赤潮発生規模指標の経年変化を図-13に示す。なお、欠測の多い2004年以降のデータは除外した。流入水量と赤潮発生規模指標の関係に経年変化はみられなかった。一方、赤潮発生規模指標と発生回数は段階的な増加傾向があり、有明海の赤潮は1990～1991年頃に一度目の大規模化が生じ、1997～1999年頃に二度目の大規模化が起きたと考えられる。堤ら³⁾は、1990～2001年の秋季のデータを解析し、諫早湾潮受け堤防の影響を受け1998年以降に赤潮が大規模化したと指摘している。この赤潮の大規模化は本研究で示した二度目の大規模化にあたる。潮受け堤防締め切り以前に生じた一度目の赤潮の大規模化は、これまで把握されていなかった現象であり、今後その原因の解明が必要である。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 1981～2010年の有明海への流入水量、COD、T-N、T-P負荷量の連続データを推定した結果、全項目で

図-12 時期別の流入水量と赤潮発生規模指標の関係

経年的な変化がないと考えられた。また、直接流入域の負荷量が他流域よりも多いことが分かった。

- (2) 流入水量の時空間分布から、有明海の流域特性が明らかとなった。また、クラスター分析により全流入水量を5つのクラスターに分類することができた。
- (3) 春季～秋季の流入水量の増加は赤潮発生のトリガーとなることが分かった。一方、冬季の赤潮は流入水量の影響を受けないことが明らかとなった。また、有明海の赤潮は、1990～1991年頃に一度目の大規模化が生じ、1997～1999年頃に二度目の大規模化が起きたと考えられた。

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) 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会：委員会報告，2006。
- 2) 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。
- 3) 堤裕昭ほか：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，Vol.12(3)，pp.291-305，2003。
- 4) 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。
- 5) M.Tezuka, K. Ohgushi: A practical method to estimate missing discharge data, IAHR-APD, pp.547-548, 2012。
- 6) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resource Research, Vol.28, No.4, pp.1015-1031, 1992。
- 7) 九州地方整備局：緑川水系河川整備計画【原案】，2011。
- 8) 林重徳ほか：有明海湾奥部における干潟環境再生のための地盤工学的視点からの取組み，環境地盤工学シンポジウム発表論文集，Vol.7，pp.1-10，2007。
- 9) 日本海洋学会編：有明海の生態系再生をめざして，pp.164-165，恒星社厚生閣，2005。

(2012. 9. 30受付)

図-13 流入水量別の赤潮発生規模指標の経年変化