

課題名 RFb-1102 播磨灘の栄養塩異変の解明と栄養塩流入負荷の変動要因の研究

課題代表者名 石塚 正秀 (国立大学法人香川大学工学部安全システム建設工学科
自然環境マネジメント分野石塚研究室、准教授)

研究実施期間 平成23～24年度

累計予算額 13,795千円(うち24年度6,131千円)
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 栄養塩異変、播磨灘、発生負荷量、栄養塩形態、播磨灘流域圏、河川環境、
下水道整備、総量規制、COD・窒素・リン

研究体制

- (1) 陸域負荷量変動の総括と沿岸環境との関連解明(国立大学法人香川大学)
- (2) 陸域からの栄養塩負荷量変動(私立大学法人神戸山手学園)

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

近年、播磨灘は栄養塩濃度が低下し、「栄養塩異変」とよばれている。ここ数年、海水中の栄養塩濃度が急激に低下していると報告されており、この急激な低下の原因は明らかになっていない。瀬戸内海がきれいになったことにより、ノリの色落ちやイワシ類・アサリ等の漁獲量の低迷など、水産業に深刻な問題が生じているという皮肉な状況にある。緊急に原因解明し、対応策をとることが漁民の生活維持のために必須条件になっている。

研究代表者はこれまで、河川の栄養塩と植物プランクトンの種構成変化、河川流出解析、流域の負荷解析などの、陸域の栄養塩環境と水動態について研究を実施してきた⁴⁾。その結果、堰による一時的な停滞水域の形成が溶存ケイ素濃度と植物プランクトンの種構成変化に大きく影響するといった「水質の質」の変化を指摘し、研究に取り組んできた。

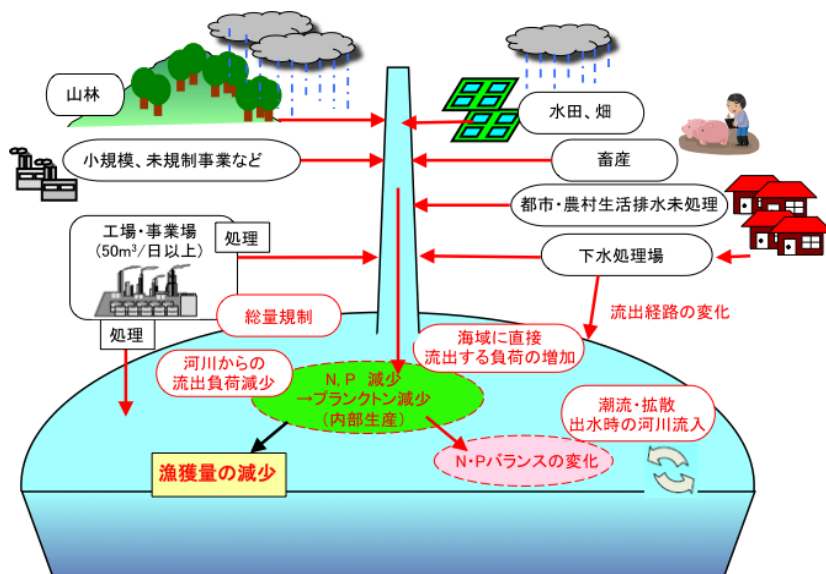


図1 陸域からの汚濁物・栄養物の流出過程

森・川・海の連続性の重要性が指摘され、里山や里海といった環境保全の取組が提唱されてはいるが、何故、近年、海域の栄養塩濃度が急激に低下し、ノリの色落ちなどの水産被害が頻発するのかについて、その原因が明らかにされていない。陸域からの窒素・リンの海域への流入過程は、様々な発生源から発生し、自然・社会によって複雑に変化している。近年の海水中の栄養塩濃度の急激な低下要因とそのメカニズムを明らかにすることは、水産業の低迷要因の解明とその対策をたてるうえで重要であり、さらに、総量規制の効果の科学的根拠を示し、水産業進展の観点からみた海域栄養塩を適正に維持するために河川の栄養塩濃度をどの程度まで許容すべきかを明らかにすることにつながるきわめて重要な課題研究である。

2. 研究開発目的

播磨灘の栄養塩濃度が低下し、ノリの色落ちやカキの質の低下など、水産業が深刻な状態になり、打撃を受けているがその原因が明らかではない。本研究では、陸起源の栄養塩流入に着目し、播磨灘の栄養塩異変の原因究明と植物プランクトンの生物量と種組成に与える影響を明らかにするために、1) 陸域からの栄養塩負荷量の推定、2) 下水処理水放流など人間活動との関係を調査・解析する。そして、3) 現況の総量規制の妥当性に対する科学的根拠の提示を目指すものである。栄養塩異変の原因解析の達成目標は1) 播磨灘に河川等から流入する窒素、リン負荷量を明らかにする。2) 観測データのない河川流量を推定し、当該水域の水質の南北偏差の要因を明らかにする。3) 下水放流量を調査し、河川負荷量、海域水質の関係を明らかにする。4) 流出モデルにより、河川から海域への栄養塩負荷量の時間変化を推定し、播磨灘および備讃瀬戸海域との比較において、栄養塩、プランクトン種組成に与える変動要因を、洪水出水時も含めて明らかにする。これにより、栄養塩異変の原因を明らかにする。

3. 研究開発の方法

(1) 陸域負荷量変動の総括と沿岸環境との関連説明

1) 広域水質調査

播磨灘を囲む香川県東讃域および淡路島、兵庫県播磨地域の計10ヶ所の河川において水質調査を1ヶ月に1回の頻度で定期的に行った(図2)。COD、窒素、リン、の形態別の分析を行った。

2) 播磨灘のデータ解析

香川県水産試験場および兵庫県農林水産総合技術センターが実施している浅海定線調査の結果を用いて、播磨灘の水質データを収集、整理して解析し、出水時の海域水質の変化や栄養塩形態を調べる。

3) 出水時の河川水質調査

台風や前線に伴う出水時における栄養塩形態の変化を調べるために河川水質調査を集中的に行った。

4) 河川流量シミュレーション

国土数値情報を用いた地形・標高・土地利用データの収集とGISを用いた可視化を行い、2 km間隔のグリッドを作成した。入力データには、流域の範囲内もしくは近傍にある気象庁アメダス観測所の1時間毎の降水量データおよび気温データを用いて、流出解析を行った。数値モデルには、石塚・江種(2008)で使用した分布型水文流出モデルを適用した。

5) 海域流動シミュレーション

数値モデルには、EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)を用いて、ハインドキャストイングを実施した。計算範囲は、西側境界は備讃瀬戸西部、南側境界は紀伊水道南部とした。格子サイズは、水平方向に1 km四方、鉛直方向に σ 座標15層とした。12ヶ所の一級河川と27ヶ所の二級河川の河川流量、気象条件(高松地方気象台)を非定常条件として与えた。

6) ケーススタディ1: 下水処理場による総量規制の緩和影響の検討

下水処理場における除去率を変化させることで、下水道範囲内から発生する負荷量を再計算し、除去率が変化することで、負荷量が過去のどの時期と同じ値になるかについて検討した。対象は、加古川下流域下水道、加古川上流域下水道、揖保川流域下水道、単独公共下水道とした。ここでは、2005年を基準として、下水道からの発生負荷量が多い生活系負荷量を対象とした。

7) ケーススタディ2: 河川水質の変化に伴う海域濃度変化への影響

上記5)で示した数値モデルを用いて、播磨灘の主要な河川である加古川、揖保川、市川、明石川において、ある一定のトレーサ濃度を連続的に与えて河川水の広がりを調べた。また、トレーサ濃度を増加させたケーススタディを実施し、河川水質変化(溶存態栄養塩濃度の増加を想定)による河川水の広がりの変化を調べた。

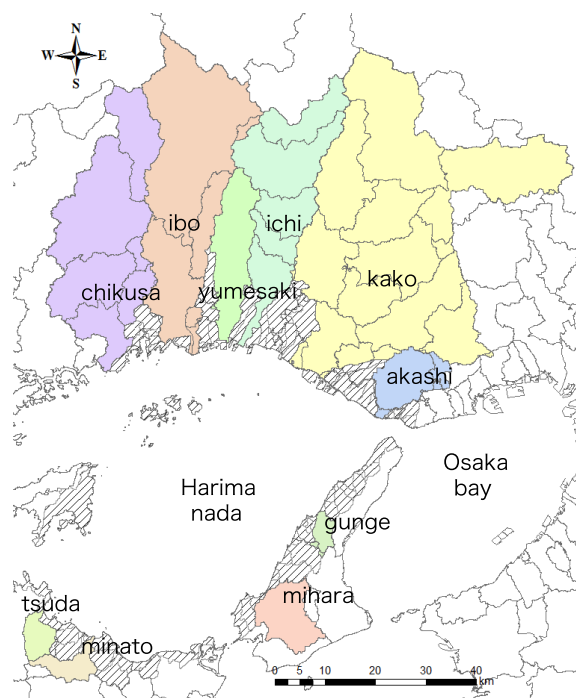


図2 播磨灘を囲む研究対象河川流域

(2) 陸域からの栄養塩負荷量変動

1) 社会基盤データの空間情報解析

負荷量解析に必要な社会基盤データの空間分布図を作成した。対象は、人口、水田・畑・建物用地・山林などの土地利用、工業統計、下水道等生活排水処理範囲である。播磨灘流域情報の作成には、行政区域(面)、海岸線(線)データ、河川(線、点)、標高・傾斜度5次メッシュ、流域メッシュを用いた。生活系情報の作成には、国勢調査より、人口統計メッシュデータ(1kmメッシュ)、産業系情報の作成には、(財)経済産業調査会 経済統計情報センターより、産業別の工業統計メッシュデータ(1kmメッシュ)、ノンポイントソース(土地系)情報の作成には、国土数値情報ダウンロードデータサービスより、土地利用細分メッシュデータを用いた。そして、各データは流域メッシュデータを用いて流域圏もしくは河川流域毎に切り取った。これらを、GISソフト(ArcGIS)を用いて可視化・解析した。

2) 既存の河川水質調査データの収集・解析

明石川流域を対象として、13地点の採水地点の中から代表的な5地点の採水地点における水質項目を解析した。長期的な河川水質・流量には、年4~12回測定されている公共用水域データを使用した。

3) 下水処理場における排水量のヒアリング

明石川流域の下水処理場（玉津処理場）においてヒアリングを行い、玉津処理場からの放流水、雨水排水量の提供依頼および水処理技術の調査を行った。放流水については、玉津処理場業務報告書（1981年度～2008年度）をもとにデータ整理を行った。

4) 播磨灘流域圏における発生負荷量の空間分布の推定

a) 生活系

人口統計メッシュデータを用いて、人口総数から生活系負荷量を算出した。はじめに人口分布図を作成し、さらに、下水道計画図（兵庫県、2012）をもとに下水道等整備範囲図をデジタル化し、人口分布と合わせて、下水道範囲内人口を算出した（兵庫県のみ）。これらの人口データと1人1日当たりの汚濁負荷量の参考値（g/人/day）と各生活排水処理の除去率を乗じて、生活系発生負荷量を算出した。

b) 産業系

工業統計年表から排水量原単位（ $\text{m}^3/\text{day}/\text{百万円}$ ）と環境省調査結果から業種別平均水質濃度（ mg/l ）を乗じて算出した原単位（ $\text{g/day}/\text{百万円}$ ）を産業系負荷量原単位と設定し、工業統計メッシュデータ（出荷額：万円）と乗じて産業系発生負荷量を算出した。しかし、原単位法では産業系発生負荷量を十分評価できなかったため、上記の算出方法に加えて、環境省の算定結果を参考にして産業系発生負荷量の補正値を算出し、負荷量を補正した。

c) その他系

土地の原単位（環境省、2007）と土地利用面積を用いて、ノンポイントソースからの負荷量（土地系負荷量）を算出した。なお、環境省が示しているその他系の負荷量には、土地系以外に畜産系が含まれているが、畜産系のデータは入手困難であったことと、他の負荷量と比較して少ないことから、本研究では土地系負荷量のみを検討した。

4. 結果及び考察

(1) 陸圏負荷量変動の総括と沿岸環境との関連解明

1) 河川水と海水の栄養塩形態の比較

図3は、同一期間に行われた播磨灘流域圏の河川と播磨灘海域（原田ら、2013）の栄養塩形態の割合を比較した結果を示す。播磨灘のDIN（溶存態無機窒素）、DON（溶存態有機窒素）、PON（懸濁態有機窒素）の割合を算定すると、それぞれ約1割、約7割、約2割の結果が得られた。窒素について、河川と海域では形態が異なることが分かった。つまり、海域ではDINの割合が大幅に減少し、DONが増加した。ただし、海域においても窒素の多くは溶存態として存在しており、PONの割合は河川も海も低いことが分かった。

リンについては、海水のDIP（溶存態無機リン）、DOP（溶存態有機リン）、PP（懸濁態リン）の割合は、それぞれ約3割、約4割、約3割であり、河川と海域でDIPの割合がほぼ同程度の3～4割であった。リンの形態は、河川と海域間において窒素ほどの大きな差異はみられなかった。DINとDIPの比較でみると、海ではNがPよりも少ない結果となった。

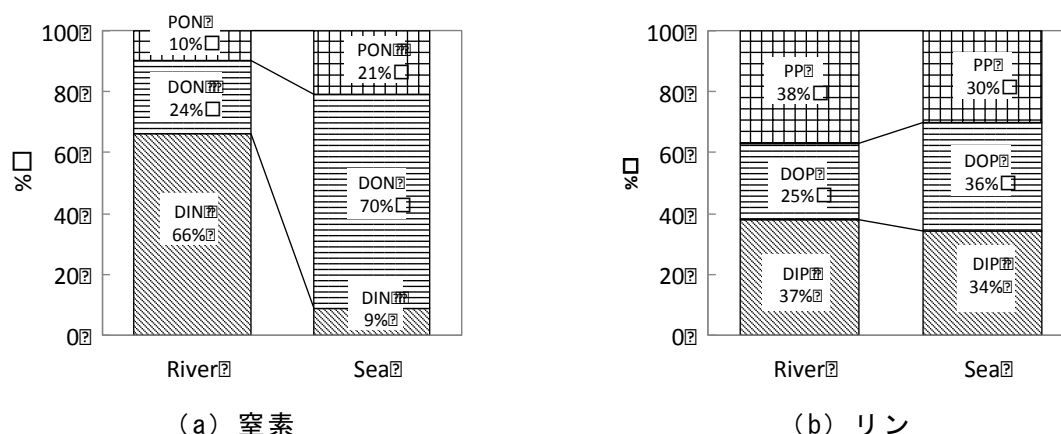


図3 播磨灘流域圏における河川と播磨灘の栄養塩形態割合の比較

（2012年4～10月の平均値）（海域の結果は、原田ら（2013）を用いた。河川の平均値は、各河川の割合に対する平均とした。）

2) 播磨灘流域圏における河川流入の特徴と出水の影響

播磨灘は、北は播磨、南は四国、東は淡路島、西は小豆島に囲まれている。それら陸域から淡水が流入する（図2）。図4は各四方面からの1年間の河川流量を示す。播磨域に流入する河川流量のうち、本州側（播磨域）からの河川流入量が流域圏全体の約85%を占める結果が得られた。この割合は2002年と2003年でほぼ同じであった。また、出水時に流入する割合（出水日数を30日とした場合）は、1年間の総流量のうち約35～60%を占めていることがわかった。つまり、播磨灘の北と南では、海域水質の特徴が大きく異なる。つまり、播磨灘に流入する河川流量は本州側（播磨域）からの流入量が多く、播磨灘の北と南では、海域水質の特徴が大きく異なると考えてよいといえる。播磨灘の北部では河川水が海域水質におよぼす影響が強い結果が定量的に示された。とくに、出水時に短期的に流入する河川流量が多く、播磨灘の海域環境を考察する際には河川流量の空間偏差や出水時の短期的な河川流出の影響を考慮することが重要であることが示された。

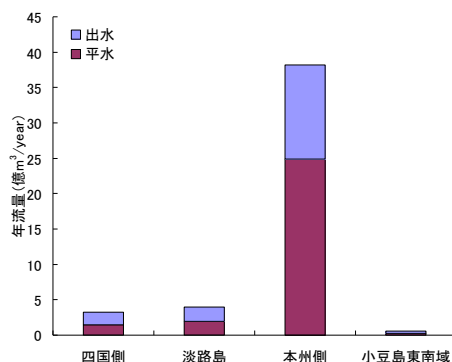


図4 播磨灘に流入する河川流量の空間的特徴および平水流量と出水流量の割合（2003年）

3) 出水時における河川の形態別栄養塩濃度の時間変動特性

図4の結果より、出水時の河川流入量の割合が大きい結果が示された。また、図3より、平水時の河川水の栄養塩形態として、溶存態が多い結果が示された。そこで、出水時における河川水の栄養塩形態を調べる観測を行った。出水時における河川水中の栄養塩の形態別特徴の時間変化を図5に示す。出水直後の6月19日18時40分にPONが高い値を示す結果が得られた。PONは3.29 mg/lと最も高い値を示した。その後、PONは減少し、21日の降雨で再び増加したが、PONは19日の値までは大きくならなかった。その後、PON濃度は減少した。割合としてみると6月19日のピーク時にPONが64%とTNの半分以上を占めており、出水時のTN増加には懸濁物質が大きく影響する結果が示された。なお、図には示していないが、リンについても、6月19日18時40分にPP濃度が2.32 mg/lと最も高くなる結果が得られた。割合としてみると6月19日のピーク時にPPが96%とTPのほとんどを占める結果が得られた。つまり、出水時における栄養塩形態は平水時と大きく異なり、かつ、河川流量も多く、海域においてより広範囲に広がることから、海域流入後の懸濁態の挙動も重要であることが示唆される。

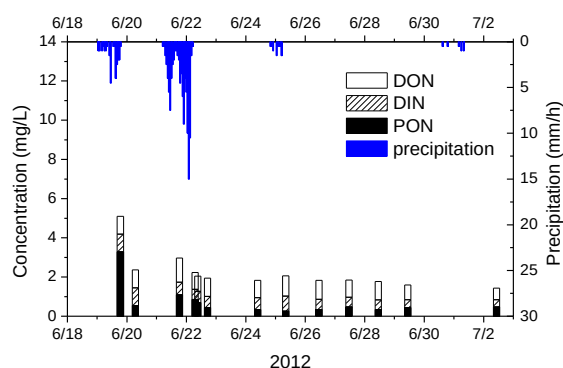


図5 出水時における河川（新川）における窒素の形態別時間変化

4) ケーススタディ 1：下水処理場による総量規制の緩和影響の検討

本節と次節では、播磨灘流域圏における陸域からの負荷量の変化を想定した解析結果を示す。具体的には、下水処理場による総量規制の緩和効果の検討を行った。ここでは、下水処理場における除去率を変化させることで、下水道整備範囲内から発生する負荷量を再計算し、除去率が変化することで、

生活系負荷量が過去のどの時期と同じ値になるかについて検討した。対象は、加古川下流流域下水道、加古川上流流域下水道、揖保川流域下水道、単独公共下水道とした。また、2005年を基準とした。

検討する除去率は、2005年時のCODの除去率85～90%を、それぞれ80、70、60、50、30、0%の6種類に、2005年時のTNの除去率50～70%を、それぞれ60、40、30、10、0%の5種類に、2005年時のTPの除去率80～90%を、それぞれ80、70、60、50、30、0%の6種類にそれぞれ変化させた場合の負荷量を算出した。

生活系COD発生負荷量の空間分布を図6に示す。下水道が考慮されている現状（2005年）における負荷量分布図と下水道範囲内の下水処理場の除去率を0%とした場合、つまり、下水道が全く整備されていない場合における負荷量分布図を比較すると、負荷量やその広がり大きく異なっており、下水道整備に伴い負荷量が大きく削減されていること状況が示された。とくに、加古川上流流域下水道や揖保川下流流域下水道において、負荷量が大きく増加している結果が得られ、人口や産業が多い地域における負荷が下水道により削減されている現状が示された。このとき、除去率 r を0%とした場合の生活系負荷量は、2005年における除去率 $r=85\sim90\%$ の場合と比較して、19 t/dayから68 t/dayに、約3.5倍に増加することが分かった。

図7は、下水処理場の除去率を種々変化させた場合に負荷量がどのように変化するかを示す。ここでは、変化した負荷量がどの年代の負荷量と等しくなるのかについて環境省の推定結果と比較する。除去率 $r=50\%$ 、 60% 、 70% の場合は、それぞれ1972年、1988年、1998年の負荷量と近い値（42 t/day、36 t/day、31 t/day）を示した。除去率30%の場合、負荷量は大きく増加し、52 t/dayの負荷量が発生する結果となった。仮に、漁業生産量が最大であった1985～88年頃の負荷量に近づけるとすると、下水処理場の除去率を現状の85～90%を60～70%まで下げることができる可能性が示唆された。なお、生活系以外の発生源からの負荷とのバランスも考える必要がある。

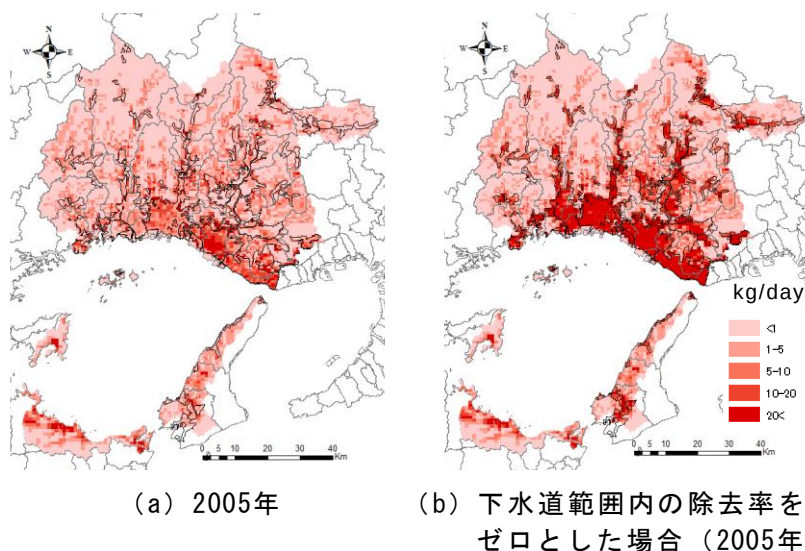


図6 生活系COD発生負荷量の空間分布（黒枠線は、下水道整備範囲を示す。）

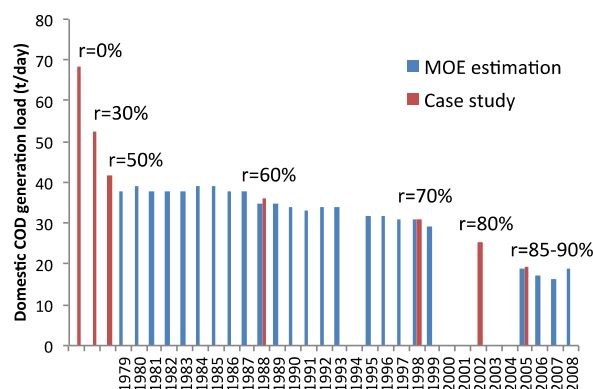


図7 下水処理場の除去率 r を変化させた場合の生活系COD負荷量の推定（2005年を基準とする。環境省の推定結果（1979～2008年）もあわせて図中に示す。）

5) ケーススタディ 2：河川水質の変化に伴う海域濃度変化への影響

総量規制の緩和により、陸から海へ流入する負荷量も増加するが、例えば、河川流量が増加する出水時には、海域における河川水の広がり方も変化すると考えられる。そこで、海域流動モデルを用いて、播磨灘の主要な河川である加古川、揖保川、市川、明石川において、ある一定のトレーサ濃度を与えて河川水の広がりを調べた。また、トレーサ濃度を増加させたケーススタディを実施し、河川水質変化（溶存態栄養塩濃度の増加）による河川水の広がりの変化を調べた。

平水時の場合、播磨灘北部に流入する河川水は平常時に、播磨灘北側において東西方向に分布しており、また、小豆島の北側を通じて備讃瀬戸海域まで広がっていることが分かった。同時に、播磨灘南部への広がりには少ないことがわかった。また、河川水のトレーサ濃度が2倍に増加することで、河川水の分布範囲は拡大するが、主に、播磨灘北部海域に限定して分布する結果が得られた。また、河川水は小豆島の北側を通り、備讃瀬戸の西部海域まで広く分布する結果が得られた。また、播磨灘北側の河川水の広がりが小豆島の東側まで到達することにより、播磨灘の中央部においても河川水の広がりが確認された。

つぎに、図8は大規模な出水があった直後の河川水の広がりを示す。10月19日、20日にそれぞれに60.5 mm、98.0 mmの降水量が姫路アメダス観測所において記録された。同図（a）より、10月30日には、大量の河川水は、河口から南方へと広がっており、播磨灘中央部から南部へと広く分布する結果が得られた。とくに、淡路島沿岸に沿って北部から南部まで河川水が達している結果が得られた。かつ、短期的に広がっている。一方、河川水の濃度が2倍に増加した場合（同図（b））では、最も濃い水塊は淡路島西岸および播磨灘中央東部に広く分布する結果が得られた。これらの結果より、出水により、播磨灘の北側から流入する河川水は播磨灘東部に広く分布することが分かった。総量規制の緩和により、流入負荷量が増加することは自明であるが、河川水に含まれる溶存物質の広がる範囲は大きく拡大し、また、地形の影響を受けて変化しており、沖合への溶存態の栄養塩供給に対して強い影響が生じていることが示唆される。とくに、出水時には濃度の濃い水塊が短時間で輸送されるため、沖合への栄養塩供給に対して、より大きな影響を有することが示唆された。

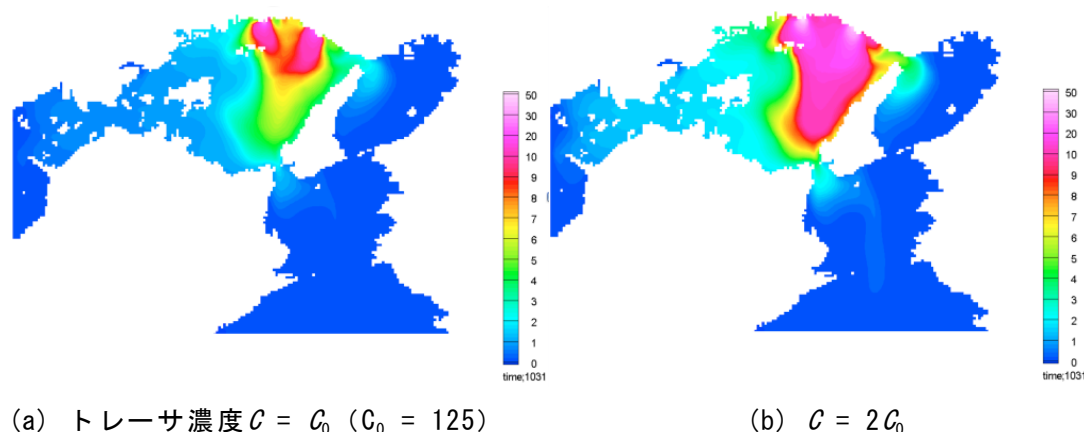


図8 出水時における河川水の分布（2004年10月30日0:00）
（対象河川は、加古川、揖保川、市川、明石川）

（2）陸域からの栄養塩負荷量変動

1) 播磨灘流域圏における発生負荷量の空間分布

生活系、産業系、その他系（土地系のみ：ノンポイントソース）による2005～2008年におけるCOD発生負荷量の空間分布図を図9に示す。COD負荷量について、生活系負荷量は播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることがわかった。また、下水道を考慮しない場合と下水道を考慮した場合を比較すると（図6）、負荷量分布に大きな違いが出ており、下水道整備により、集約的に負荷が大きく削減されている結果が示された。産業系負荷量も播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心として、臨海部および河道沿いに集中して分布していることが分かった。とくに集中している場所は、加古川下流および明石川下流の臨海部と、揖保川や市川、加古川流域の河道沿いである。産業系の特徴は、化学工業、パルプ・紙・繊維製品、鉄鋼業からの負荷量が多いという点である。土地系負荷量は、原単位の大きい水田（17.5 g/ha/day）や森林以外の土地利用（10 g/ha/day）において負荷量が高くなっており、森林の原単位が最も小さいことから（2.5 g/ha/day）、播磨域の東側で負荷量が多く、西側では低い分布となっている。

播磨灘流域圏における発生負荷量の特徴として、生活系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることがわかった。産業系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において、沿岸部および加古川下流および明石川下流の臨海部、揖保川や市川、加古川流域の河道沿いに集中して分布していることがわかった。土地系負荷量は、CODは水田、TN・TPは水田とその他農用地において高い負荷量を示すことから、加古川中下流域、河道に沿った場所、淡路島において高い値を示すことがわかった。

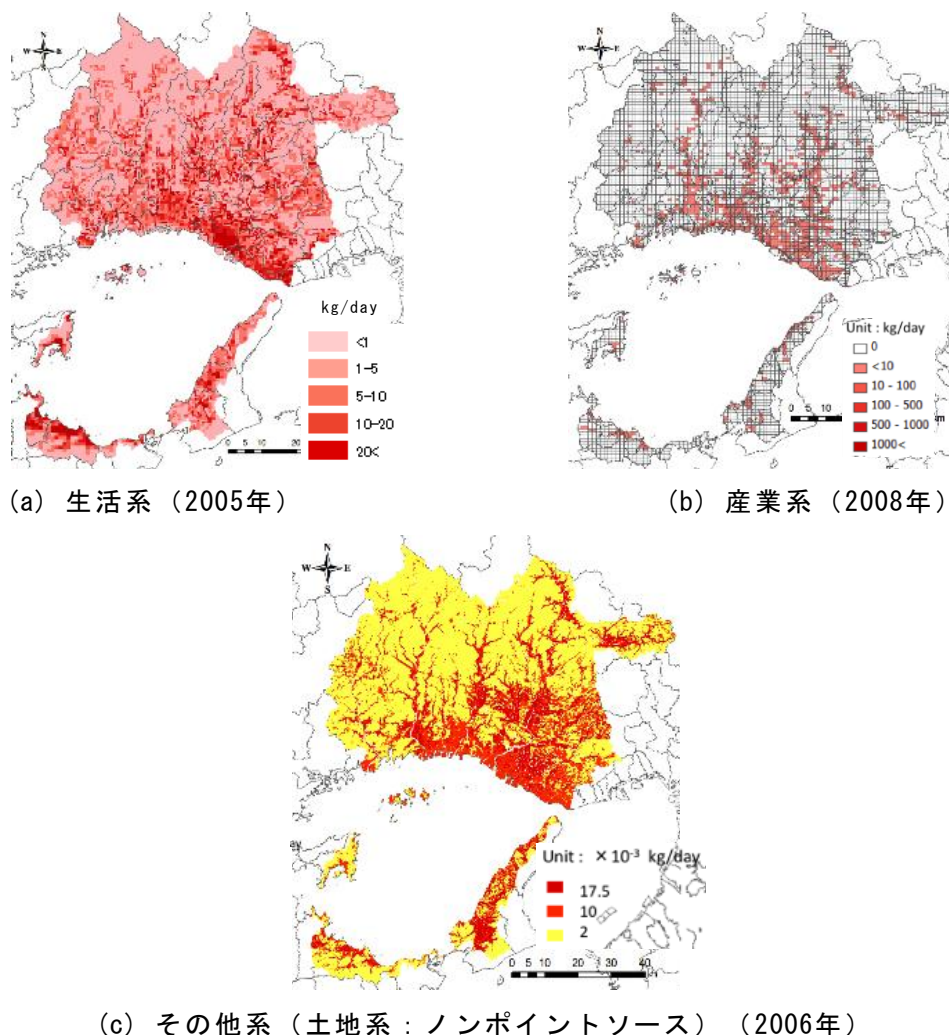


図9 COD発生負荷量の空間分布

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまでに総量として用いられてきた全窒素や全リンに対して、それらの溶存態・懸濁態といった形態別の特徴を明らかにした。この成果は、河川水質と海域水質の栄養塩バランスや海域における植物プランクトンによる栄養塩摂取の速度を明らかにする上で重要な知見である。具体的には、平水時に、河川水のTNに対するDIN、DON、PONの割合はそれぞれ、約7割、約2割、約1割であることが分かった。また、この割合は河川と海域で異なることが分かった。また、TPに対するDIP、DOP、PPの割合はそれぞれ、約4割、約2割、約4割であることが分かった。一方、出水のピーク時には、PONがTNの6割まで増加し、PPはTPの9割まで増加する結果が得られた。

播磨灘の北側から流入する河川水は、平水時には播磨灘の北側に分布し、備讃瀬戸への影響も示唆された。一方、出水時には播磨灘中央部、とくに淡路島沿岸に河川水が広がることが分かった。つまり、播磨灘は北部と南部で特徴が異なっており、海域を分けて考えることが必要である。一方で、播磨灘北部の影響が備讃瀬戸にも及んでおり、灘・湾・瀬戸の連続性と分割性について今後、検討することが必要である。また、これらの特徴は、平水時と出水時においても違いがみられることから、出水の特徴（規模、回数）を考慮した検討も必要である。

出水時における栄養塩形態は平水時と大きく異なり、懸濁物が多くなり、海域においてより広範囲に広がることから、海域流入後の懸濁態の挙動も重要であることが示唆される。

以上より、植物プランクトンやノリの生育に必要な栄養塩の形態は溶存態であることから、形態を調べるのが重要である。短期的には出水時を含めた負荷量を明らかにする必要がある、また、長期的には出水時に流入した懸濁態の海域における分解・沈降などの形態変化を明らかにする必要がある。

播磨灘流域圏における発生負荷量の特徴として、生活系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることが分かった。また、下水道整備により、人口増加に伴う生活系負荷量の増加が抑制され、下水道整備の進んだ沿岸域における負荷が減少していることがわかった。産業系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において、沿岸部および加古川下流および明石川下流の臨海部、揖保川や市川、加古川流域の河道沿いに集中して分布していることがわかった。分類をみると、沿岸部では、食品製造業や鉄鋼業、輸送機械工業が発達しており、揖保川流域では革工業、加古川流域では繊維工業がそれぞれ盛んであることがわかった。土地系負荷量は、CODは水田、TN・TPは水田とその他農用地において高い負荷量を示すことから、加古川中下流域、河道に沿った場所、淡路島において高い値を示すことがわかった。

人口や工業出荷額が80年代・90年代にかけて増加したが、発生負荷量（とくに生活系）は減少しており、下水道整備等生活排水処理施設の普及の効果が大きい結果が示された。

土地系の負荷量については、CODはわずかに増加傾向、TNは減少傾向、TPはわずかに減少していることがわかった。土地系COD負荷量が増加している原因は、原単位の最も小さい森林の減少による影響が大きく、土地系TN・TP負荷量の減少に影響を与えている原因は原単位の最も大きい水田とその他農用地の減少である。土地系負荷量は、近年、生活系および産業系の負荷量が減少していることにより、総負荷量に与える影響が相対的に大きくなっており、どのような値の原単位を使うのか十分な検討が必要である。

また、明石川を対象とした詳細な検討の結果、以下のことが明らかとなった。a) 1970年後半と2000年後半を比較すると、3つ河川（本川、櫛谷川、伊川）におけるBOD負荷量は約84%、COD負荷量は約69%減少する結果が得られた。b) 下水処理水を含めた明石川流域から海域へのBOD負荷量は約40%減少したが、COD負荷量は減少していない（約6%増加）結果が得られた。c) 1970年代から2000年代にかけて人口が約3倍増加したことを考えると、人口増加に合わせて下水道整備を進めることで、河川の有機汚染が抑制され、下水道による負荷の抑制効果は非常に大きいことがわかった。d) 陸域からの負荷流入という視点で海域のCOD濃度に与える影響を考えると、i) 下水道によるCOD削減がBODと比較して進んでいない点、ii) 河川水質のCOD濃度が低下していない点、iii) CODの形態として溶存態（D-COD）が多い点が考えられた。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

今後、学会発表もしくは学術論文を通じ、成果の広報・普及に努める。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

近年、河川水質が改善傾向にある中で、河川水中の窒素やリンの形態特性を明らかにすることで、総量として基準を定めている排出規制や河川・海域の環境基準の検討に対して、溶存態に着目した環境基準の考え方を整理する上での一つの知見を提供するものと考えられる。

また、灘・湾・瀬戸の連続性と分割性について知見を示した。これらの特徴は、平水時と出水時においても違いがみられることが明らかとなったことから、出水の特徴（規模、回数）を考慮した検討に対して一つの知見を提供することができた。播磨灘では、平水時と出水時で河川水の広がり方が異なるため、複雑であるが、播磨灘を南北で分けることが必要である。逆に、播磨灘北部と備讃瀬戸を連続した水域とみなすことも考えられる。結果的には、高栄養塩の河川水がどのように時間をかけて海域を移動するのかを考慮することが必要である。

下水道整備に伴い負荷量が大きく削減されている状況が示された。また、下水処理場の除去率を変化させることで、仮に、漁業生産量が最大であった1985～88年頃に近づけるとすると、COD負荷量について、2005年の下水処理場における除去率を60～70%までに下げることができる可能性が示唆された。TN負荷量は、除去率を下げずに、現状維持がよい結果が得られた。したがって、窒素の観点から考えると、高度処理の必要はないと示唆される。TP負荷量は除去率を70%まで下げることができる可能性が示唆された。海域における水質変化を詳しくみる必要があるが、陸側の視点から、下水処理場の総量規制や河川水質の基準策定に対して、陸からの負荷と海域の生態系との関係（バランス）をどのように取るべきであるのかについて一つの知見を提供することができた。なお、ここでの検討結果につ

いては、生活系以外の発生源からの負荷とのバランスも考える必要がある。

地理情報システム（GIS）を用いることで、より詳細な面的情報を利用した発生負荷量の推定を行うことができ、その算定手法を示すことができた。とくに、下水道等整備範囲を考慮することで、広域的な発生負荷量の推定に対して、より分かりやすい情報を国民に提供できる。

また、下水道の放流水の水質について、明石川では有機物は他の支川と同程度に減少していることから、下水放流水質の基準策定や放流水質の緩和運転の実施に対して、河川と海域のバランスをどのように取るべきであるのかについて基礎的な知見を提供することができた。

下水水質処理を制御することで流入負荷量を人為的に調整することができ、海域環境を制御することにつながる可能性もある。下水道が河川環境の改善に果たした役割は明らかであるが、今後は、人口減少が進み、社会全体の活動の規模も減少してくることから、自然に負荷量全体が減少することが予想される。また、下水道整備率の向上も進むことから、下水処理施設からの負荷の比率が相対的に大きくなっていくため、河川環境の改善と合わせて海域への負荷供給としてのバランスを考える必要がある。下水処理に関するきめ細かい現状把握を行うことが必要である。

6. 研究成果の主な発表状況

（１）主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 石塚正秀・石川真菜・宮川昌志・赤井紀子・多田邦尚：香川県における河川水の栄養塩形態と備讃瀬戸・播磨灘への影響、土木学会論文集B1（水工学）、第69巻、No. 4、I_1423-I_1428、2013.
- 2) 石塚正秀・矢野利樹・平木大補・和田有朗：下水道整備が陸域の有機物負荷量の長期的な変化に与える影響、土木学会論文集B1（水工学）、第69巻、No. 4、I_1717-I_1722、2013.

（２）主な口頭発表（学会等）

- 1) 矢野利樹・石塚正秀：播磨灘流域圏における河川流域の土地利用および土地系負荷量の変遷、瀬戸内海研究フォーラムin大分 発表概要集、p. 35、2011.
- 2) 宇野裕太・石塚正秀：時間変動を考慮した汚濁負荷解析にもとづく河川水質の推定、瀬戸内海研究フォーラムin大分 発表概要集、p. 30、2011.
- 3) 宇野裕太・石塚正秀・溝口大介：汚濁負荷量と流量の空間分布を考慮した河川水質モデルの構築、土木学会第66回年次学術講演会講演概要集、VII-019、pp. 37-38、2011.
- 4) 矢野利樹・石塚正秀：播磨灘流域圏における流域内土地系負荷量の30年間の変化、土木学会第66回年次学術講演会講演概要集、II-087、pp. 173-174、2011.
- 5) 矢野利樹・石塚正秀：播磨灘流域圏における土地系COD負荷量の長期変化、平成24年度土木学会四国支部第18回技術研究発表会講演概要集、pp. 309-310、2012.
- 6) 平木大補・石塚正秀・和田有朗：明石川流域における下水道整備に伴う河川水質変化の特徴、平成24年度土木学会四国支部第18回技術研究発表会講演概要集、pp. 329-330、2012.
- 7) 平木大補・石塚正秀・矢野利樹・和田有朗：明石川流域における人口・土地利用変化と下水道整備にともなう河川水質変化の特徴、土木学会第67回年次学術講演会講演概要集、VII-037、pp. 73-74、2012.
- 8) 平木大補・石塚正秀・矢野利樹：播磨流域圏における生活系発生負荷量の推定に関する研究、平成25年度土木学会四国支部第19回技術研究発表会講演概要集、pp. 61-62、2013.
- 9) Ishizuka, M. : Factors causing recent decrease of nutrients from rivers, EMECS 10 – MEDCOAST 2013 joint conference, Abstract to the Global Congress on ICM (integrated coastal management), accepted.

7. 研究者略歴

課題代表者：石塚 正秀

大阪大学工学部土木工学科卒業、大阪大学大学院工学研究科博士後期課程土木工学専攻修了、博士（工学）、香川大学工学部准教授

研究参画者

（１）：石塚 正秀（同上）

（２）：和田 有朗

近畿大学理工学部土木工学科卒業、神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、神戸山手大学現代社会学部講師

RFb-1102 播磨灘の栄養塩異変の解明と栄養塩流入負荷の変動要因の研究

(1) 陸圏負荷量変動の総括と沿岸環境との関連解明

香川大学工学部

石塚 正秀

平成23～24年度累計予算額：8,964千円

(うち、平成24年度予算額：3,985千円)

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

河川水の栄養塩形態を調査し、窒素について、DIN、DON、PONの割合はそれぞれ、約7割、約2割、約1割であり、リンについて、DIP、DOP、PPの割合はそれぞれ、約4割、約2割、約4割であることが明らかとなった。また、河川と海域における窒素の形態割合が異なり、海域ではDINの割合が大幅に減少し、DONが増加した。一方、リンは、DIPの割合がほぼ同程度の3～4割であり、河川と海域間の変化はみられなかった。また、出水のピーク時には、PONがTNの6割まで増加し、PPはTPの9割まで増加する結果が得られた。出水時における栄養塩形態は平水時と大きく異なり、海域においてより広範囲に広がることから、海域流入後の懸濁態の挙動の重要性が示された。

レッドフィールド比から、河川水は窒素に富みリンに乏しい状態、ケイ素に富み窒素に乏しい状態、ケイ素に富みリンに乏しい状態であることが明らかとなった。つまり、河川水に含まれるSiが多いことから、海域では、珪藻プランクトンが増殖しやすい環境にあり、珪藻による栄養(窒素)の吸収が進みやすい環境であると考えられる。

本州側(播磨域)からの河川流入量が流域圏全体の約85%を占めることが明らかとなった。また、出水時に流入する割合(出水日数を30日とした場合)は、1年間の総流入量のうち約35～60%を占めていることが明らかとなった。つまり、播磨灘の北と南では、海域水質の特徴が大きく異なる。平水時でみると、播磨灘を南北で分けることが必要であり、備讃瀬戸との関係性も示されたが、出水時では、播磨灘全域との関係が重要であることが示された。

下水処理場の除去率を変化させることで、仮に、漁業生産量が最大であった1985～88年頃に負荷量を近づけるとすると、COD負荷量およびTP負荷量について、2005年の下水処理場における除去率をそれぞれ、60～70%、70%までに下げることができる可能性が示された。一方、TN負荷量は、除去率を下げずに、現状維持でよいという結果が得られた。

〔キーワード〕

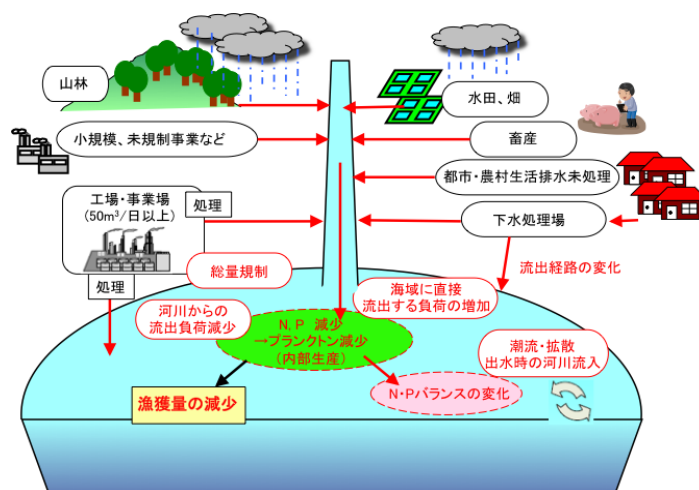
栄養塩異変、河川栄養塩形態、河川出水、下水道整備、総量規制

1. はじめに

瀬戸内海は1960年代から水質汚濁が急激に進行し、赤潮の発生と漁業への影響が重要な問題となっていた。1973年に制定された瀬戸内海環境保全臨時措置法や、1979年から始まった水質総量規制などにより、赤潮発生件数は減少した¹⁾。しかし、近年ではアサリ、イワシ、イカナゴといった漁業資源の減少や、カキ養殖生産量の減少、養殖ノリの色落ちといった新たな問題が発生して

いる²⁾。近年、播磨灘では栄養塩濃度が低下し、「栄養塩異変」とよばれている。ここ数年、海水中の栄養塩濃度が急激に低下していると報告されており³⁾、この急激な低下の原因は明らかになっていない。瀬戸内海がきれいになったことにより、ノリの色落ちやイワシ類・アサリ等の漁獲量の低迷など、水産業に深刻な問題が生じているという皮肉な状況にある。緊急に原因解明し、対応策をとることが漁民の生活維持のために必須条件になっている。これらの問題は、窒素やリンといった栄養塩濃度の変動に原因がある可能性が高いといわれており、その原因の一つとして、長期的にみた河川からの栄養塩負荷量の減少が考えられている³⁾。

研究代表者はこれまで、河川の栄養塩と植物プランクトンの種構成変化、河川流出解析、流域の負荷量解析などの、陸域の栄養塩環境と水動態について研究を実施してきた⁴⁾。その結果、堰による一時的な停滞水域の形成が溶存ケイ素濃度と植物プランクトンの種構成変化に大きく影響するといった「水質の質」の変化を指摘し、研究に取り組んできた。



図(1)-1 陸域からの汚濁物・栄養物の流出過程

森・川・海の連続性の重要性が指摘され、里山や里海といった環境保全の取組が提唱されているが、何故、近年、海域の栄養塩濃度は急激に低下し、ノリの色落ちなどの水産被害が頻発するのかについて、その原因が明らかにされていない。陸域からの窒素・リンの海域への流入過程は、様々な発生源から発生し、自然・社会によって複雑に変化している（図(1)-1）。近年の海水中の栄養塩濃度の急激な低下要因とそのメカニズムを明らかにすることは、水産業の低迷要因の解明とその対策をたてるうえで重要であり、さらに、総量規制の効果の科学的根拠を示し、水産業進展の観点からみた海域栄養塩を適正に維持するために河川の栄養塩濃度をどの程度まで許容すべきかを明らかにすることにつながるきわめて重要な課題研究である。

海洋において、様々な生物を支えているのは植物プランクトンであり、植物プランクトンによる一次生産は、その海域の漁獲量と密接な関係にあることが知られている⁵⁾。植物プランクトン量を左右する主要な要因は水温、光、栄養塩の3つで、沿岸海域では栄養塩が最重要視されている³⁾。植物プランクトンの生産にとって重要なものは、無機態の窒素やリンであり、栄養塩中にこれらのものがどれだけ含まれているのかを明らかにする必要がある。また、溶存態無機物と懸濁態有

機物の量の変化は対応しており、その過程で溶存態有機物も発生することから⁶⁾、貧栄養化においては栄養塩の形態別特徴を明らかにすることが重要である。

半閉鎖性海域の栄養塩濃度は、河川からの栄養塩負荷の影響を受けるため、河川水中の栄養塩の形態を明らかにすることや、河川から海域にかけて栄養塩形態がどのように変化するのかを明らかにする必要がある。例えば、淀川水系における溶存態窒素と溶存態リンの構成比が調査されており⁷⁾、下流域での溶存態窒素の構成比は硝酸態窒素が約50～65%、溶存態有機窒素が約20～30%、アンモニア態窒素が約16%、亜硝酸態窒素が約4%を占めることが明らかになっている。溶存態リンの構成比は溶存態無機リンが約75%、溶存態有機リンが約6～10%を占めることがわかっている。しかし、河川水中の溶存態、懸濁態を含めたすべての栄養塩の形態や、河川と海域での形態の変化についてはあまり研究がされていないのが現状である。以上より、河川の水質を単にTN、TP、CODといった総量としての濃度を用いて川と海の水環境のつながりを考えるだけでなく、河川水中の栄養塩形態を把握し、川と海との連続性を把握することが重要である。

2. 研究開発目的

播磨灘の栄養塩濃度が低下し、ノリの色落ちやカキの質の低下など、水産業が深刻な状態になり、打撃を受けているがその原因が明らかではない。本研究では、陸起源の栄養塩流入に着目し、播磨灘の栄養塩異変の原因究明と植物プランクトンの生物量と種組成に与える影響を明らかにするために、1)陸域からの栄養塩負荷量の推定、2)下水処理水放流など人間活動との関係を調査・解析する。そして、3)現況の総量規制の妥当性に対する科学的根拠の提示を目指すものである。栄養塩異変の原因解明の達成目標は1)播磨灘に河川等から流入する窒素、リン負荷量を明らかにする。2)観測データのない河川流量を推定し、当該水域の水質の南北偏差の要因を明らかにする。3)流出モデルにより、河川から海域への淡水流入量の時間変化を推定し、当該水域および備讃瀬戸海域との比較において、栄養塩、プランクトン種組成に与える変動要因を、洪水出水時も含めて明らかにする。これにより、栄養塩異変の原因、要因を明らかにする。

3. 研究開発方法

(1) 広域水質調査

播磨灘を囲む香川県東讃域および淡路島、兵庫県播磨地域の計10ヶ所の河川においてCOD、窒素、リン、ケイ素を含めた水質調査・分析を1ヶ月に1回の頻度で定期的に行った。四国側では、津田川、湊川、播磨側では、明石川、加古川、揖保川、市川、夢前川、千種川、淡路側では、三原川、郡家川で行った(図(1)-2)。

採水し持ち帰った河川水についてはポンプ(ULVAC社製、DAP-15)を用いて吸引濾過を行った。SSについては110℃で2時間乾燥させた定性濾紙(Whatman社製、GF/B)を使用し、溶存成分については400℃で2時間乾燥させた定性濾紙(Whatman社製、GF/F)を使用した。形態別の水質分析は、CHNコーダ(J-Science Co Ltd社製、MICRO CORDER JM10)によりPON(懸濁態有機窒素)を、イオンクロマト(DIONEX社製、ICS-900)によりNO₃-NとNO₂-Nを、T-N・T-P AutoAnalyzer(BRAN+LUEBBE社製、AACS-III)によりDTN(溶存態全窒素)とDTP(溶存態全リン)を、吸光度式多項目水質測定器(WTW社製、PhotoLab®6100VIS型)によりNH₄-NとPO₄-P、TP(全リン)を、全有機炭素・窒素計(島津製作所製、TNM-1)により、DTOC(溶存全炭素)、DTN(溶存全窒素)を分析した。



図(1)-2 播磨灘を囲む研究対象河川流域

(2) 播磨灘のデータ解析

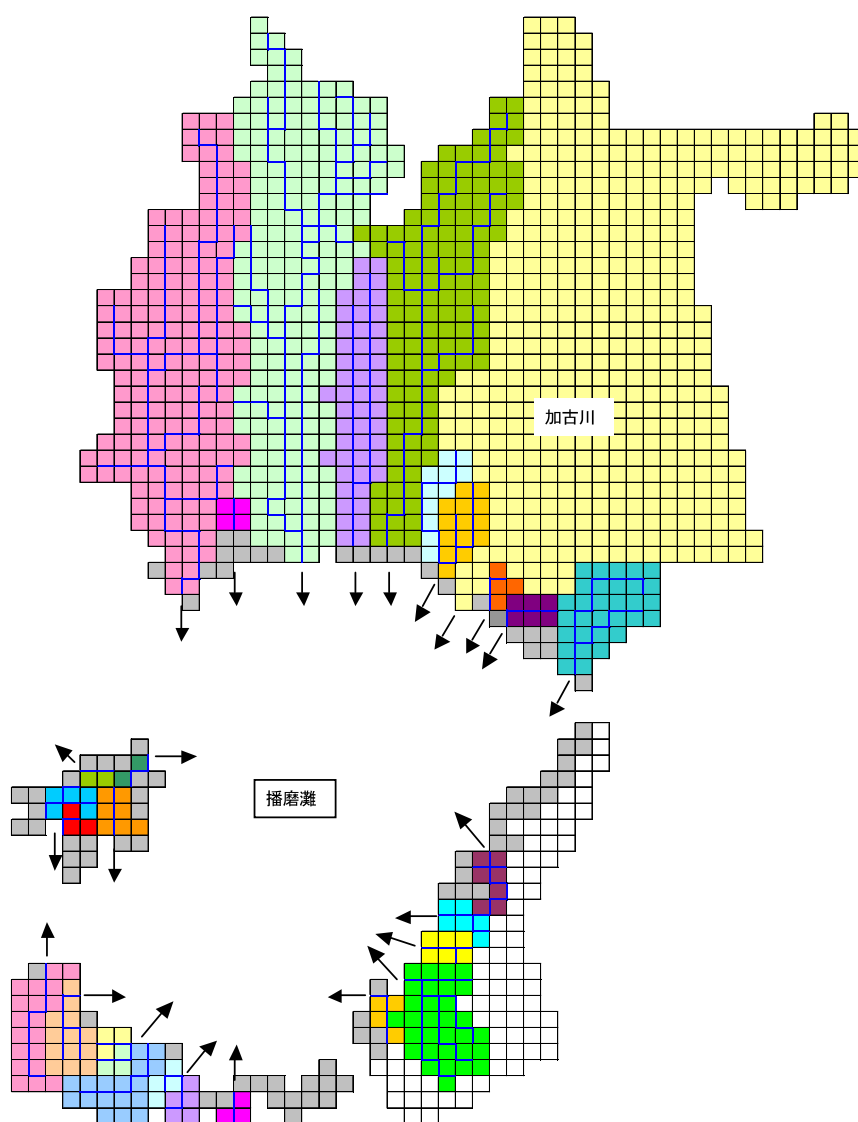
香川県水産試験場および兵庫県農林水産総合技術センターが実施している浅海定線調査の結果を用いて、播磨灘の水質データを収集、整理して解析し、出水時の海域水質の変化や栄養塩形態を調べる。

(3) 出水時の河川水質調査

台風や前線に伴う出水時における栄養塩形態の変化を調べるために河川水質調査を集中的に行った。調査は天気予報などを参照して降雨前から実施し、河川水をポリ瓶に採水し、pHや電気伝導度(EC)、水温を携帯型の測定器を用いて測定した。出水時には数時間おきに、出水終了後は日ごとに調査を行った。なお、出水時に迅速に観測を行う必要性や安全管理のため、本研究では、高松市を流れる二級河川の新川において観測を行い、出水時の栄養塩形態の定性的な変化の特徴を明らかにすることとした。水質分析は上記(1)と同様の方法を用いた。なお、調査は、SSの分析結果から判断して河川水質が平水時に戻るまで継続した。

(4) 河川流量シミュレーション

国土数値情報を用いた地形・標高・土地利用データの収集とGISを用いた可視化を行い、2 km間隔のグリッドを作成した(図(1)-3)。入力データには、流域の範囲内もしくは近傍にある気象庁アメダス観測所の1時間毎の降水量データおよび気温データを用いて、流出解析を行った。数値モデルには、石塚・江種(2008)⁸⁾で使用した分布型水文流出モデルを適用した。



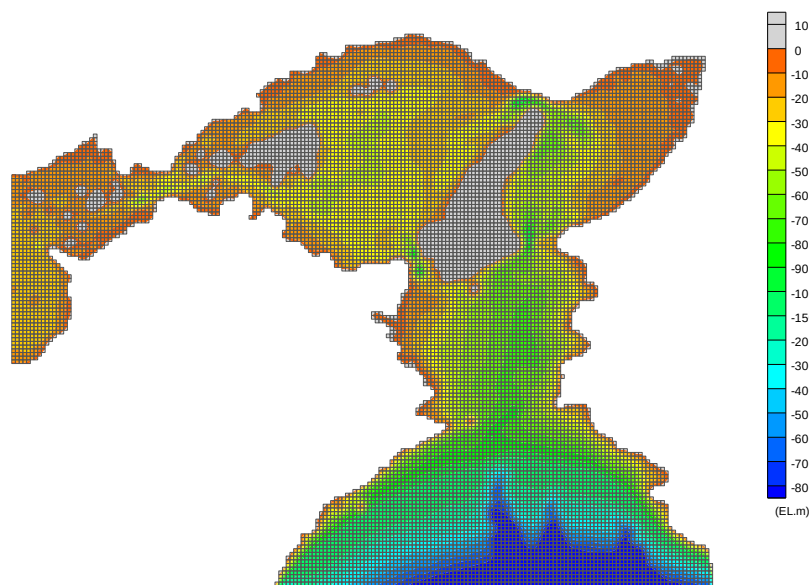
図(1)-3 播磨灘を囲む河川流域の計算メッシュ
(色の違いは各河川流域を示す。)

(5) 海域流動シミュレーション

数値モデルには、EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)を用いて、ハインドキャストイングを実施した。計算範囲は、図(1)-4に示すように、西側境界は備讃瀬戸西部、南側境界は紀伊水道南部として、地形データは内閣府中央防災会議による50 m、150 m、450 m格子の水深データを用いた。格子サイズは、水平方向に1 km四方、鉛直方向に σ 座標15層とした。12ヶ所の一級河川と27ヶ所の二級河川の河川流量、気象条件(高松地方気象台)を非定常条件として与えた。

計算期間は2002年1月1日～2004年12月31日の3年間とした。計算条件として、西側境界では、伊予三島の換算潮位、南側境界では白浜の観測潮位を与えた。また、開境界において、岡山県農林水産総合センター⁹⁾および徳島県立農林水産総合技術支援センター¹⁰⁾による一ヶ月毎の水温・塩分鉛直データを時間線形補間して与えた。また、対象範囲内の河川からは、加古川、揖保川、吉井

川、旭川、高梁川、土器川、淀川、猪名川、大和川、紀の川、吉野川、那珂川において観測された一時間毎の流量・水温データ（国土交通省）を与えた。また、二級河川は河川流量が観測されていないため、対象とする播磨灘に流れ込む主要な計27箇所の河川については、先に示した分布型水文流出モデルを用いて、一時間毎の河川流量を算出して与えた（一部、H-Q曲線により推定した河川もある。）。大阪湾内の二級河川については平均的な流量データを一定値として与えた。また、風向・風速、気温・湿度、日射量、気圧、雲量の気象データは高松地方気象台の観測結果を一時間毎に与えた。初期条件としては、JODCにより取得した2002年1月の月平均水温・塩分分布を与えた。



図(1)-4 播磨灘を対象とした海域流動シミュレーションの計算範囲
(色の違いは水深を表す。)

(6) ケーススタディ 1：下水処理場による総量規制の緩和影響の検討

下水処理場における除去率を変化させることで、下水道範囲内から発生する負荷量を再計算し、除去率が変化することで、負荷量が過去のどの時期と同じ値になるかについて検討した。対象は、加古川下流流域下水道、加古川上流流域下水道、揖保川流域下水道、単独公共下水道とした。ここでは、2005年を基準として、下水道からの発生負荷量が多い生活系負荷量を対象とした。

(7) ケーススタディ 2：河川水質の変化に伴う海域濃度変化への影響

上記5) で示した数値モデルを用いて、播磨灘の主要な河川である加古川、揖保川、市川、明石川において、ある一定のトレーサ濃度を連続的に与えて河川水の広がりを調べた。また、トレーサ濃度を増加させたケーススタディを実施し、河川水質変化（溶存態栄養塩濃度の増加を想定）による河川水の広がりの変化を調べた。

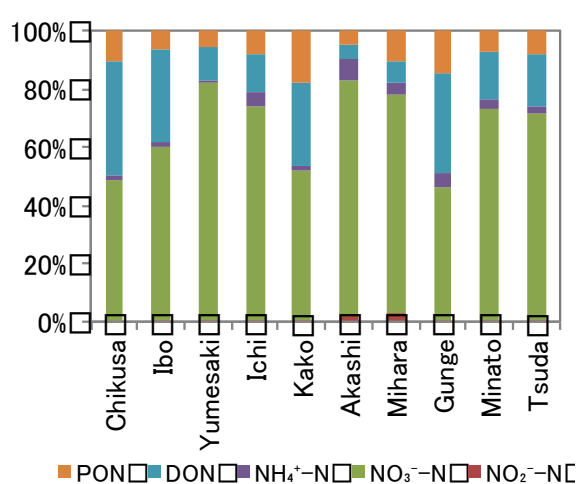
4. 結果及び考察

(1) 河川水の栄養塩の形態別特徴

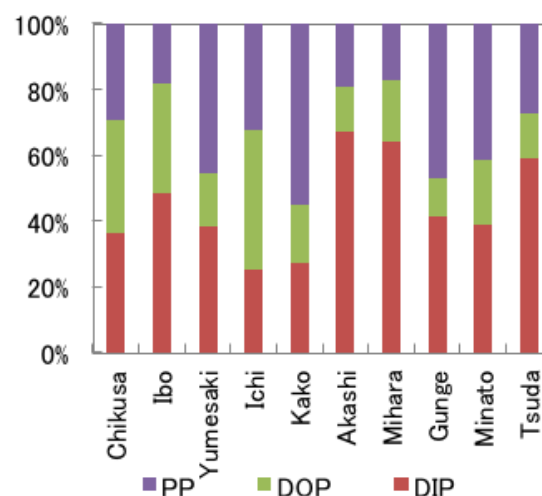
1) 播磨灘に流入する河川

全窒素 (TN)、溶存態無機窒素 (DIN)、および溶存態有機窒素 (DON) は、以下の式により求めた。 $TN = DTN + PON$ 、 $DIN = NH_4^+-N + NO_2^-N + NO_3^-N$ 、 $DON = DTN - DIN$ 。図(1)-5 (a) より、TNに対する、DIN、DON、PONの割合はそれぞれ、平均的にみて、約7割、約2割、約1割であることが分かった。また、窒素の多くは溶存態無機態、とくに硝酸態窒素として存在していることがわかった。図(1)-6 (a) より、濃度の空間的な特徴としては、硝酸性窒素濃度は明石川が高いことが分かった。これは、神戸市の下水処理場からの放流水が河川に流入しているためである（詳しくは課題2で説明する。）。また、淡路島の三原川も硝酸性窒素濃度が高く、生活排水処理整備率の低さや農地の影響が考えられる。

懸濁態リン (PP)、溶存態有機リン (DOP) は、それぞれ以下の式により求めた。 $PP = TP - DP$ 、 $DOP = DP - PO_4-P$ 。図(1)-5 (b) より、TPに対する、DIP、DOP、PPの割合はそれぞれ、平均的にみて、約4割、約2割、約4割であることが分かった。窒素と比較して懸濁状態のリンが多いことが分かった。濃度の空間的な特徴としては（図(1)-6 (b)）、窒素と同様にリン濃度も明石川で高いことが分かった。これも、神戸市の下水処理場からの放流水の影響による。また、淡路島の三原川、郡家川においてリン濃度が高く、生活排水処理整備率の低さや農地の影響が考えられる。

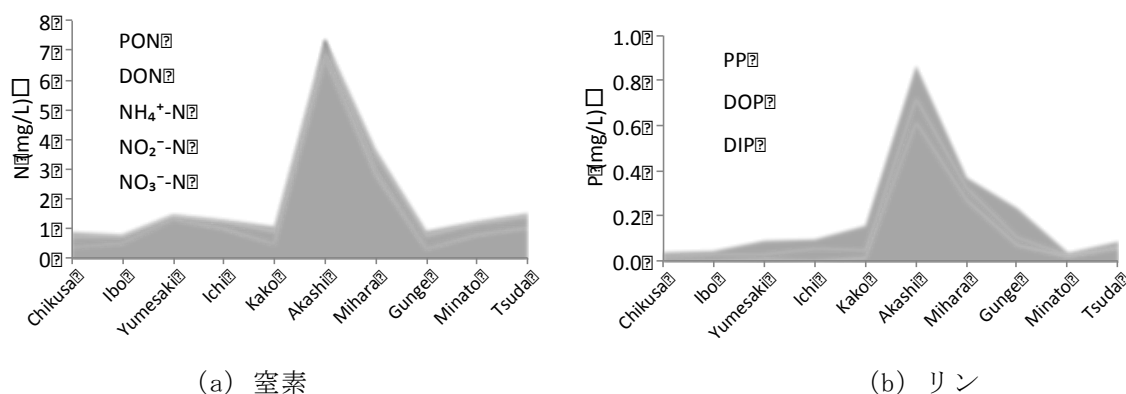


(a) 窒素

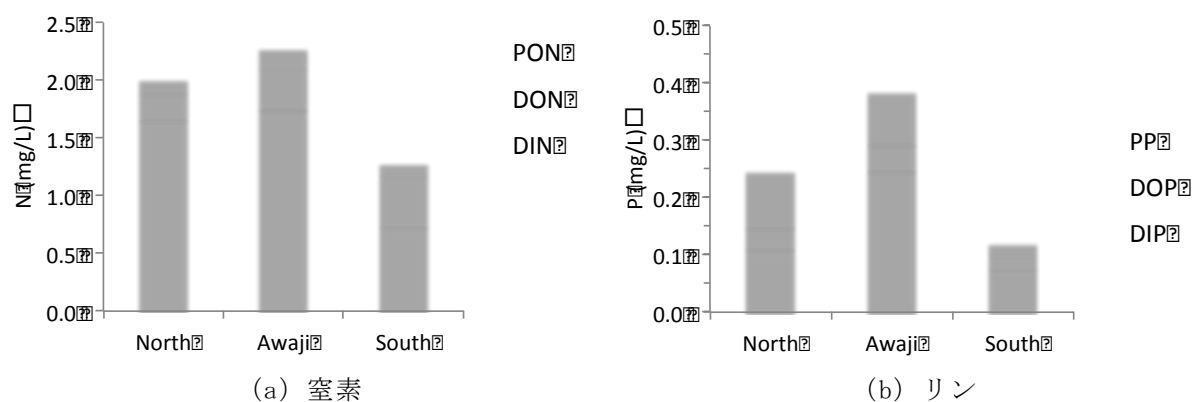


(b) リン

図(1)-5 播磨灘流域圏の河川における窒素・リンの形態別割合
(2011年11月～2012年12月の平均値)



図(1)-6 播磨灘流域圏の河川別の窒素・リンの形態別濃度（2011年11月～2012年12月の平均値）



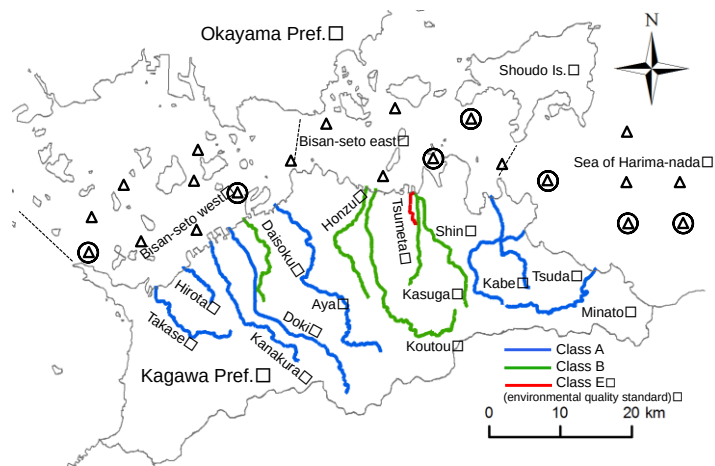
図(1)-7 播磨灘流域圏の河川における窒素・リン形態の場所別特徴

上記の河川を播磨灘の北部、淡路島、南部（四国側）に分けて、平均した結果を図(1)-7に示す。窒素、リンともに淡路島からの濃度が高く、南部（四国側）は濃度が低い結果となった。なお、北部側は明石川の影響が平均濃度を高めている結果となった。

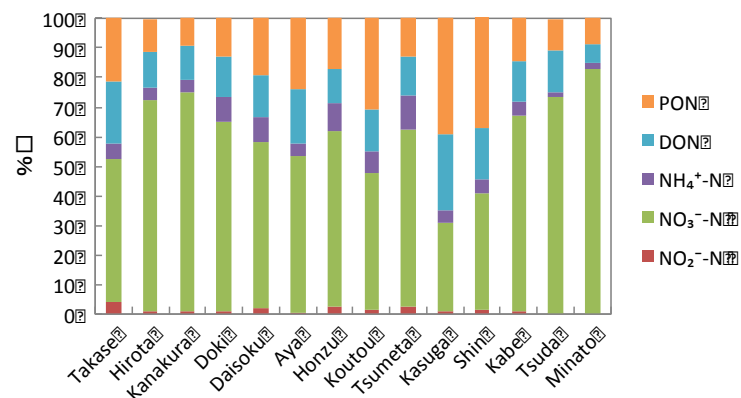
2) 備讃瀬戸に流入する河川との比較

上記結果より、播磨灘南部に流入する四国側の河川の栄養塩濃度が低いことから、備讃瀬戸海域に流入する河川（香川県側）との比較により、播磨灘南部海域の特徴を調べた。調査地点を図(1)-8に示す。図(1)-9(a)より、備讃瀬戸および播磨灘南部に流入する河川でみると、TNに対するDINの割合は $66 \pm 14\%$ 、DONの割合は $15 \pm 4\%$ 、PONの割合は $19 \pm 10\%$ であり、河川水の窒素の多くは溶存態無機物として存在していることがわかった。この結果は、播磨灘に流入する河川と比較して、懸濁物が若干多い結果となったが、ほぼ同じ割合である。

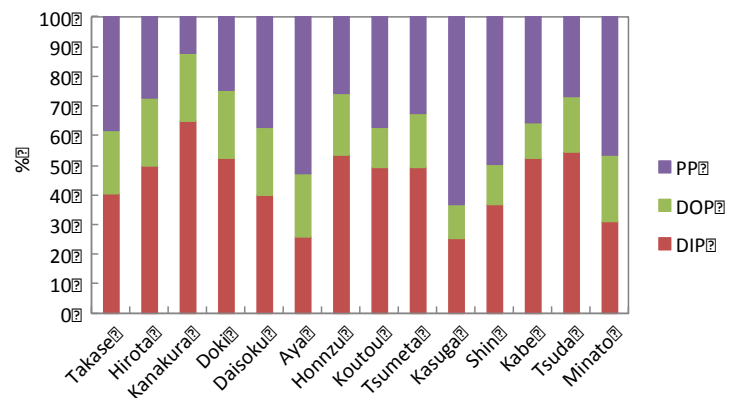
DINは東讃地区の湊川、津田川、鴨部川と中讃西部の弘田川、金倉川で72～85%と多くなっている。人為的影響の少ない東讃域では、濃度が低いことから他の形態の窒素成分が少ないため、相対的に割合が高くなったと考えられる。香川県は、汚濁処理人口普及率が平成23年度末で69.3%（全国平均78.6%）¹²⁾（このうち、下水道普及率は42.4%（全国平均75.8%））¹³⁾であり、生活排水処理が進んでおらず、生活排水と河川水質との関係が強いと考えられることから、各河川流域の建物用地面積と水質項目との関係を調べた結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L)は建物用地面積 L_A (km²)と正の相関（ $\text{NH}_4\text{-N} = 0.021 \times L_A + 0.029$ 、 $R=0.79$ 、 $p<0.01$ ）がみられた。



図(1)-8 備讃瀬戸および播磨灘南部に流入する河川と海域（浅海定線調査）の調査地点（海域の丸印は、形態別濃度分析の調査地点を示す¹¹⁾。）



(a) 窒素



(b) リン

図(1)-9 備讃瀬戸および播磨灘南部に流入する河川ごとの栄養塩の形態別割合（2011年2月～2012年1月の平均値）

PONは、春日川、新川で37～39%と多くなっており、金倉川、湊川で8～9%と少なくなっている。全体的にみると、PON(mg/L)はChl. a(μ g/L)と正の相関 ($PON=0.021 \times Chl. a + 0.02$, $R=0.94$, $p<0.01$) があり、堰による流れの停滞域において、植物プランクトンによる一次生産の寄与が大きいと考えられる。

図(1)-9(b)より、TPに対するDIPの割合は $45 \pm 12\%$ 、DOPの割合は $19 \pm 4\%$ 、PPの割合は $36 \pm 13\%$ であり、リンの多くは溶存態、とくに溶存態無機物として存在していることがわかった。窒素と比べて、リンは溶存態無機物の割合が小さい結果が得られた。また、この形態割合は播磨灘に流入する河川と比較して、ほぼ同程度であることが分かった。

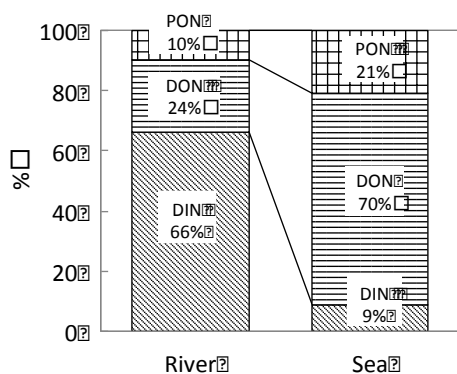
DIPは金倉川で65%と多く、綾川、春日川、湊川で25～31%と少ない。DIP(mg/L)は建物用地と正の相関 ($DIP=0.0077 \times L_A + 0.079$, $R=0.64$, $p<0.05$) があり、生活排水の影響を受けていると考えられる。DOPは中・西讃地区の河川で21～23%と多くなっているが、河川毎の違いは明瞭ではない。また、水田や畑の面積割合が大きい河川（高瀬川、大束川、本津川、詰田川、新川）はTN・TP濃度が高い河川であり、7、8月にDOPの割合が多くなる傾向がみられた。また、PPは綾川、春日川、新川で50～63%と多くなっており、金倉川で12%と少なくなっている。ここで、PP(mg/L)とChl. a(μ g/L)には正の相関 ($PP=0.005 \times Chl. a + 0.023$, $R=0.82$, $p<0.01$) があり、PONと同様に、植物プランクトンによる一次生産の寄与が大きいと考えられる。

(2) 河川水と海水の栄養塩形態の変化

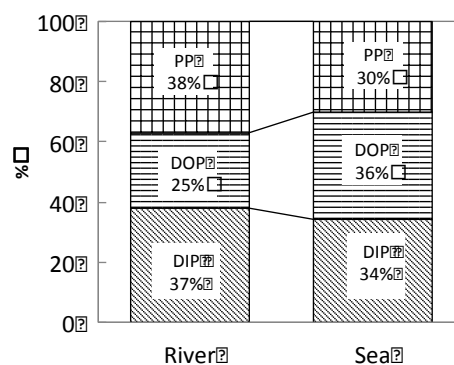
1) 播磨灘流域圏

図(1)-10は、同一期間に行われた播磨灘流域圏の河川と播磨灘海域¹⁴⁾の栄養塩形態の割合を比較した結果を示す。播磨灘のDIN、DON、PONの割合を算定すると、それぞれ約1割、約7割、約2割の結果が得られた。窒素について、河川と海域では形態が異なることが分かった。つまり、海域ではDINの割合が大幅に減少し、DONが増加した。ただし、海域においても窒素の多くは溶存態として存在しており、PONの割合は河川も海も低いことが分かった。

リンについては、海水のDIP、DOP、PPの割合¹⁴⁾は、それぞれ約3割、約4割、約3割であり、河川と海域でDIPの割合がほぼ同程度の3～4割であった。リンの形態は、河川と海域間において窒素ほどの大きな変化はみられなかった。DINとDIPの比較でみると、海ではNがPよりも少ない結果となった。

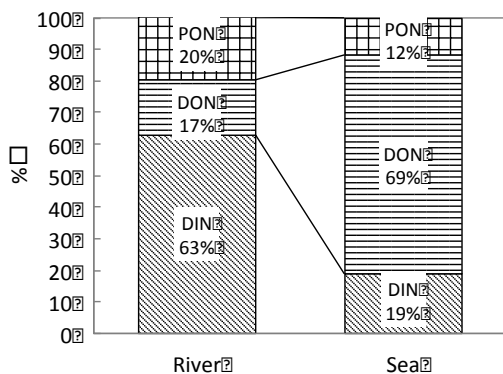


(a) 窒素

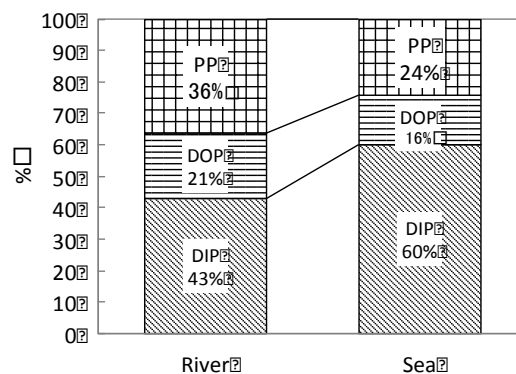


(b) リン

図(1)-10 播磨灘流域圏における河川と播磨灘の栄養塩形態割合の比較
(2012年4～10月の平均値) (海域の結果は、原田ら (2013) ¹⁴⁾ を用いた。河川の平均値は、各河川の割合に対する平均とした。)



(a) 窒素



(b) リン

図(1)-11 備讃瀬戸・播磨灘南部に流入する河川および海域における栄養塩の形態別割合の比較
(海域の結果は、宮川ら (2012) ¹¹⁾ を用いた。2011年2月～2012年1月の平均値)

2) 備讃瀬戸および播磨灘南部

香川県に近い海域 (図(1)-8丸印) において観測された結果¹¹⁾をもとに、河川水質調査と同じ期間について、海水のTNに対するDIN、DON、PONの割合を算定すると、それぞれ19%、69%、12%の結果が得られた (図(1)-11(a))。河川水と海水の栄養塩形態を比較すると、河川ではDINの割合が63%と高かったが、海域ではDONの割合が69%と高くなっており、河川と海域では栄養塩形態の構成比が異なる結果が得られた。ただし、海域においても窒素の多くは溶存態として存在している結果が得られ、PONの割合は河川も海も低いことが分かった。河川から流入したDINは、海水によって希釈されることで濃度が低下するため、海水のDIN濃度 (平均0.07 mg/L) は河川水 (平均0.61 mg/L) の約10分の1になった。一方、DONは内部生産により生成されるため¹⁵⁾、河川から海域にかけて濃度がDINほど大きく低下せず、DONの割合が相対的に高くなる可能性が考えられる。ただし、海水のPONの割合は増加していない。

図(1)-11(b)より、海水のTPに対するDIP、DOP、PPの割合¹¹⁾は、それぞれ60%、16%、24%であ

り、海域ではDIPの割合が多く、河川水の割合（43％）よりも増加する結果が得られた。つまり、窒素とは異なり、河川と比べて溶存態無機物の割合が増えている。ただし、TP濃度は河川の平均値が0.13 mg/Lであるのに対して、海域では0.013 mg/Lに減少している。

以上より、播磨灘流域と備讃瀬戸を比較すると、窒素についてはほぼ同程度の割合で変化しているが、リンについては違いがみられた。

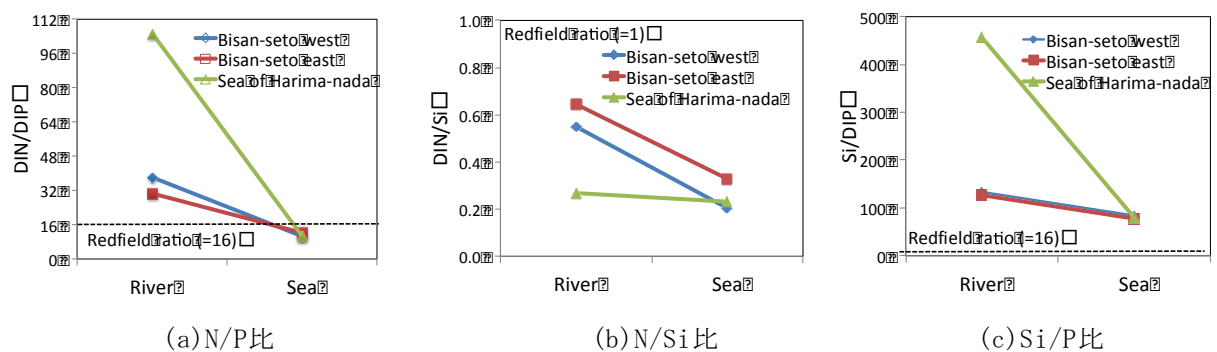
（３）備讃瀬戸と播磨灘南部における栄養塩比の比較

図(1)-12は、2011年2月～2012年1月に、備讃瀬戸西部、備讃瀬戸東部、播磨灘にそれぞれ流入する河川水および各海域の海水の溶存態無機物の窒素、リン、ケイ素のモル比の関係を示す。海の水のデータは浅海定線調査¹⁶⁾の結果を用いた。

１）N/P比

図(1)-12 (a)より、すべての河川でDIN/DIP比はレッドフィールド比（=16）（以下、RF比）より大きくなっており、窒素に富みリンに乏しい状態にあることがわかった。この結果から、リンが河川の植物プランクトンによる一次生産の制限因子になっている可能性が考えられる。また、流入する海域別に比較すると、播磨灘南部に流入する河川は、備讃瀬戸に流入する河川と比較して、DIN/DIP比が大きい結果が得られた。この理由は、東讃域の河川は、流域内の人為的活動による変化が小さいため、リンの負荷が少なく、自然由来の硝酸態窒素が相対的に多いため（図(1)-9）と考えられる。

一方、海域では、各水域の違いは河川と比べて小さいことが分かった。これは、備讃瀬戸の速い潮流により、海水が移動し、混合しているためと考えられる。また、RF比よりも小さく、海域では、窒素が不足傾向にあることがわかった。この結果は、播磨灘中央部と北部海域で示された1994年以降の状況¹⁷⁾や図には示していないが4.（２）１）項の播磨灘流域圏のデータと一致しており、播磨灘南部の香川県側および備讃瀬戸においても同様の状況となっていることが分かった。



図(1)-12 備讃瀬戸・播磨灘南部に流入する河川水および海水のレッドフィールド比の海域別比較
（海域の結果は、香川県（2012）¹⁶⁾を用いた。2011年2月～2012年1月の平均値）

2) N/Si比

図(1)-12(b)より、すべての河川でDIN/Si比は、RF比(=1)より小さくなっており、ケイ素に富み窒素に乏しい状態にあることがわかった。流入する海域別に比較すると、備讃瀬戸に流入する河川は播磨灘南部に流入する河川と比較して、DIN/Si比がわずかに大きい結果が得られた。河川別にみると、大東川、詰田川など栄養塩濃度の高い河川においてDIN/Si比がとくに大きくなっている。また、河川水のDIN/Si比では明瞭な季節変化がみられ、夏季に値が低くなり、冬季に高くなる傾向がみられた。冬季に値が上昇した理由は、河川の堰において珪藻プランクトンが増殖し、ケイ素濃度が減少した可能性が考えられる。この季節変化は播磨灘流域圏のデータにもみられた。

一方、海域では、河川と同様に、RF比よりも小さく、各海域の違いは河川と比べて小さいことが分かった。また、備讃瀬戸のDIN/Si比は西部・東部ともに河川よりも小さくなっており、海域においてDINがSiよりも優先的に減少していることが分かる。河川水に含まれるSiが多いことから、海域では、珪藻プランクトンが増殖しやすい環境にあり、珪藻による栄養(窒素)の吸収が進みやすい環境であることが示唆される。一方、播磨灘南部に流入する河川のDIN/Si比は海域とほぼ同程度(=0.2)であることがわかった。

3) Si/P比

図(1)-12(c)より、すべての河川でSi/DIP比はRF比(=16)より大きくなっており、ケイ素に富みリンに乏しい状態にあることがわかった。上記(a)、(b)で示した結果から、河川水のケイ素は豊富にあり、リンよりも窒素が多いことから、リンが河川の植物プランクトンによる一次生産の制限因子になっていることが考えられる。また、流入する海域別に比較すると、播磨灘南部に流入する河川は備讃瀬戸に流入する河川と比較して、Si/DIP比が大きい結果が得られた。また、河川水のSi/DIP比の季節変化は、DIN/Si比でみられたような変化は無く、リンの変化は窒素と比べて複雑であると推察される。

一方、海域では、各水域の値はほぼ同じであることが分かった。また、海のSi/DIP比は河川よりも小さくなっており、ケイ素がリンよりも優先的に減少している結果が得られた。河川と同様に海域でもRF比よりも大きく、ここでも、陸域の豊富なケイ素が海域に供給されていることが分かった。

4) まとめ

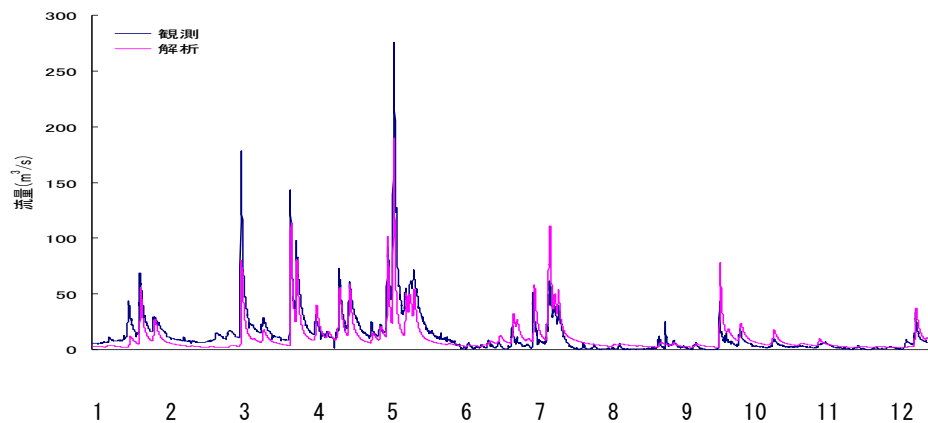
以上より、備讃瀬戸および播磨灘南部に流入する河川水の特徴としては、備讃瀬戸西部および東部に流入する河川の栄養塩比の特徴は似ており、播磨灘南部に流入する河川の特徴と異なっていた。一方、海域では、備讃瀬戸の速い潮流により海水が移動するため、海域別の特徴の違いはみられなかった。また、N/P比より、河川水と海水における窒素とリンのバランスが逆転しており、海では窒素不足であるが、河川ではリン不足であることが明らかとなった。

(4) 河川流量の特徴の解明

1) 河川流量の時間変動

播磨灘に流入する河川は大小様々にあるが、河川流量が連続的に観測されている河川は一級河川の加古川と揖保川だけである。そこで、分布型水文流出モデル⁸⁾を用いて播磨灘に流入する河川流量を推定した。結果の一例を図(1)-13に示す。観測値(国土交通省¹⁸⁾)とシミュレーション結果を比較すると、出水時における時間応答性がよい結果が得られた。シミュレーション結果の精

度について、相対誤差（root mean square error (RMSE) の相対値）を用いて定量的な検討を行った結果、月流量の誤差（観測－解析）はピーク流量の差が大きい3月と5月が大きくなった。また、相対誤差は低水時の8月と9月の値が大きくなった。これは取水等の水利用の影響により、実測流量が少ないために相対誤差が大きくなったと考えられる。本研究では、出水時の流量増加に着目していることから、流域における多様な水利用や洪水ピーク流量の差などを考えると、本モデルによる結果は妥当であると判断した。

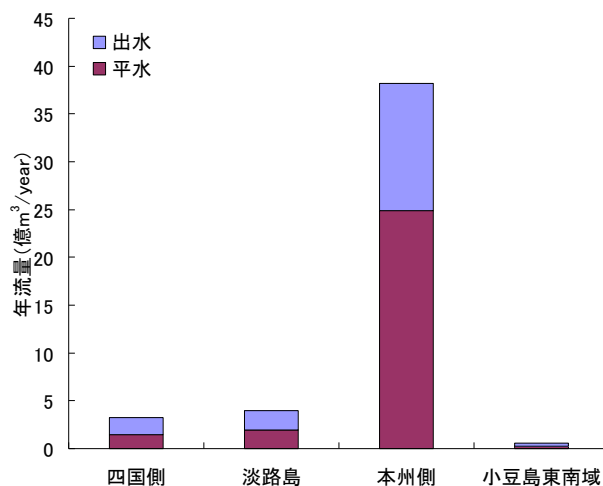


図(1)-13 揖保川（上川原地点）における河川流量の比較（2002年、1時間データ）

2）播磨灘流域圏における河川流入の特徴と出水の影響

播磨灘は、北は播磨、南は四国、東は淡路島、西は小豆島に囲まれている。それら陸域から淡水が流入する（図(1)-3）。図(1)-14は各四方面からの1年間の河川流量を示す。播磨域に流入する河川流量のうち、本州側（播磨域）からの河川流入量が流域圏全体の約85%を占める結果が得られた。この割合は2002年と2003年でほぼ同じであった。また、出水時に流入する割合（出水日数を30日とした場合）は、1年間の総流量のうち約35～60%を占めていることがわかった。つまり、播磨灘の北と南では、海域水質の特徴が大きく異なる。

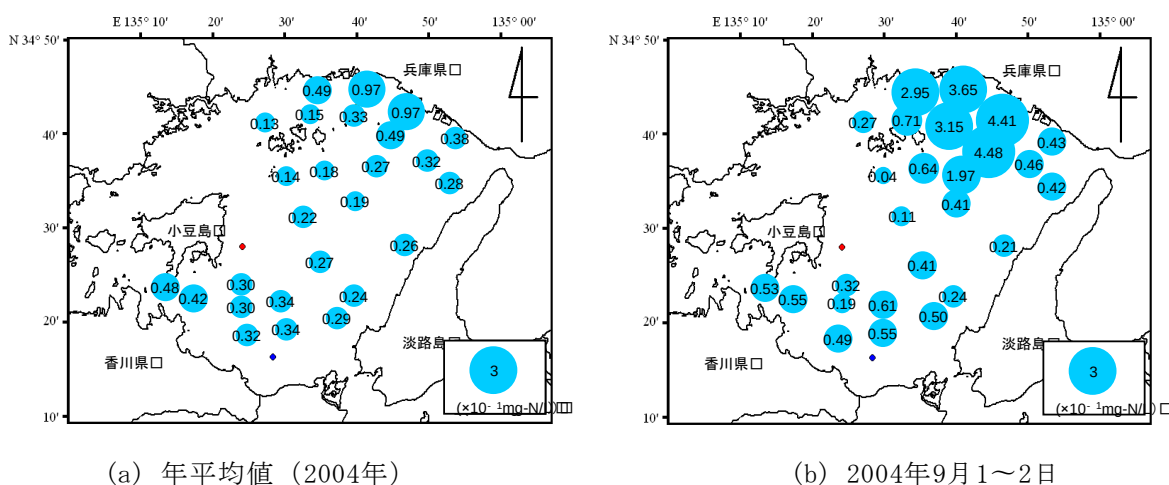
つまり、播磨灘に流入する河川流量は本州側（播磨域）からの流入量が多く、播磨灘の北と南では、海域水質の特徴が大きく異なると考えてよいといえる。播磨灘の北部では河川水が海域水質におよぼす影響が強い結果が定量的に示された。とくに、出水時に短期的に流入する河川流量が多く、播磨灘の海域環境を考察する際には河川流量の空間偏差や出水時の短期的な河川流出の影響を考慮することが重要であることが示された。



図(1)-14 播磨灘に流入する河川流量の空間的特徴および平水流量と出水流量の割合（2003年）

（５） 出水時における播磨灘の溶存栄養塩の濃度変化

4.（４）節より、播磨灘においては北部海域における淡水流入量が85%と大きく、かつ、播磨灘を囲むいずれの場所からも出水時の河川流量が約35～60%と多い結果が示された。そこで、出水による海域水質の変化に着目して、海域データを解析した。図(1)-15(a)に示した年平均値をみると、本州側（播磨側）の陸域近くにおいて硝酸イオン濃度が高くなっていることがわかる。このことより、流域面積の大きい河川からの河川水が多く存在する播磨灘北部海域では、定常的に河川水が多く流入しており、栄養状態が高いことが分かる。一方、出水直後の分布を図(1)-15(b)に示す。このとき、調査直前の8月30日に高松アメダス観測所で45 mm/日、姫路アメダス観測所で37mm/日の降水が観測された。とくに、本州側の加古川河口近くでは、出水直後に大量の河川水が海域に流入し、硝酸イオン濃度が大きく増加することが明らかとなった。このとき、播磨灘の北部の方が南部や東部よりも変化がより顕著に表れており、図(1)-14で示した河川流量の空間偏差と対応していることが分かる。

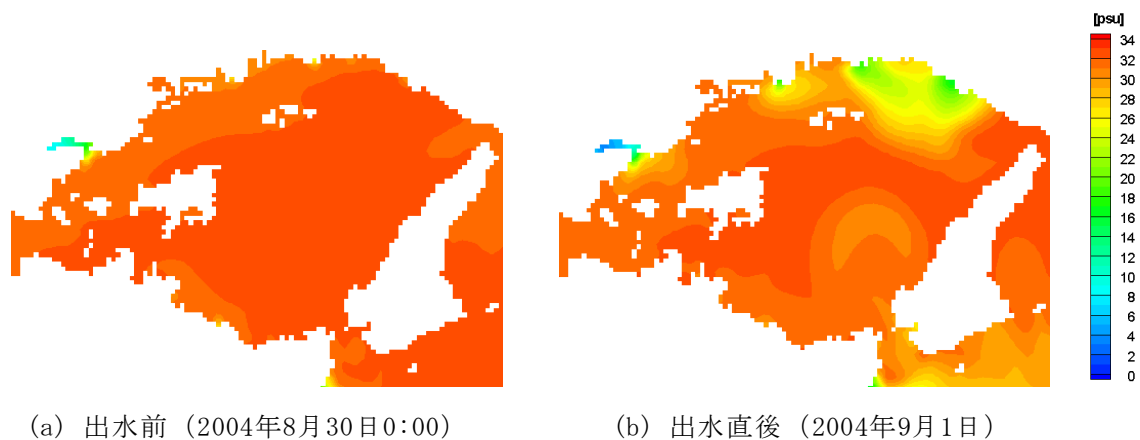


図(1)-15 出水時における播磨灘における硝酸イオン分布

（出典：香川県・兵庫県浅海定線調査データ(2004)¹⁹⁾、²⁰⁾）

(6) 海域流動シミュレーションによる河川水の空間分布の推定

海域における観測は月に一回しか実施されていないため、短期的な河川からの出水が海域の水質変化に与える影響をより詳細に検討することが難しい。そこで、海域流動のシミュレーションを行い、河川水の海域における挙動を再現し、河川水の広がりについて検討を行った。図(1)-16は、観測データが存在する2004年9月初めにおける出水前後の播磨灘の表層塩分の空間分布を示す。この結果、2004年8月30日の降雨により、規模の大きい河川が存在する播磨灘北部海域において河川水の流入の様子を確認できる（図(1)-16(b)）。この分布は、図(1)-15で示した観測データと一致した分布を示していることから、シミュレーション結果は妥当と判断できる。また、紀伊水道西側に流入する吉野川の河川水が鳴門海峡を通じて播磨灘中央部にジェット状に流入する様子が確認できる。



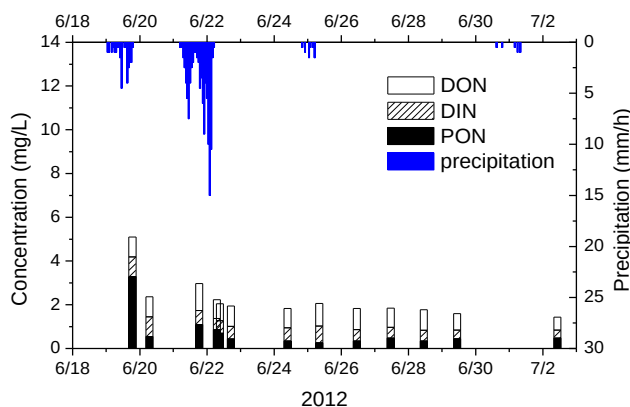
図(1)-16 出水前後における播磨灘の表層塩分分布の比較

(7) 出水時における河川の形態別栄養塩濃度の時間変動特性

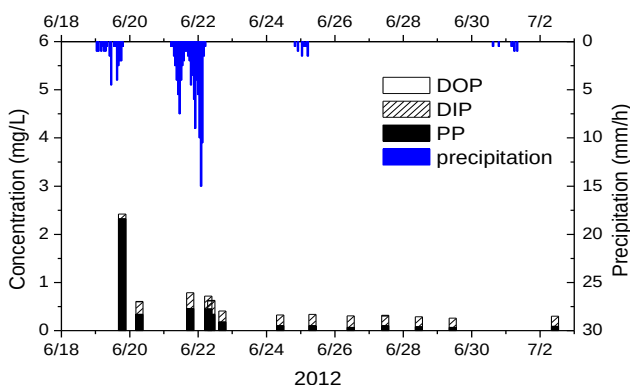
4.(4)節の結果より、出水時の河川流入量の割合が大きい結果が示された。また、4.(2)節より、平水時の河川水の栄養塩形態として、溶存態が多い結果が示された。そこで、出水時における河川水の栄養塩形態を調べる観測を行った。出水時の観測は、降雨直後に迅速に行う必要があるため、備讃瀬戸東部に流入する新川において実施した。2012年6月の調査では19日に台風4号が上陸し、最大で4.5 mm/hの降雨、22日には前線上に新たな低気圧が発生し、前線活動が活発化し、最大で15 mm/hという強い降雨があった。台風上陸前の15～17日では合計31.5 mm、19日では合計24 mm、21～22日では合計105.5 mmの降水量が高松地方气象台で観測された。

出水時における河川水中の栄養塩の形態別特徴の時間変化を図(1)-17に示す。出水直後の6月19日18時40分にPONが高い値を示す結果が得られた。PONは3.29 mg/lと最も高い値を示した。その後、PONは減少し、21日の降雨で再び増加したが、PONは19日の値までは大きくならなかった。その後、PON濃度は減少した。割合としてみると6月19日のピーク時にPONが64%とTNの半分以上を占めており、出水時のTN増加には懸濁物質が大きく影響する結果が示された。なお、図には示していないが、6月15～17日にかけて降雨（31.5 mm、高松アメダス）があったが、採水できなかったことから、本結果はファーストフラッシュ後の状況を示すと考えられる。同様に、リンについても、6月

19日18時40分にPP濃度が2.32 mg/lと最も高くなる結果が得られた。その後、減少する結果が得られた。割合としてみると6月19日のピーク時にPPが96%とTPのほとんどを占める結果が得られた。つまり、出水時における栄養塩形態は平水時と大きく異なり、かつ、河川流量も多く、海域においてより広範囲に広がることから、海域流入後の懸濁態の挙動も重要であることが示唆される。



(a) 窒素



(b) リン

図(1)-17 出水時における河川（新川）における窒素・リンの形態別時間変化

(8) ケーススタディ 1：下水処理場による総量規制の緩和影響の検討

本節と次節では、課題1の上述までの結果および課題2の結果から、播磨灘流域圏における陸域からの負荷量の変化を想定した解析結果を示す。具体的には、下水処理場による総量規制の緩和効果の検討を行った。ここでは、下水処理場における除去率を変化させることで、下水道整備範囲内から発生する負荷量を再計算し、除去率が変化することで、生活系負荷量が過去のどの時期と同じ値になるかについて検討した。対象は、加古川下流流域下水道、加古川上流流域下水道、揖保川流域下水道、単独公共下水道とした。また、2005年を基準とした。

検討する除去率は、2005年時のCODの除去率85～90%を、それぞれ80、70、60、50、30、0%の6

種類に、2005年時のTNの除去率50～70%を、それぞれ60、40、30、10、0%の5種類に、2005年時のTPの除去率80～90%を、それぞれ80、70、60、50、30、0%の6種類にそれぞれ変化させた場合の負荷量を算出する。

1) COD発生負荷量

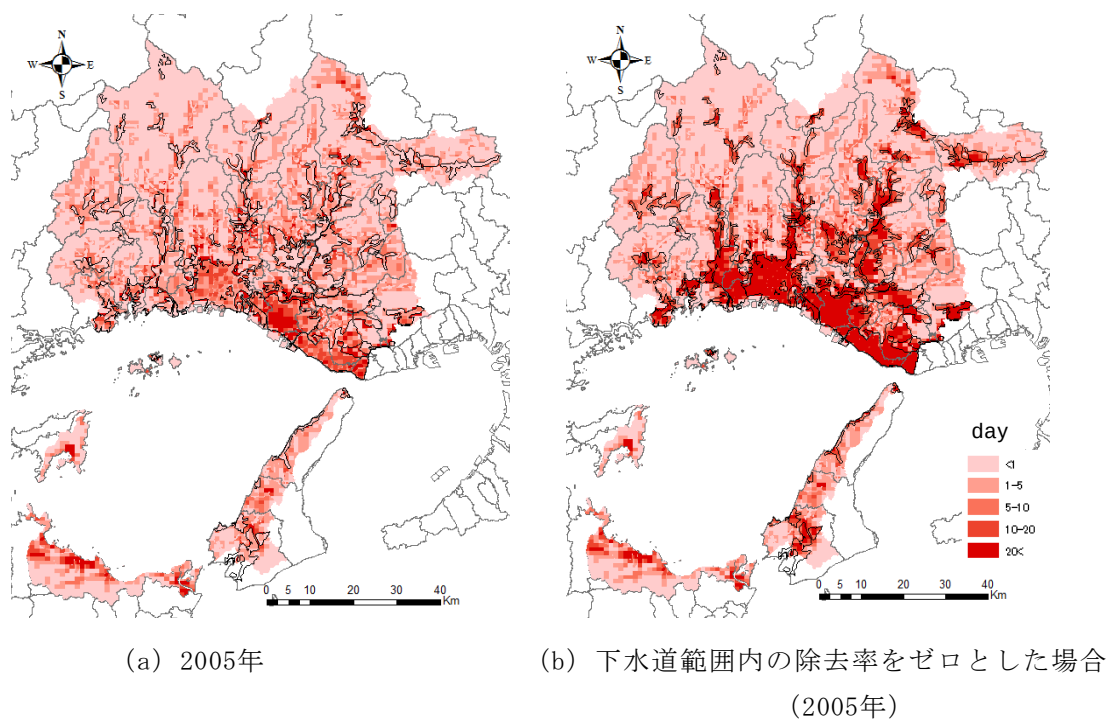
生活系COD発生負荷量の空間分布を図(1)-18に示す。下水道が考慮されている現状（2005年）における負荷量分布図と下水道範囲内の下水処理場の除去率を0%とした場合、つまり、下水道が全く整備されていない場合における負荷量分布図を比較すると、負荷量やその広がり大きく異なっており、下水道整備に伴い負荷量が大きく削減されていること状況が示された。とくに、加古川上流流域下水道や揖保川下流流域下水道において、負荷量が大きく増加している結果が得られ、人口や産業が多い地域における負荷が下水道により削減されている現状が示された。このとき、除去率 r を0%とした場合の生活系負荷量は、2005年における除去率 $r=85\sim90\%$ の場合と比較して、19 t/dayから68 t/dayに、約3.5倍に増加することが分かった。

図(1)-19は、下水処理場の除去率を種々変化させた場合に負荷量がどのように変化するかを示す。ここでは、変化した負荷量がどの年代の負荷量と等しくなるのかについて環境省の推定結果²¹⁾と比較する。除去率 $r=50\%$ 、 60% 、 70% の場合は、それぞれ1972年、1988年、1998年の負荷量と近い値（42 t/day、36 t/day、31 t/day）を示した。除去率30%の場合、負荷量は大きく増加し、52 t/dayの負荷量が発生する結果となった。仮に、漁業生産量が最大であった1985～88年頃の負荷量に近づけるとすると、下水処理場の除去率を現状の85～90%を60～70%まで下げることができ的可能性が示唆された。なお、生活系以外の発生源からの負荷とのバランスも考える必要がある。

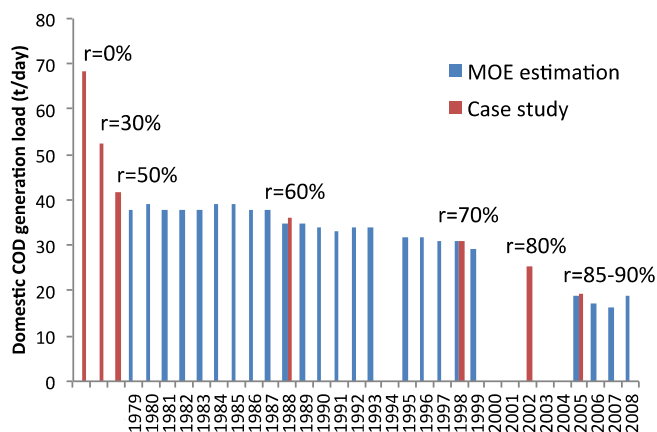
2) TN発生負荷量

CODと同様に、TN発生負荷量の空間分布の変化をおよび下水処理場の除去率を種々変化させた場合の結果をそれぞれ、図(1)-20と図(1)-21に示す。図(1)-20より、下水道が考慮されている現状（2005年）における負荷量分布図と下水道範囲内の下水処理場の除去率を0%とした場合を比較すると、COD発生負荷量の変化（図(1)-18）と同様に、下水道整備に伴い負荷量が大きく削減されている状況が示された。とくに、加古川上流流域下水道や揖保川下流流域下水道において、負荷量が大きく増加している結果が得られ、人口や産業が多い地域における負荷が下水道により削減されている現状が示された。

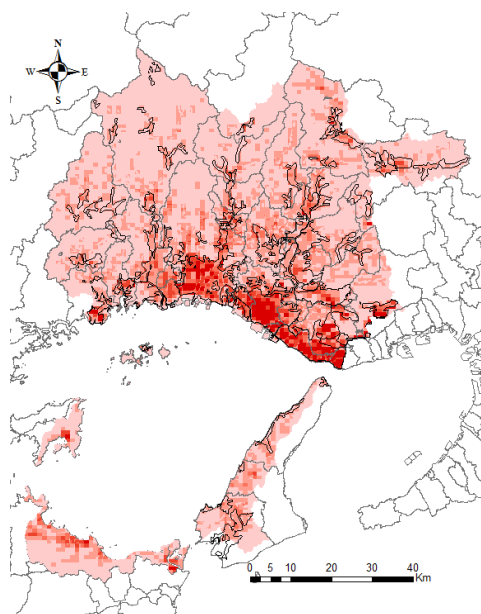
図(1)-21より、TN負荷量については、比較に用いた環境省の推定結果の数がCODよりも少ないが、1984年から1999年にかけて負荷量の変化は少ない。また、下水処理における現状の除去率が50～70%であり、CODの除去率と比較して大きくはない。そのため、漁業生産量が最大であった1985～1988年頃に近づける場合、除去率を下げずに現状（2005年）の50～70%を維持してよい結果が得られた。したがって、窒素の観点から考えると、高度処理の必要はないことが示唆される。



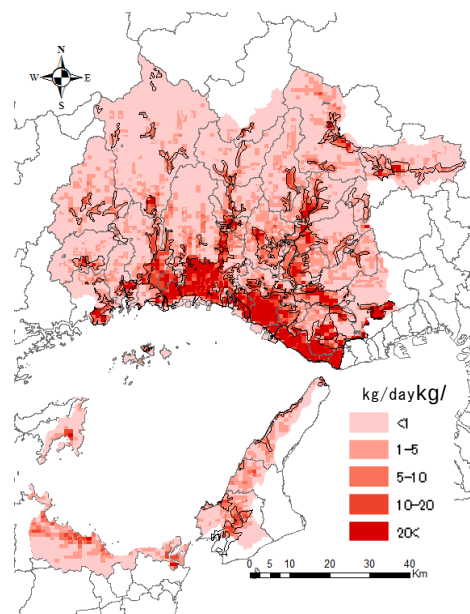
図(1)-18 生活系COD発生負荷量の空間分布
(黒枠線は、下水道整備範囲を示す。)



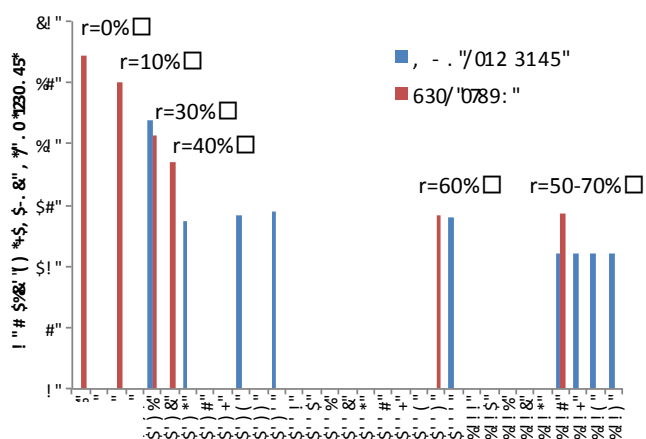
図(1)-19 下水処理場の除去率 r を変化させた場合の生活系COD負荷量の推定
(2005年を基準とする。環境省の推定結果 (1979～2008年)²¹⁾ もあわせて図中に示す。)



(a) 2005年

(b) 下水道範囲内の除去率をゼロとした場合
(2005年)

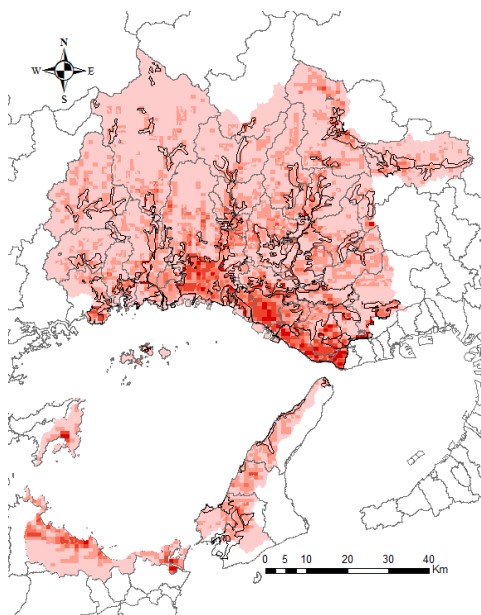
図(1)-20 生活系TN発生負荷量の空間分布
(黒枠線は、下水道整備範囲を示す。)



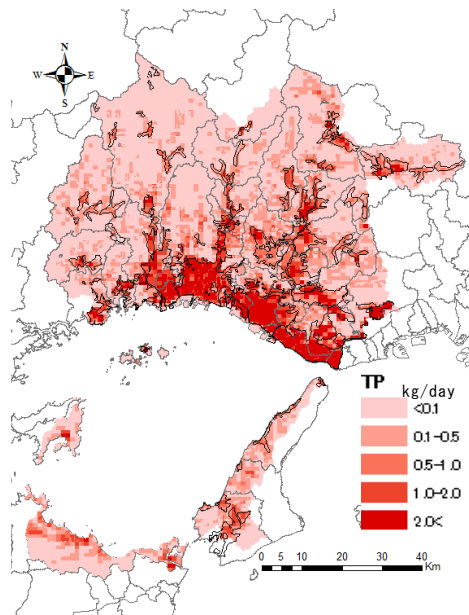
図(1)-21 下水処理場の除去率 r を変化させた場合の生活系TN負荷量の推定
(2005年を基準とする。環境省の推定結果(1982～2008年)²¹⁾もあわせて図中に示す。)

3) TP発生負荷量

同様に、TPの結果を図(1)-22と図(1)-23に示す。図(1)-22に示した空間分布の変化は、基本的にCODやTNとほぼ同じ変化であるといえる。図(1)-23に示した除去率を変化させた場合のTP負荷量については、漁業生産量が最大であった1985～1988年頃に近づける場合、現状の除去率80-90%を70%まで下げることができる可能性が示唆された。

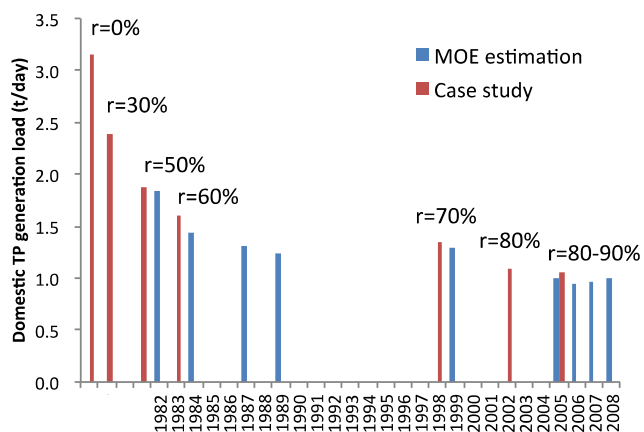


(a) 2005年



(b) 下水道範囲内の除去率をゼロとした場合
(2005年)

図(1)-22 生活系TP発生負荷量の空間分布
(黒枠線は、下水道整備範囲を示す。)



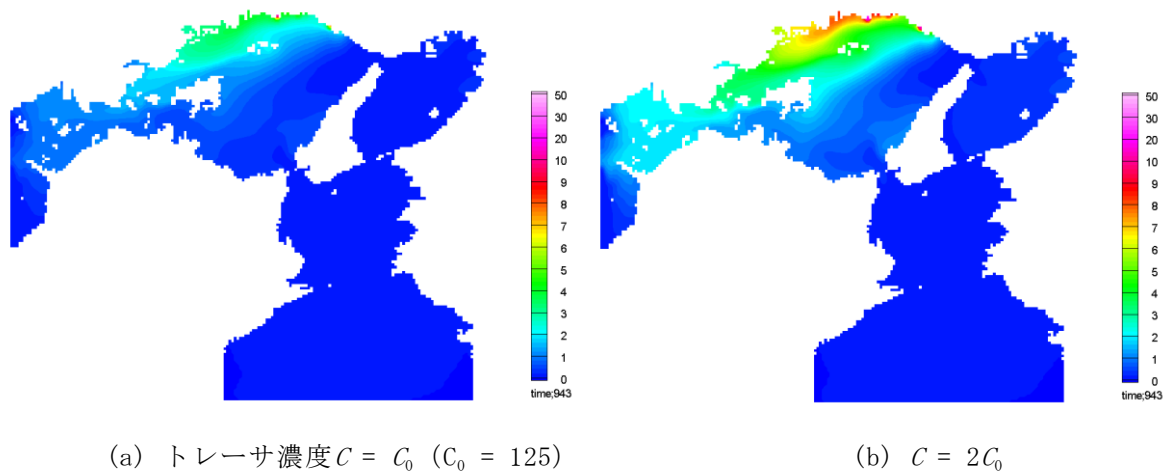
図(1)-23 下水処理場の除去率 r を変化させた場合の生活系TP負荷量の推定
(2005年を基準とする。環境省の推定結果(1982～2008年)²¹⁾もあわせて図中に示す。)

（９）ケーススタディ２：河川水質の変化に伴う海域濃度変化への影響

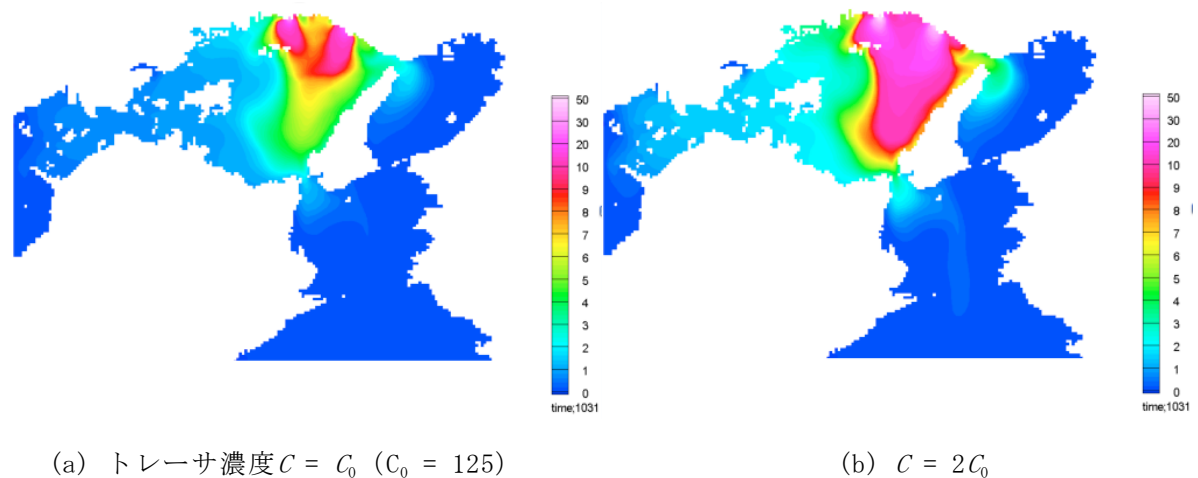
総量規制の緩和により、陸から海へ流入する負荷量も増加するが、例えば、河川流量が増加する出水時には、海域における河川水の広がり方も変化すると考えられる。そこで、4.（６）節で用いた数値モデルを用いて、播磨灘の主要な河川である加古川、揖保川、市川、明石川において、ある一定のトレーサ濃度を与えて河川水の広がりを調べた。また、トレーサ濃度を増加させたケーススタディを実施し、河川水質変化（溶存態栄養塩濃度の増加）による河川水の広がりの変化を調べた。

図(1)-24に平水時の結果を示す。同図（a）より、播磨灘北部に流入する河川水は平常時に、播磨灘北側において東西方向に分布しており、また、小豆島の北側を通じて備讃瀬戸海域まで広がっていることが分かった。同時に、播磨灘南部への広がりには少ないことがわかった。また、同図（b）より、河川水のトレーサ濃度が２倍に増加することで、河川水の分布範囲は拡大するが、主に、播磨灘北部海域に限定して分布する結果が得られた。また、河川水は小豆島の北側を通り、備讃瀬戸の西部海域まで広く分布する結果が得られた。また、播磨灘北側の河川水の広がりが小豆島の東側まで到達することにより、播磨灘の中央部においても河川水の広がりが確認された。

つぎに、図(1)-25は大規模な出水があった直後の河川水の広がりを示す。10月19日、20日にそれぞれに60.5 mm、98.0 mmの降水量が姫路アメダス観測所において記録された。同図（a）より、10月30日には、大量の河川水は、河口から南方へと広がっており、播磨灘中央部から南部へと広く分布する結果が得られた。とくに、淡路島沿岸に沿って北部から南部まで河川水が達している結果が得られた。かつ、短期的に広がっている。一方、河川水の濃度が２倍に増加した場合（同図（b））では、最も濃い水塊は淡路島西岸および播磨灘中央東部に広く分布する結果が得られた。これらの結果より、出水により、播磨灘の北側から流入する河川水は播磨灘東部に広く分布することが分かった。総量規制の緩和により、流入負荷量が増加することは自明であるが、河川水に含まれる溶存物質の広がる範囲は大きく拡大し、また、地形の影響を受けて変化しており、沖合への溶存態の栄養塩供給に対して強い影響が生じていることが示唆される。とくに、出水時には濃度の濃い水塊が短時間で輸送されるため、沖合への栄養塩供給に対して、より大きな影響を有することが示唆された。



図(1)-24 平水時における河川水の分布 (2004年8月1日0:00)
(対象河川は、加古川、揖保川、市川、明石川)



図(1)-25 出水時における河川水の分布 (2004年10月30日0:00)
(対象河川は、加古川、揖保川、市川、明石川)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでに総量として用いられてきた全窒素や全リンに対して、それらの溶存態・懸濁態といった形態別の特徴を明らかにした。この成果は、河川水質と海域水質の栄養塩バランスや海域における植物プランクトンによる栄養塩摂取の時間的速度を明らかにする上で重要な知見である。具体的には、平水時に、河川水のTNに対するDIN、DON、PONの割合はそれぞれ、約7割、約2割、約

1割であることが分かった。また、この割合は河川と海域で異なることが分かった。また、TPに対するDIP、DOP、PPの割合はそれぞれ、約4割、約2割、約4割であることが分かった。一方、出水のピーク時には、PONがTNの6割まで増加し、PPはTPの9割まで増加する結果が得られた。

播磨灘の北側から流入する河川水は、平水時には播磨灘の北側に分布し、備讃瀬戸への影響も示唆された。一方、出水時には播磨灘中央部、とくに淡路島沿岸に河川水が広がることが分かった。つまり、播磨灘は北部と南部で特徴が異なっており、海域を分けて考えることが必要である。一方で、播磨灘北部の影響が備讃瀬戸にも及んでおり、灘・湾・瀬戸の連続性と分割性について今後、検討することが必要である。また、これらの特徴は、平水時と出水時においても違いがみられることから、出水の特徴（規模、回数）を考慮した検討も必要である。

出水時における栄養塩形態は平水時と大きく異なり、懸濁物が多くなり、海域においてより広範囲に広がることから、海域流入後の懸濁態の挙動も重要であることが示唆される。

以上より、植物プラントンやノリの生育に必要な栄養塩の形態は溶存態であることから、形態を調べることが重要である。短期的には出水時を含めた負荷量を明らかにする必要がある、また、長期的には出水時に流入した懸濁態の海域における分解・沈降などの形態変化を明らかにする必要がある。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

今後、学会発表もしくは学術論文を通じ、成果の広報・普及に努める。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

近年、河川水質が改善傾向にある中で、河川水中の窒素やリンの形態特性を明らかにすることで、総量として基準を定めている排出規制や河川・海域の環境基準の検討に対して、溶存態に着目した環境基準の考え方を整理する上での一つの知見を提供するものと考えられる。

また、灘・湾・瀬戸の連続性と分割性について知見を示した。これらの特徴は、平水時と出水時においても違いがみられることが明らかとなったことから、出水の特徴（規模、回数）を考慮した検討に対して一つの知見を提供することができた。播磨灘では、平水時と出水時で河川水の広がり方が異なるため、複雑であるが、播磨灘を南北で分けることが必要である。逆に、播磨灘北部と備讃瀬戸を連続した水域とみなすことも考えられる。結果的には、高栄養塩の河川水がどのように時間をかけて海域を移動するのかを考慮することが必要である。

下水道整備に伴い負荷量が大きく削減されている状況が示された。また、下水処理場の除去率を変化させることで、仮に、漁業生産量が最大であった1985～88年頃に近づけるとすると、COD負荷量について、2005年の下水処理場における除去率を60～70%までに下げることができる可能性が示唆された。TN負荷量は、除去率を下げずに、現状維持がよい結果が得られた。したがって、窒素の観点から考えると、高度処理の必要はないと示唆される。TP負荷量は除去率を70%まで下げることができる可能性が示唆された。海域における水質変化を詳しくみる必要があるが、陸側の視点から、下水処理場の総量規制や河川水質の基準策定に対して、陸からの負荷と海域の生態系との関係（バランス）をどのように取るべきであるのかについて一つの知見を提供することができた。なお、ここでの検討結果については、生活系以外の発生源からの負荷とのバランスも考える必要がある。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 石塚正秀・石川真菜・宮川昌志・赤井紀子・多田邦尚：香川県における河川水の栄養塩形態と備讃瀬戸・播磨灘への影響、土木学会論文集B1(水工学)、第69巻、No. 4、I_1423-I_1428、2013.
- 2) 石塚正秀・矢野利樹・平木大補・和田有朗：下水道整備が陸域の有機物負荷量の長期的な変化に与える影響、土木学会論文集B1(水工学)、第69巻、No. 4、I_1717-I_1722、2013.

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 宇野裕太・石塚正秀：時間変動を考慮した汚濁負荷解析にもとづく河川水質の推定、瀬戸内海研究フォーラムin大分 発表概要集、p. 30、2011.
- 2) 宇野裕太・石塚正秀・溝口大介：汚濁負荷量と流量の空間分布を考慮した河川水質モデルの構築、土木学会第66回年次学術講演会講演概要集、VII-019、pp. 37-38、2011.
- 3) 平木大補・石塚正秀・矢野利樹：播磨流域圏における生活系発生負荷量の推定に関する研究、平成25年度土木学会四国支部第19回技術研究発表会講演概要集、pp. 61-62、2013.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 水産庁瀬戸内海漁業調査事務所：瀬戸内海の赤潮発生件数、漁業被害件数、
<http://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/nenkan/index.html>、2012.9月取得.

- 2) 藤原建紀・渡邊康憲・樽谷賢治編：海の貧栄養化とノリ養殖、海洋と生物、181、第31巻、第2号、pp.109-172、2009.
- 3) 多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫：瀬戸内海の水質環境とノリ養殖、分析化学、Vol. 59、No. 11、pp. 945-955、2010.
- 4) 石塚正秀・寺本健士・紺野雅代・井伊博行・平田健正：紀ノ川下流の淡水域・汽水域における冬季から夏季の栄養塩・植物プランクトンの現地調査、水工学論文集、第49巻、第2号、pp.1519-1524、2005.
- 5) Smith, P. E. and Eppley R. W.: Primary production and the anchovy population in the Southern California Bight: Comparison of time series, Limnol. Oceanogr., 27, 1, 1982.
- 6) 藤原建紀・駒井幸雄：沿岸海域の栄養塩動態、海洋と生物、181、第31巻、第2号、pp.134-139、2009.
- 7) 中口譲・山口善敬・西村崇・秦野善行・今中麻幸代・有井康博：淀川水系における富栄養化関連物質の挙動とその季節変化、地球化学、第39巻、pp.173-182、2005.
- 8) 石塚正秀・江種伸之：農業用水取水ルールを考慮した分布型水文流出モデルによる紀の川流出解析、水工学論文集、52、391-396、2008.
- 9) 岡山県農林水産総合センター：浅海定線調査データ、2002～2004.
- 10) 徳島県農林水産総合技術支援センター：浅海定線調査データ、2002～2004.
- 11) 宮川昌志・藤原宗弘・龍満直紀・赤井紀子・吉松定昭・大山憲一：播磨灘南部海域における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発、沿岸海域の栄養塩管理技術の開発委託事業成果報告書、pp.28-49、2012.
- 12) 国土交通省：平成23年度末の汚水処理人口普及状況について（報道発表資料）、2011.8.31.
- 13) 国土交通省：平成23年度末の下水道整備状況について（報道発表資料）、2011.8.31.
- 14) 原田和弘・宮原一隆・二羽恭介：播磨灘北部海域における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発、沿岸海域の栄養塩管理技術の開発委託事業成果報告書、pp.16-32、2013.
- 15) 中岡雅倫：3次元励起蛍光光度法(3D-EEMs)を用いた広島湾の溶存有機物の定量・定性解析、香川大学大学院農学研究科修士論文、56p、2012.
- 16) 香川県水産試験場：浅海定線調査、2011-2012.
- 17) Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Miyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tanda, M., Manabe, M., Manabe, T. and Tada, K.: Nutrient and Phytoplankton Dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35 Year Period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coast*, 33, 417-427, 2010.
- 18) 国土交通省：水文水質データベース、<http://www1.river.go.jp/>.
- 19) 香川県水産試験場：浅海定線調査データ、2004.
- 20) 兵庫県農林水産技術総合センター：浅海定線調査データ、2004.
- 21) 環境省：発生負荷量等調査報告書、1979～2008.

(2) 陸域からの栄養塩負荷量変動

神戸山手大学現代社会学部

和田有朗

平成23～24年度累計予算額：4,828千円（うち、平成24年度予算額：2,145千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

播磨灘流域圏における発生負荷量の特徴として、生活系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることが明らかとなった。また、下水道整備により、人口増加に伴う生活系負荷量の増加が抑制され、下水道整備の進んだ沿岸域における負荷が減少していることが明らかとなった。産業系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において、沿岸部および加古川下流および明石川下流の臨海部、揖保川や市川、加古川流域の河道沿いに集中して分布していることが明らかとなった。土地系負荷量は、CODは水田、TN・TPは水田とその他農用地において高い負荷量を示すことから、加古川中下流域、河道に沿った場所、淡路島において高い値を示すことが明らかとなった。

人口増加や工業出荷額の増加が80年代・90年代にかけて増加したが、発生負荷量（とくに生活系）は減少しており、下水道整備等生活排水処理施設の普及の効果が大きい結果が示された。土地系のCOD負荷量はわずかに増加傾向、TN負荷量は減少傾向、TP負荷量はわずかに減少していることがわかった。土地系COD負荷量が増加している原因は、原単位の小さい森林の減少による影響が大きく、土地系TN・TP負荷量の減少に影響を与えている原因は水田とその他農用地の減少である。

明石川を対象とした詳細な検討の結果、以下のことが明らかとなった。a) 1970年後半と2000年後半を比較すると、3つ支川におけるBOD負荷量は約84%、COD負荷量は約69%減少する結果が得られた。b) 下水処理水を含めた明石川流域から海域へのBOD負荷量は約40%減少したが、COD負荷量は減少していない（約6%増加）結果が得られた。c) 1970年代から2000年代にかけて人口が約3倍増加したことを考えると、人口増加に合わせて下水道整備を進めることで、河川の有機汚染が抑制され、下水道による負荷の抑制効果は非常に大きいことがわかった。

[キーワード]

発生負荷量、播磨灘流域圏、下水道整備、GIS、総量規制

1. はじめに

平成22年度の全国の河川の環境基準達成率（BOD）は92.5%まで進み¹⁾、河川環境の改善が進んでいる。この要因の一つとして、下水道整備による効果が考えられる。下水道の普及率は毎年向上し、平成23年度3月時点で全国の下水道処理人口普及率は75.1%である²⁾。下水処理によるCODの平均的な除去率は50～97%となっており³⁾、大阪湾では、下水処理場における総COD除去量はCOD負荷量の約80%に相当する結果が得られている⁴⁾。

河川水質の改善は同時に、海域への有機物供給の減少をもたらしているが、海域の環境基準達成率（COD）は78.3%であり¹⁾、達成率でみると、現在の河川と海域の水環境の関係は高度経済成

長期とは異なり逆転している。瀬戸内海では、1979年以降、CODに対する総量規制が始まり、環境省が示している陸からのCOD発生負荷量は年々減少傾向にある⁵⁾。しかし、第6次総量規制から変更された大阪湾を除く瀬戸内海という区分でみると、COD濃度は1981-83年時点で1.5 mg/lと元々低く、その後は緩やかに増加し、2004-08年では1.9 mg/lまで増加している⁵⁾。つまり、33年間にわたり規制が実施されてきたわけであるが、海域のCOD濃度に減少の傾向はみられていない。一方、70年代にCOD濃度が高い東京湾・大阪湾では、それぞれ3.3、2.9 mg/lまで減少している。

このような海域の水質変化は、半閉鎖性海域においては河川を通じた陸域からの影響や下水道などの排水処理施設からの直接的な影響が大きいと考えられる。しかし、陸域の負荷発生源は様々あり、年々に変化しているために、流域圏としての変化の特徴は明らかにされていない。

2. 研究開発目的

本研究では、瀬戸内海東部の播磨灘に流入する河川流域を対象として、人口増加や産業の変化、土地利用の変化を調べて、陸域から発生するCOD・TN・TP負荷量がどのように長期的に変化したのか、さらに、その空間的な特徴を明らかにする。また、下水道整備により河川水質や発生負荷量が長期的・空間的にどのように変化したのかについて考察を行う。

3. 研究開発方法

(1) 社会基盤データの空間情報解析

負荷量解析に必要な社会基盤データの空間分布図を作成する。対象は、人口、水田・畑・建物用地・山林などの土地利用、工業統計、下水道等生活排水処理範囲である。播磨灘流域情報の作成には、国土数値情報ダウンロードデータサービスより、行政区域（面）、海岸線（線）データ、河川（線、点）、標高・傾斜度5次メッシュ、流域メッシュを用いた。つぎに、生活系情報の作成には、国勢調査より、人口統計メッシュデータ（1kmメッシュ）の1985年、1990年、1995年、2000年、2005年を用いた。つぎに、産業系情報の作成には、（財）経済産業調査会 経済統計情報センターより、工業統計メッシュデータ（1kmメッシュ）産業別の1977年、1990年、1999年、2008年を用いた。つぎに、ノンポイントソース（土地系）情報の作成には、国土数値情報ダウンロードデータサービスより、土地利用細分メッシュデータの1976年、1987年、1991年、1997年、2006年を用いた。そして、各データは流域メッシュデータを用いて流域圏もしくは河川流域毎に切り取った。これらを、GISソフト（ArcGIS）を用いて可視化・解析した。

(2) 既存の河川水質調査データの収集・解析

明石川流域を対象として、13地点の採水地点の中から代表的な5地点の採水地点における水質項目を解析した。長期的な河川水質・流量には、年4～12回測定されている公共用水域データを使用した。下水道放流水の水質・水量データには、年4～24回測定されている結果を用いた。また、明石市による上水取水量には月総量データを用いた。BOD等基礎的項目はほぼ毎月調査が行われているが、T-N、T-Pは年4回程度である。なお、測定データには降雨時のデータも一部含まれている。

(3) 下水処理場における排水量のヒアリング

明石川流域の下水処理場（玉津処理場）においてヒアリングを行い、玉津処理場からの放流水、雨水排水量の提供依頼および水処理技術の調査を行った。放流水については、玉津処理場業務報告書（1981年度～2008年度）⁶⁾をもとにデータ整理を行った。

（４）播磨灘流域圏における発生負荷量の空間分布の推定

１）生活系

人口統計メッシュデータを用いて、人口総数から生活系負荷量を算出する。はじめに人口分布図を作成し、さらに、下水道計画図（兵庫県、2012）⁷⁾をもとに下水道等整備範囲図をデジタル化し、人口分布と合わせて、下水道範囲内人口を算出した（兵庫県のみ）。これらの人口データと1人1日当たりの汚濁負荷量の参考値（g/人/day）と各生活排水処理の除去率を乗じて、生活系発生負荷量を算出した。

２）産業系

工業統計年表から排水量原単位（ $\text{m}^3/\text{day}/\text{百万円}$ ）と環境省調査結果から業種別平均水質濃度（ mg/l ）を乗じて算出した原単位（ $\text{g}/\text{day}/\text{百万円}$ ）を産業系負荷量原単位と設定し、工業統計メッシュデータ（出荷額：万円）と乗じて産業系発生負荷量を算出した。しかし、原単位法では産業系発生負荷量を十分評価できなかったため、上記の算出方法に加えて、環境省の算定結果⁸⁾を参考にして産業系発生負荷量の補正值を算出し、負荷量を補正した。

３）その他系

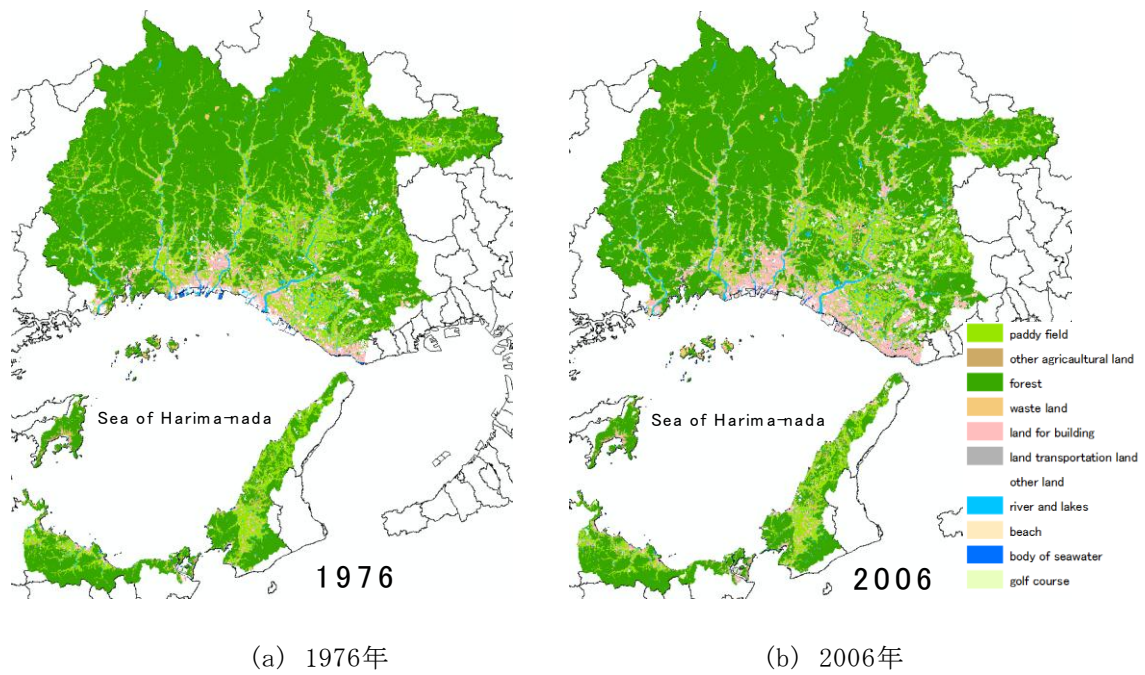
土地の原単位（環境省、2007）⁸⁾と土地利用面積を用いて、ノンポイントソースからの負荷量（土地系負荷量）を算出した。なお、環境省が示しているその他系の負荷量には、土地系以外に畜産系が含まれているが、畜産系のデータは入手困難であったことと、他の負荷量と比較して少ないことから、本研究では土地系負荷量のみを検討した。

４．結果及び考察

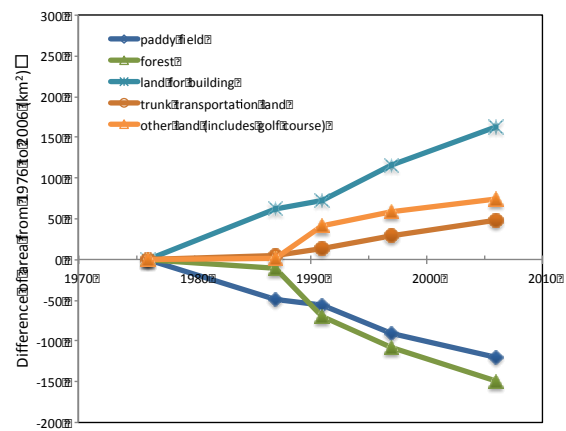
（１）社会基盤データの空間分布とその長期変化

１）土地利用

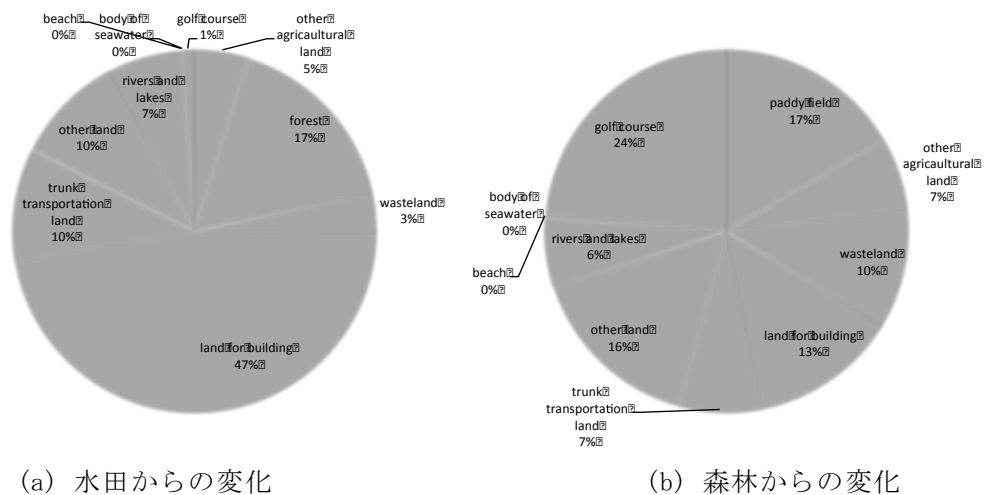
播磨灘流域圏は、総面積 5278.7 km^2 の広大な流域圏であり、圏内の社会基盤情報の変化が発生負荷量に与える影響は大きい。図(2)-1より、2006年現在、総面積の68%を森林が占めており、次いで水田が15%、建物用地が9%占めていることがわかった。播磨灘北側（播磨域）の沿岸部には建物用地が広がっており、播磨域東部の内陸側には森林、水田およびゴルフ場、淡路島には水田やその他農用地、四国側には森林、水田が広がっている。図(2)-2より、播磨灘流域圏全体として、水田と森林がともに減少傾向にあり、1976年に対して2006年では、それぞれ 121 km^2 、 149 km^2 減少した。一方、建物用地、ゴルフ場を含むその他の用地、幹線交通用地は増加傾向にあり、それぞれ 163 km^2 、 75 km^2 、 49 km^2 増加した。



図(2)-1 播磨灘流域圏における土地利用分布の長期変化（1976～2006年）



図(2)-2 播磨灘流域圏における土地利用の長期変化（1976～2006年）



図(2)-3 播磨灘流域圏における水田・森林の土地利用変化(1976～2006年)

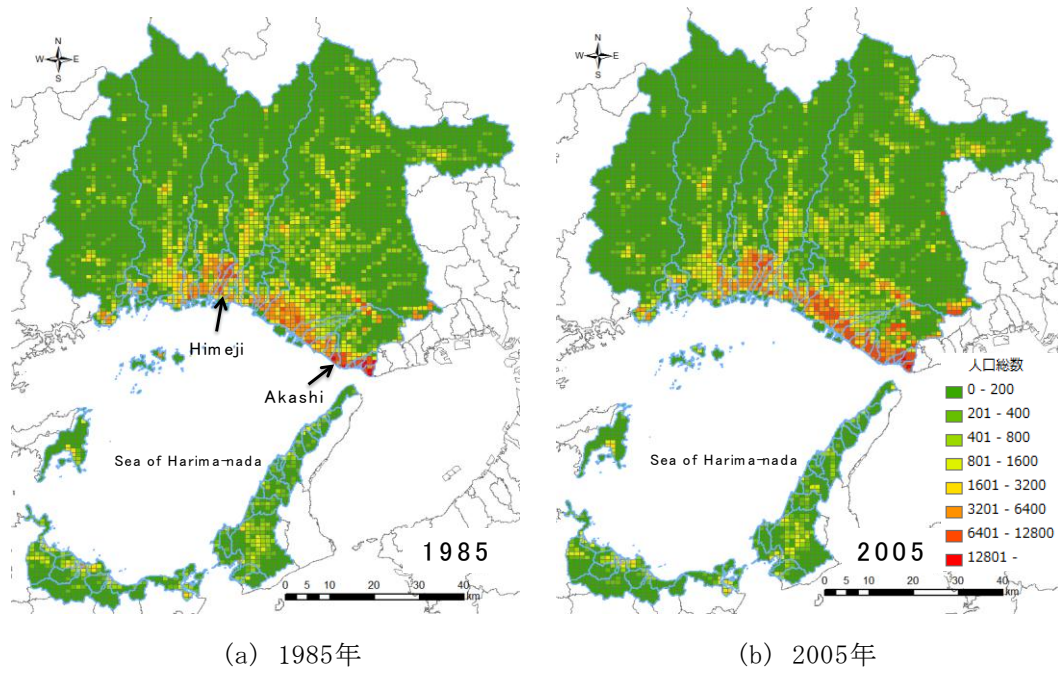
さらに、減少の大きかった水田と森林について、それぞれがどのような土地利用に変化したのかについて解析を行った結果を図(2)-3に示す。水田は、建物用地に47%が変化しており、平野部や河川沿いに比較的に多く分布している水田が宅地開発により減少していることが明らかとなった。一方、森林は、様々な土地利用に変化していることがわかった。最も割合が大きかった土地利用はゴルフ場である。このように、それぞれの土地利用の変化の特徴の違いを知ることによって、負荷発生の変化を考察することができた。

2) 人口

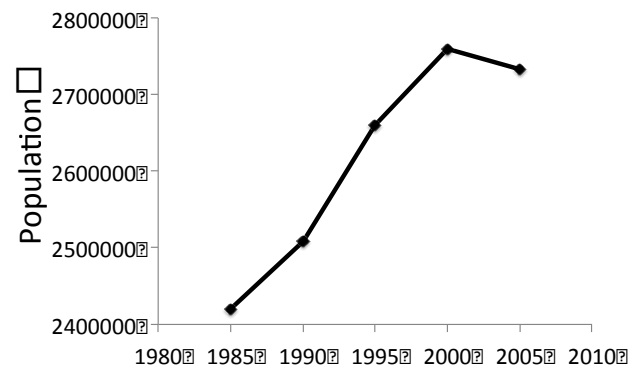
図(2)-4に播磨灘流域圏における人口分布を示す。図(2)-1に示した建物用地が広がっている播磨灘北側(播磨域)の沿岸部には、人口が多く分布していることがわかる。また、加古川や市川、揖保川の河道に沿って、人口が分布している様子もわかる。建物用地が増加した地域(図(2)-1)と対応して、人口が増加していることがわかる。神戸市西区を含む明石川や加古川下流の加古川市、姫路市においても増加している。一方、四国や淡路島側では播磨域と比較して、相対的に人口の変化はわずかである。

図(2)-5より、播磨灘流域圏の人口は、2005年時点で約270万人であり、2000年まで増加し、2000年をピークに近年減少傾向にあることが分かった。また、流域別にみると(図(2)-6)、流域面積の最も大きい加古川が47%を占めている。つぎに多い河川は、明石川であり、17%を占めている。また、図(2)-7に示すように、明石川では流域内人口の増加が顕著であることがわかる。この理由は、明石川流域の大半を占める神戸市西区においてニュータウン建設が進んだことによる。

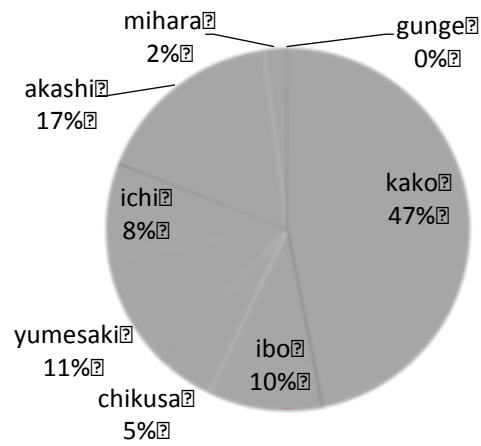
播磨灘流域圏を兵庫側と香川側に分けると、兵庫側：香川側＝19：1であり、兵庫側の割合が高い結果が示された。兵庫側の人口は、1985年で約227万人が2000年の261万人をピークにして、2005年には259万人と近年減少傾向で、香川県側では、1985年で15万人から2005年の13万人まで減少の傾向であることがわかった。生活排水処理別人口をみると、1985年には浄化槽人口が多く全体の31%（兵庫浄化槽人口29%、香川浄化槽人口3%）を占めていたが、下水道整備率の上昇に伴い、流域下水道および単独公共下水道での処理人口が増加し、その割合は流域下水道27%（加古川下流域下水道13%、加古川下流流域下水道8%、揖保川下流流域下水道6%）と単独公共下水道45%で、下水道処理の人口が全体の7割以上を占めるようになった。



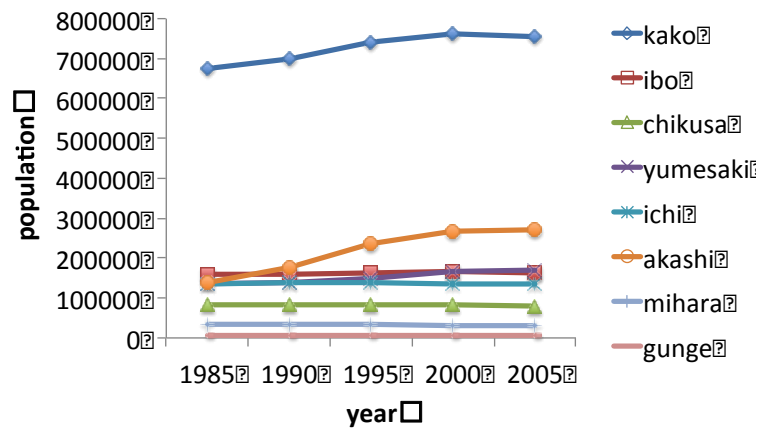
図(2)-4 播磨灘流域圏における人口分布の長期変化（1985～2005年）



図(2)-5 播磨灘流域圏における人口の長期変化（1985～2005年）



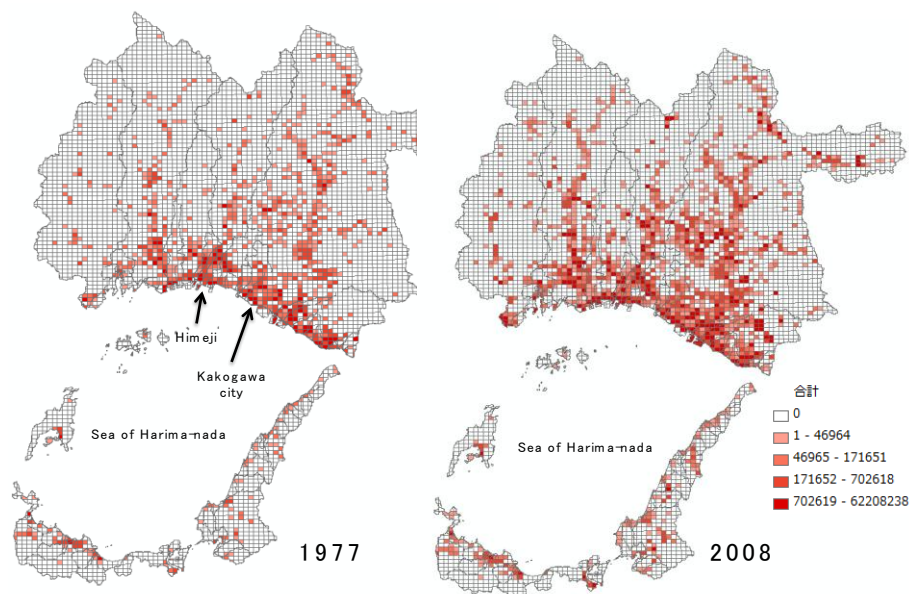
図(2)-6 播磨灘流域圏の主要河川流域内における人口の割合



図(2)-7 播磨灘流域圏の主要河川流域内における人口の長期変化（1985～2005年）

3) 工業

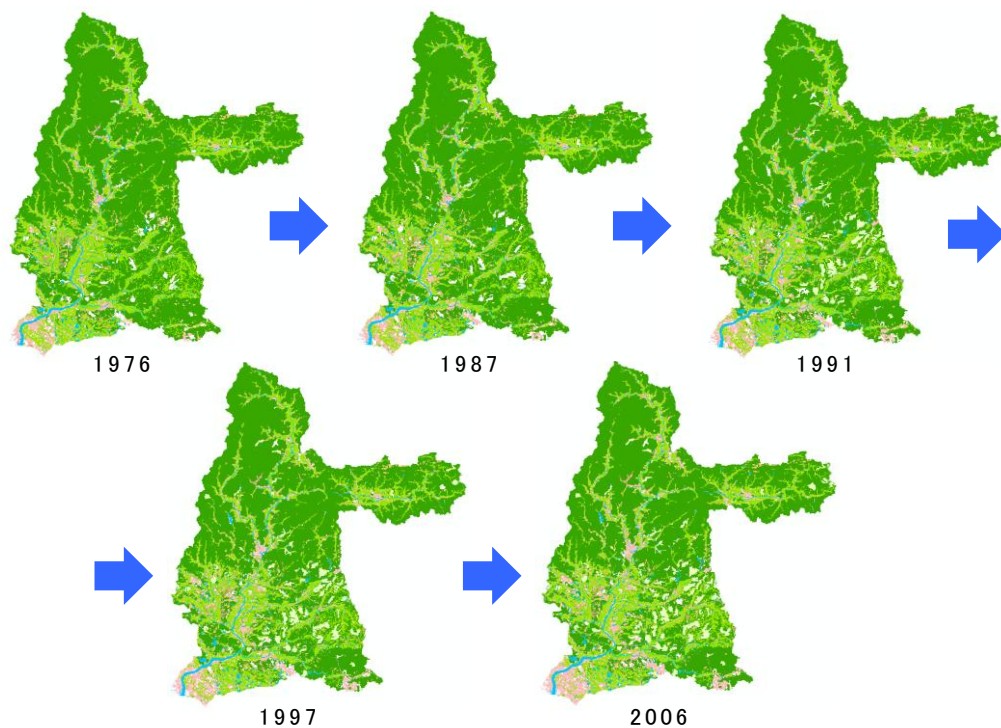
図(2)-8は、播磨灘流域圏における工業製品出荷額分布の長期変化を示す。播磨灘流域圏の産業の出荷額は播磨灘北側の播磨地域において多いことがわかる。兵庫県と四国側の出荷額を比較すると、播磨灘流域圏の出荷額の9割以上が兵庫県側に依存していることがわかった。兵庫県側の産業は、機械器具製造業29%、鉄鋼業20%、電子部品等・電気機械器具・情報通信機械具製造業16%が占めており（2008年）、機械産業が多いことが特徴である。出荷額分布の長期変化をみると、沿岸域だけでなく、河道に沿って中流や上流域においても出荷額が分布し、増加していることがわかる。出荷額がとくに大きく増加した産業は、機械器具製造業と鉄鋼業であり、それぞれ約1兆円の増加がみられた。一方、減少している産業は、繊維工業やなめし革・同製品・毛皮製造業であった。



図(2)-8 播磨灘流域圏における工業製品出荷額分布の長期変化（ただし、匿名を除く。）

4) 加古川流域における変化

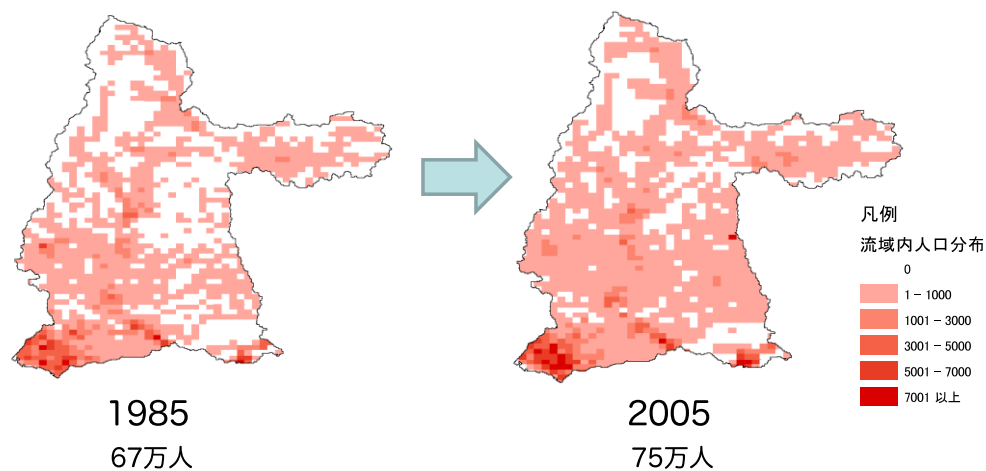
加古川は、播磨灘流域圏において最も流域面積が大きく、また、図(2)-6に示したように人口も多いことから、加古川流域の変化が播磨灘に与える影響が大きいことが推察される。そこで、加古川に着目して社会基盤データの整理を行った。加古川流域の土地利用の長期変化（1976～2006年）を調べた結果を図(2)-9に示す。その結果、30年間で森林と水田がそれぞれ、約92 km²、約33 km²減少し、ゴルフ場、建物用地および幹線交通用地がそれぞれ、約66 km²、約50 km²、約14 km²増加したことが明らかとなった。とくに、流域下流の東側地域において建物用地が大きく増加していることがわかった。



図(2)-9 加古川流域における土地利用の長期変化（1976～2006年）
 （濃緑：森林、薄緑：水田、桃色：建物用地、薄黄色：ゴルフ場）

加古川流域における人口の長期変化(1985～2005年)を図(2)-10に示す。その結果、1985年に約67万人であった人口が20年間の2005年には75万人に増加していることが明らかとなった。増加している場所をみると、最下流部では人口密度が上昇しており、中流域東側の小野市、三木市周辺では人口分布域が拡大している。この地域には、加古川上流流域下水道が1990年に供用を開始しており、人口増加に対応して排水処理が行われている。また、上流域でも主に河道に沿って人口が増加していることが明らかとなった。

以上のように、70年代、80年代と比較して、2005年までは人口は増加し、それに伴う土地利用の変化が示された。



図(2)-10 加古川流域における人口の長期変化（1985～2005年）

（２）明石川流域における検討

明石川は、流域面積が128.4 km²と播磨灘流域圏の中で大きくはないが、図(2)-6、7に示したように、人口の割合は高く、変化も大きいことから、明石川に着目して詳細な解析を行った。

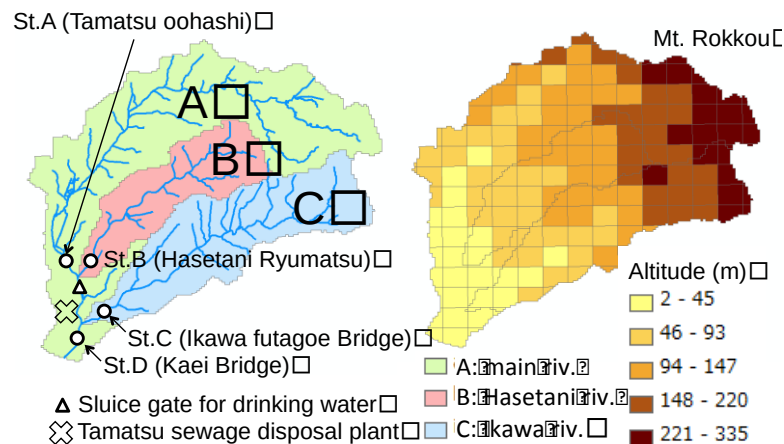
１）基礎データ

a 調査対象河川の概要⁹⁾

明石川は大阪湾と播磨灘の境界に位置する明石海峡の北側に位置しており、流域面積約128.4 km²、本川の法定河川延長約21.0 kmの二級河川である（図(2)-11(a)）。明石川の上流域は東側に位置し、海拔500～900 mの六甲山地の西端部にあたる（図(2)-11(b)）。中流域には広大な平坦面を頂部にもつ明美台地が広がっており、下流域の明石川本川沿いでは沖積平野である明石平野が広がり、播磨灘に流入する。流域の代表的な支川は櫛谷川と伊川である（表(2)-1）。下流域で、櫛谷川が本川に合流し、その後、伊川が合流する。流域における平均降水量は約1,000 mmであり、小雨である瀬戸内気候に属する。

b 地理情報データの概要

ArcGIS（ESRI社製、Ver. 9.2）を利用し、国勢調査の人口基準メッシュデータを明石川の集水域（流域）で切り出し、流域の人口分布図を作成し、流域内人口を算出した。人口メッシュデータには1985、1990、1995、2000、2005年の計5回分を使用した。なお、神戸市西区の国勢調査の人口とGISにより算出した人口の誤差は約4%であり、適用できると判断した。また、土地利用面積や河道網、流域界、標高データには国土数値情報を用いた。土地利用データには、1976、1987、1991、1997、2006年の計5回分を使用した。



(a) 支川と観測場所

(b) 1 kmメッシュ標高

図(2)-11 明石川流域の地図

表-1 明石川流域の諸量⁹⁾

river	basin area km ²	legal river length km	observation site ^{a)}
Akashi river	128.4	21.0	Kaei bridge
A: main river	67.4	21.0	Tamatsu oohashi
B: Hasetani river (branch)	24	8.9	Hasetani Ryuumatsu
C: Ikawa river (branch)	37	12.3	Ikawa futagoe bridge

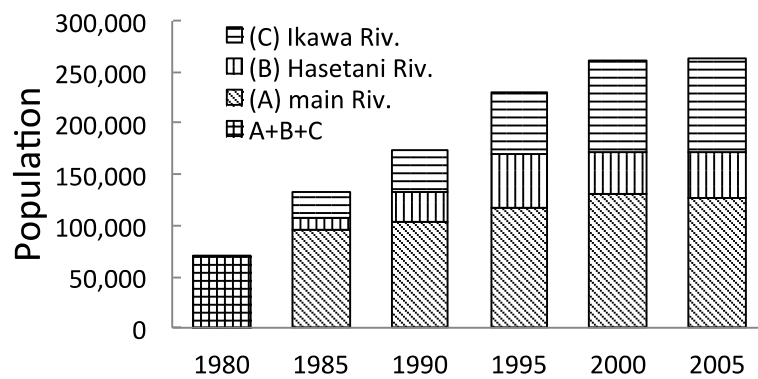
a) public water observation

c 水質・水量データの概要

長期的な河川水質・流量には、年4～12回測定されている公共用水域データを使用した¹⁰⁾。下水道放流水の水質・水量データには、年4～24回測定されている結果を用いた¹¹⁾。また、明石市による上水取水量には月総量データを用いた¹²⁾。さらに、現状の水質状況をより詳細に明らかにするため、明石川下流に位置する嘉永橋（St. D、河口から1.4 km上流⁹⁾）において、2011年11月以降、月一回採水を行い、CODの分析を行った。

d 下水処理場の概要

明石川の河口部は明石市に位置しており、それ以外の約8割の地域は神戸市西区にある。そのため、神戸市側で発生した下水の処理は、明石市との市境にある神戸市の玉津処理場で行われており（図(2)-11(a)の×印）、玉津処理場で処理された水は明石川へ放流されている。供用は1981年8月から開始されており、処理能力は150,000 m³/day、計画処理人口は233,500人、計画処理面積は47.05 km²である¹³⁾。2010年現在、41.252 km²（約88%）まで整備されている¹⁴⁾。計画処理面積のうち、流域外の岩岡地区（1.650 km²）からポンプ排水により玉津処理場に流入しているが¹⁴⁾、岩岡地区は面積比で明石川流域全体の約2%と小さい。明石川は、全流域面積に対して下水道整備エリアが35%（2009年現在）と広い特徴がある。

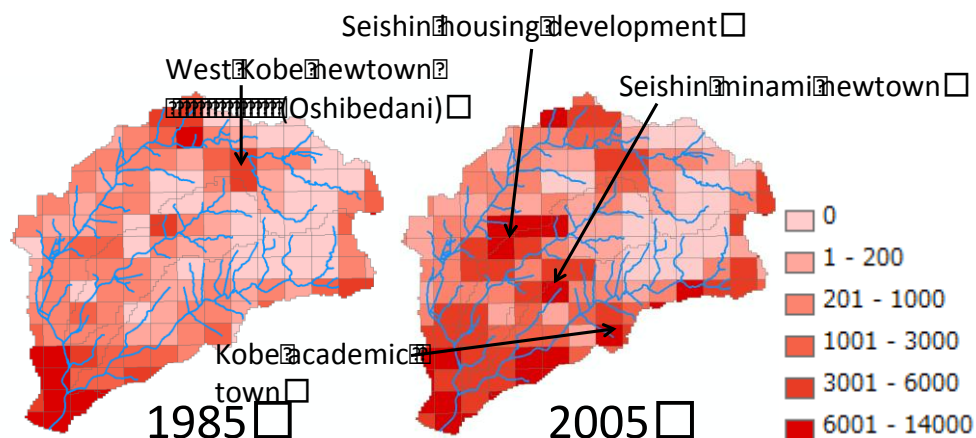


図(2)-12 明石川流域および各支川における流域内人口の長期変化
(1980年の人口は、神戸市西区の国勢調査の人口にGISで算出した流域内面積と流域外面積の割合(8:2)を考慮した。)

2) データ解析

a GISを用いた人口の長期変化

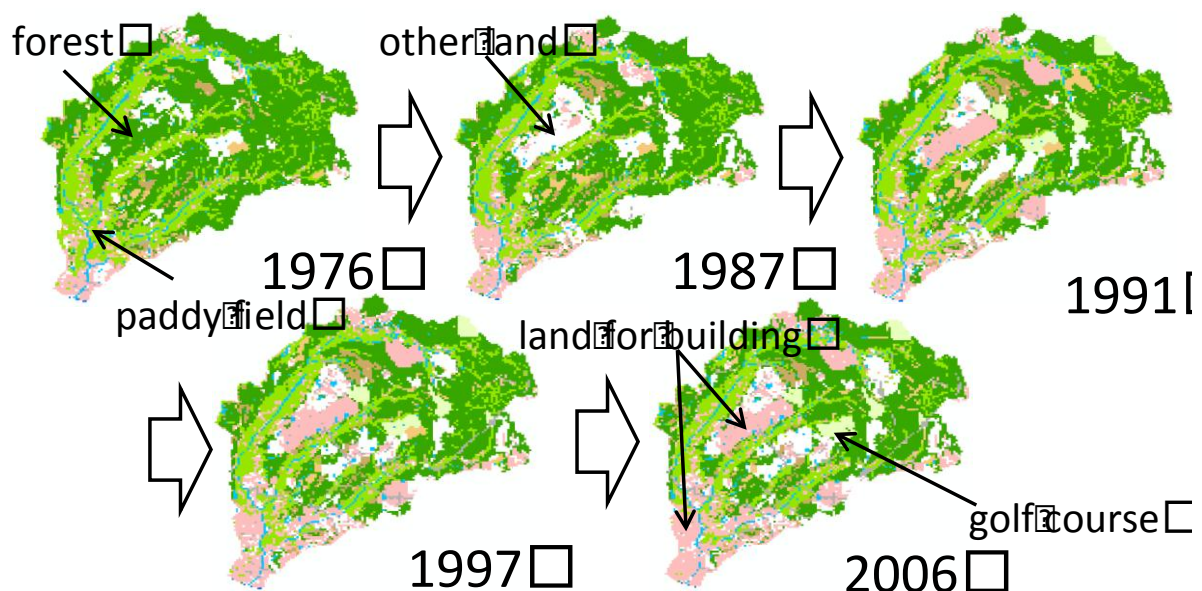
GISにより求めた明石川流域内人口の20年間(1985年～2005年)の変化を図(2)-12に示す。明石川流域の人口増加は著しく、1985年に約13万人であったのに対して、2005年には約27万人となり、20年間で約14万人が増加し、倍増している。図(2)-13、14に示すように、明石川本川上流域では1971年から西神戸ニュータウン(押部谷)で入居が開始し、中流域では1971年から西神住宅団地(街開きは1982年)や1980年から西神南ニュータウン(街開きは1993年)などの大規模な都市開発が進められた⁹⁾。このように、本川上流において70年代前半から人口が多い点特徴的である。また、伊川では、1985年時点で、下流域に人口が多いことが分かる。本川と伊川においては2000年まで人口が増加しており、櫛谷川では1995年以降、人口増加はみられない。これらのニュータウンは各支川流域の境界に位置しており、図(2)-11(b)より、丘陵地の開発によることも確認できる。



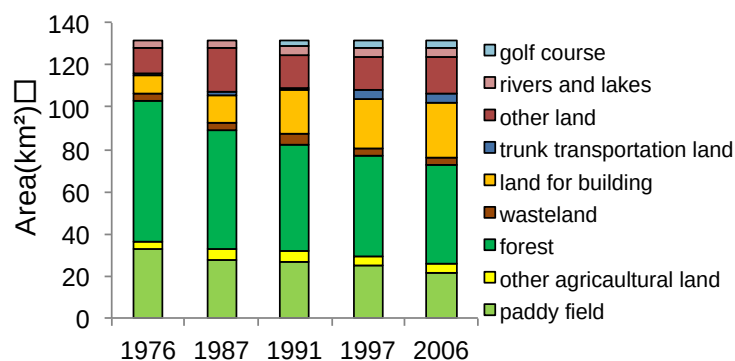
図(2)-13 1985年と2005年の流域内人口分布

b GISを用いた土地利用の長期変化

図(2)-14、15より、1976年以降に中流域を中心として森林が建物用地やその他の土地、ゴルフ場開発されていることが分かる。また、海沿いの明石市の市街地が本川下流域に広範に広がっており、水田面積が減少している。図(2)-13から、人口増加が確認できる。図(2)-15をみると、1976年に67 km²を占めていた森林が2006年には47 km²に大きく減少し、また、1976年に33 km²を占めていた水田が2005年には21 km²に減少する結果が得られた。逆に、建物用地は8 km²から26 km²に増加し、その他の土地や幹線交用地、ゴルフ場がそれぞれ、5、4、4 km²増加する結果が得られた。また、GISの解析により、森林は建物用地に6.7 km²、その他の土地に9.9 km²変化し、水田は建物用地に5.5 km²変化したことが分かった。一部、建物用地がその他の土地になっている場所もあるが、建物用地面積 A (km²)、人口 P (人)の間に相関関係がみられたことから ($P = 9500A$ 、 $R^2 = 0.92$)、解析結果は妥当であると判断した。



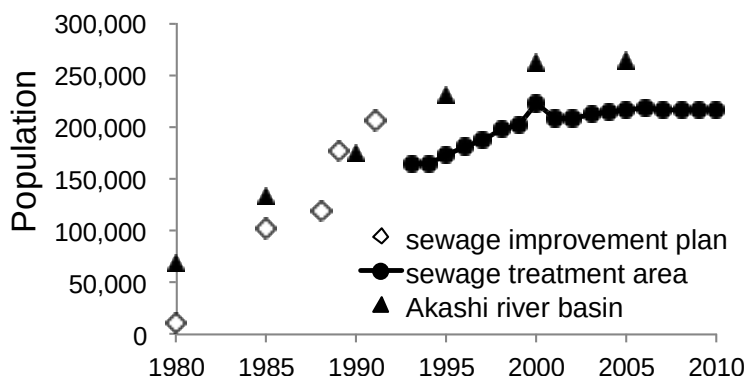
図(2)-14 明石川流域における土地利用分布の長期変化



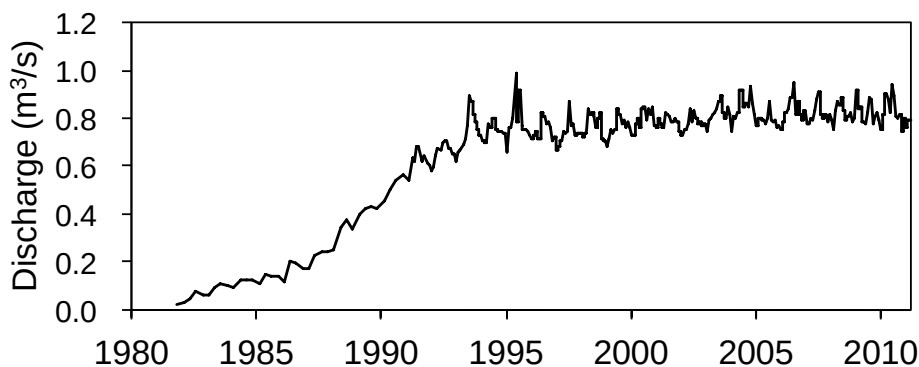
図(2)-15 明石川流域における土地利用面積の長期変化

c 下水処理場の処理実績

図(2)-16より、1981年に供用が開始して以降、流域人口の増加と平行して計画的に整備が進められたことが処理人口の推移から確認できる。2000年までは、一年間で約7千～1万人の割合で処理人口が増加しており、その後は計画処理人数に近づき（2010年度現在217,163人）、流域内人口増加の鈍化と対応することがわかる。また、図(2)-17より、処理水量についても同様の長期的変化がみられる。なお、伊川中流域左岸の学園都市駅周辺は神戸市垂水処理場へ接続しており、玉津処理場への流入は無い¹⁵⁾。



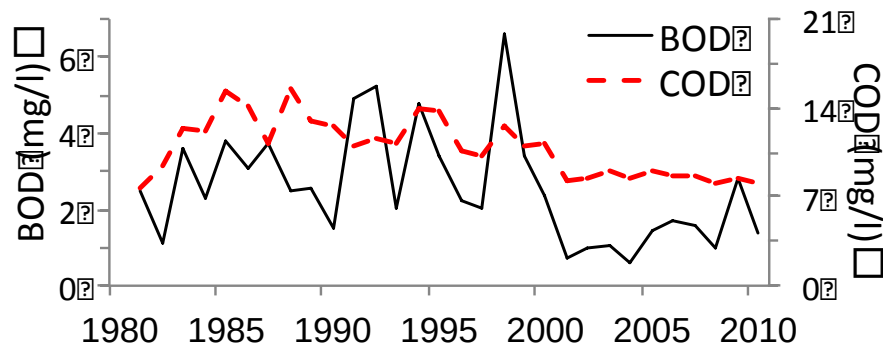
図(2)-16 玉津処理場における下水処理人口の推移
(明石川流域人口には図(2)-12と同じデータを用いた。)



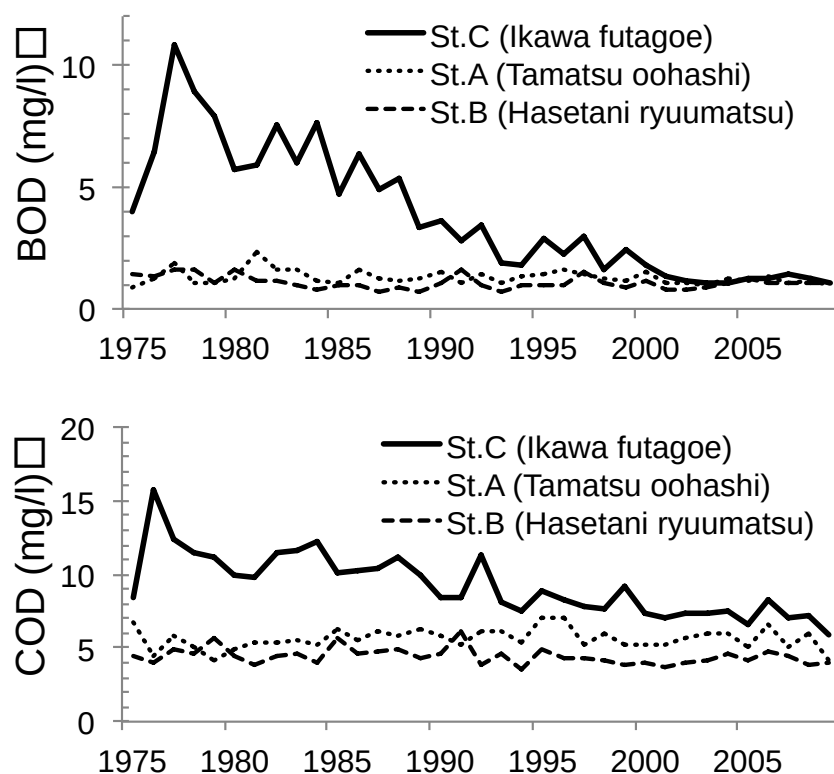
図(2)-17 玉津処理場における下水処理水量の推移

d 下水処理水の水質の長期変化

図(2)-18より、BODおよびCODといった有機汚濁は処理水量が増加している1995年頃までの期間では、横ばいもしくは若干の増加の傾向がみられ、1990年後半から緩やかに減少している。一方、CODは緩やかな減少傾向にあるが2010年においても約8 mg/lあり、高い濃度を示している。処理場の供用開始当初は標準活性汚泥法と砂ろ過を用いていたが、1996～1999年に凝集剤併用型循環式硝化脱窒法が追加された。同法は窒素・リンの除去に対する効果が高いが、有機物の除去率も高くなる³⁾。このことより、BODもCODも緩やかながら濃度が低下していると考えられる。



図(2)-18 玉津処理場における下水処理放流水の水質の長期変化
(年4～24回の分析データの年平均値)



図(2)-19 明石川の本川・支川のBOD・COD濃度の長期変化

3) 考察

a 明石川の水質の長期変化

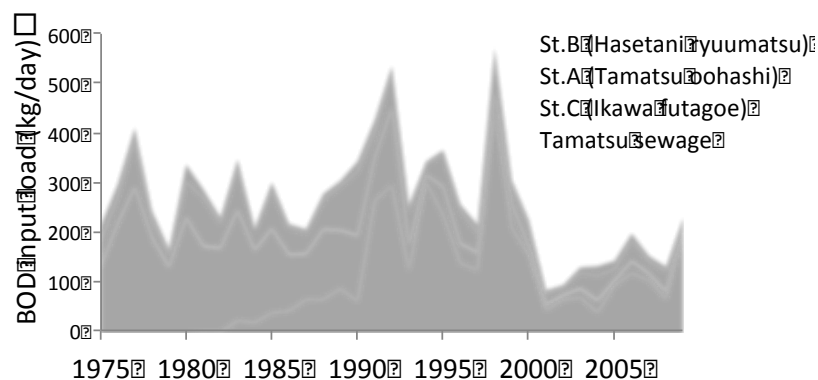
図(2)-19より、本川(St.A:玉津大橋地点)では、下水道が整備される1981年以前から2009年まで、BOD・COD濃度は変化しておらず、ほぼ一定であることがわかる。本川上流域の押部谷地区では、1971年から宅地開発が進められていたが、コミュニティープラントによって水処理されていたため¹⁶⁾、生活系負荷による有機汚濁が抑制されていたと考えられる。この後、同地域は玉津処理場に接続される。櫛谷川(St.B:櫛谷流末地点)では、西神南ニュータウンが街開きをした

1993年以降に、人口が大幅に増加しているが（図(2)-12）、すでに下水道が整備されており、COD濃度はほぼ変化していない。図(2)-12より、人口が継続的に増加している伊川では、1985年時点において人口が多い下流域（図(2)-13）の水質は悪かった¹⁶⁾。しかし、下水道の整備に伴い濃度は大きく減少し、本川と樋谷川の水質はほぼ同じ値となった。環境基準の対象となっているBODは最下流部の嘉永橋（St.D、C類型：5 mg/l）において、1991年時点で、環境基準未達成であるが¹⁷⁾、2000年以降は平均で1～2 mg/lであり、環境基準を達成している。以上のように、大幅な人口増加にも関わらず、河川水質が悪化していない結果は、土地開発に合わせて実施した下水道整備の効果といえる。

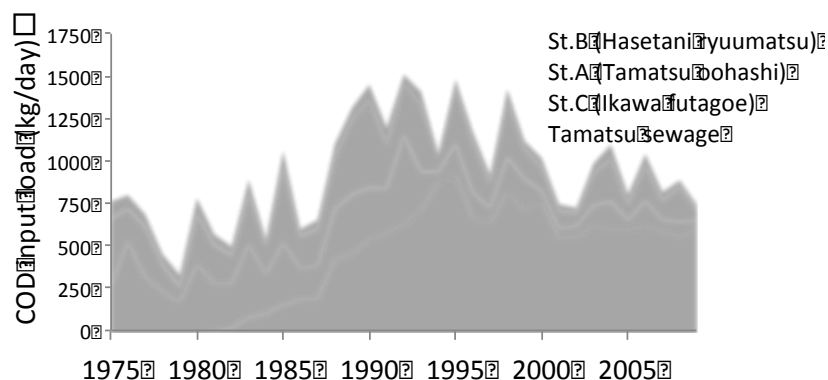
ここで、河川の環境基準であるBODは基準を達成しているものの、河川水・下水放流水のCOD濃度は依然高く、BODだけでは判断できない河川環境の側面があることも知っておく必要がある。海域の有機汚濁はCODで評価するため、河川におけるCOD濃度の長期変化も重要である。

b 明石川から播磨灘への流入負荷量の算定（平水時）

明石川から播磨灘へ流出する負荷源は、本川、樋谷川、伊川、および玉津処理場放流水による。年4～24回の水質 C と流量 Q をそれぞれ年平均して、 $C \cdot Q$ 法により平水時の負荷量を算定した。結果を図(2)-20に示す。なお、本川の玉津大橋と樋谷川が合流した後から伊川合流地点までの間に明石市の上水取水が右岸側で行われており（図(2)-11(a)の△印）、取水による負荷量の減少割合は4カ所の負荷源からの総負荷に対して約14～17%であった。



(a) BOD負荷量



(b) COD負荷量

図(2)-20 河川を通じた播磨灘へのBOD・COD流入負荷量の長期変化

明石川流域から播磨灘への流入負荷の内訳をみると、BOD・CODともに、下水道整備が始まる1980年以前では、河川からの負荷量が多く、下水道整備に伴い河川の影響が徐々に小さくなっている。2007-09年時点で、総負荷量に対する玉津処理場の割合はBOD負荷量とCOD負荷量ともに約7割を占めることが明らかとなった。つまり、流域人口の約8割が下水道整備区域内に含まれる明石川では（図(2)-16）、下水処理場から排出される流入負荷の影響が非常に大きい。逆に、3つの河川だけから海へ流入する負荷量は大きく減少しており、BOD負荷量は1975-77年に対して2007-09年は約84%減少し、COD負荷量は約69%減少する結果が得られた。この結果は、下水道整備による上中流域での負荷抑制を示しており、さらに陸域負荷経路のバイパス効果も示している。

BODについてみると、1980年以前では、負荷量は約310 kg/dayと多く、また、そのうち伊川からの負荷が約7割と多い。図(2)-13に示したように、伊川下流域は人口が多く、ここからの影響が大きいと考えられる。櫛谷川流域では、1970年代にニュータウン開発は始まっておらず、1980年代の人口増加に合わせて下水道整備が行われており、2000年後半でも総負荷に対する影響は約1割と小さい。4つの負荷源をあわせた全体的な傾向として、明石川流域内の人口増加に伴う下水処理水の増加によって、1990年代に総負荷量が約2割増加するが、2000年に入ると下水処理場からの負荷量が大きく減少している。減少した理由としては、図(2)-18に示したように、1990年後半の高度処理導入に伴う下水処理水のBOD濃度の低下による可能性が考えられる。結果的に、下水道整備開始当初の1975-77年のBOD負荷量は約310 kg/dayから2007-09年の約180 kg/dayへと約40%減少したことが明らかとなった。

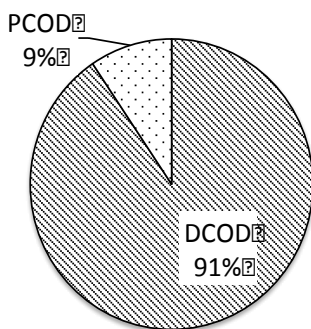
一方、CODについては、下水道整備前では伊川の割合が約5割、本川が4割であり、BODと比較して、本川の影響が大きい結果が得られた。下水道整備後では、1990年代に総負荷量は1975-77年よりも約7割増加しており、BODよりも増加率が高い。この原因は、BODほどに河川からの負荷が減少していないことが考えられる。結果的に、1975-77年の約770 kg/dayから2007-09年の約830 kg/dayへと約6%増加する結果が得られ、下水道を含めるとCOD負荷量は減っていないことが明らかとなった。原因として、図(2)-18に示したような2000年代以降の下水処理水のBODにみられた濃度減少がCODではみられていないことが考えられる。

いずれにしても、人口が大きく増加している状況を考えると、下水道整備による負荷削減の効果が示された。なお、明石川は下水処理水が河川に流入しているため、河川を通じた海への有機汚濁負荷の特徴は他の河川と異なることが考えられる。

c 明石川から播磨灘に流入するCODの形態別特徴

COD負荷量が低下していない理由を考察するために、玉津処理場より下流に位置する嘉永橋（St. D）におけるCODの形態別特徴を調べた。なお、図(2)-20より、玉津処理場からの負荷量は7割占めていることから、嘉永橋の水質は下水放流水の水質を反映していると考えた。

図(2)-21より、水質分析の結果、溶存態のCOD（D-COD）が約9割を占めていることが明らかとなった。図(2)-18より、下水放流水のBOD濃度はCODと比較して低く、図には示していないがSSも1 mg/l程度と低い¹¹⁾。つまり、懸濁物質や易分解性有機物の量を表すBODは下水処理場で除去されているが、難分解性の溶存有機物は除去されにくいために、下水処理水のCOD濃度は約8 mg/lと高く、総流入負荷の多くを占める下水道からの負荷量が河川と比較して多いことが推察される。仮に、D-CODの中に難分解性成分が河川水よりも多く含まれるのであれば、海域の難分解性有機物としてのCODの供給源として寄与があることが推察される。



図(2)-21 嘉永橋 (St. D) における河川水の形態別CODの割合
(2011年11月～2012年8月の平均値 (n=10)、PCOD = COD - DCOD)

表(2)-2 各河川における長期的な増減比率

	main river St.A	Hasetani river St.B	Ikawa river St.C
BOD	-0.006	-0.006	-0.032
COD	0.001	-0.004	-0.014
Dishcharge	-0.015	-0.009	-0.020
BOD input load	-0.018	-0.012	-0.032
COD input load	-0.013	-0.011	-0.024

d 河川からの流入負荷量の長期変化(平水時)

図(2)-20より、明石川流域では、播磨灘に流入する負荷のうち、下水処理水の影響が大きいことが明らかとなったが、河川からの負荷も下水処理量がピークとなった1990年前半から約3割あり、2000年後半においてもその割合は変化していないことが分かった。ただし、前述のように、負荷量はいずれの河川においても減少傾向がみられる。そこで、公共用水域データを用いて、3つの流域(本川、櫛谷川、伊川)毎に濃度、流量、負荷量の長期トレンドを比較した。具体的には、1975-1978年の平均値に対する各年の比率を計算し、西暦年に対する上記比率を線形近似して、その直線の傾き a を計算した。結果を表(2)-2に示す。

BODおよびCODのそれぞれの負荷量に対する a の値はいずれの河川でも負値を取り、減少傾向にあることが分かる。また、図(2)-19から、河川水の濃度は、伊川がBOD・CODともに大きく減少しており、負値の傾きが大きい($a = -0.032$ 、 -0.014)、本川と櫛谷川のBOD濃度の減少の程度は緩やかであり($a = -0.006$ 、 -0.006)、COD濃度の減少の程度はさらに小さい($a = 0.001$ 、 -0.004)。つぎに、流量の増減比率をみると、三つの流域ともに $-0.009 \sim -0.020$ であり、流量が大きく減少していることが分かる。このことから、負荷量の長期的減少の原因は流量の減少による影響をより強く(とくに、COD)受けている結果が得られた。なお、明石市におけるアメダス降水量の長期トレンド(1976-2011年)をみると、近年、変動が大きいものの緩やかな増加傾向にあり、河川流量が減少する傾向とは逆であった。ここで用いた河川流量は平水時の値であるが、近年の時間集中的な降雨の増加や都市化に伴う不浸透面積の増加により、総降水量が増えたとしても、雨天時の流量が増加し、また、地下浸透水量の減少による河川への基底流出量の減少により、平水時の

河川流量が減少する傾向にある¹⁸⁾。

e 下水処理水が海域環境に与える影響への考え方

神戸市では播磨灘海域の下水道流総計画を2015年に改正する準備を進めており¹⁹⁾、今後の人口減少下における下水道整備のあり方を踏まえて、海域への負荷供給という視点での検討が必要と考えられる。人口が減れば生活系負荷は減る。下水処理技術が向上すればなおさらである。明石川流域では、有機物負荷のうち、下水道からの負荷が7割を占めるという結果が得られたが、下水道による海域への影響がより大きくなると推察される。つまり、例えば、下水水質処理を制御することで流入負荷量を人為的に調整することができ、海域環境を制御することにつながる可能性もある。下水道が河川環境の改善に果たした役割は明らかであるが、今後は海域環境との河川環境のバランスを考えることが必要である。

4) 明石川における成果のまとめ

本節では、都市化が顕著に進んだ中規模河川の明石川を対象として、人口と土地利用の時空間変化に着目し、流域から海域へのBOD・COD負荷量の長期変化および下水道整備と河川水質の長期変化の特徴を明らかにし、下水道整備が海域環境に与える影響について考察した。以下に、主な結果を示す。

- a) 1970年後半と2000年後半を比較すると、3つの河川（本川、櫛谷川、伊川）だけから海へ流入するBOD負荷量は約84%、COD負荷量は約69%減少する結果が得られた。
- b) 下水処理水を含めた明石川流域から海域へのBOD負荷量は約40%減少したが、COD負荷量は減少していない（約6%増加）結果が得られた。これは、下水処理水が河川に流入する明石川の特徴と考えられる。
- c) 1970年代から2000年代にかけて人口が約3倍増加したことを考えると、人口増加に合わせて下水道整備を進めることで、河川の有機汚染が抑制され、下水道による負荷の抑制効果は非常に大きいことが分かった。
- d) 2009年時点で、BOD・COD負荷量は、ともに下水道から7割、河川から3割であることが分かった。
- e) 平水時の河川からのBOD・COD負荷量の減少の理由は、河川流量の減少による影響を受けていることが推察される。
- f) 陸域からの負荷流入という視点で海域のCOD濃度に与える影響を考えると、i) 下水道によるCOD削減がBODと比較して進んでいない点、ii) 河川水質のCOD濃度が低下していない点、iii) CODの形態として溶存態（D-COD）が多い点が考えられた。

（3） 播磨灘流域圏における発生負荷量の算定

1) 使用データ

生活系・産業系・土地系のCOD・TN・TP負荷量の合計を総負荷量として、長期変化を算定した。負荷量算定に使用したデータの年度にはずれがあるため、表(2)-3に示すようにそれぞれ近い年度のデータを統合して、総負荷量とした。具体的には、1976～1985年、1990～1991年、1995～1999年、2005～2008年の計4区間とした。

表(2)-3 総負荷量の統合年度

	1	2	3	4
Houshold	1985	1990	1995	2005
Industry	1979	1990	1999	2008
Others	1976	1991	1997	2006

2) 算定方法

a 生活系

国勢調査統計メッシュデータ(1kmメッシュ)を用いて、人口総数から生活系負荷量を算出した。はじめに人口分布を作成し、さらに、下水道整備計画図⁷⁾より、下水道整備範囲を作成し(図(2)-22)、人口分布と合わせ、下水道内人口(下水道処理人口)を算出する(兵庫県のみ)。これらの人口データと1人1日当たりの汚濁負荷量の参考値(g/人/day)と各生活排水処理施設の除去率を乗じて、生活系負荷量の算出を行った。

i 下水道整備率の補正

人口に原単位を乗じただけでは、負荷量の過大評価となるため、下水道による負荷の減少を考慮した。ただし、下水道範囲に使用した下水道整備計画図⁷⁾は、平成23年度の整備計画図であるため過去とは整備範囲が異なる。しかし、過去の下水道範囲データを入手することができなかったため、平成23年度の下水道整備範囲は固定して補正を行った。本研究では、下水道整備範囲と下水道整備率に関連があるとして、下水道整備範囲に各年度別に普及率を考慮した比率を算出し、整備範囲内の除去率の補正を行った。具体的には、最新年度(2005年)の比率を100としたとき、各年度の普及率との比を求めた。

ii 除去率

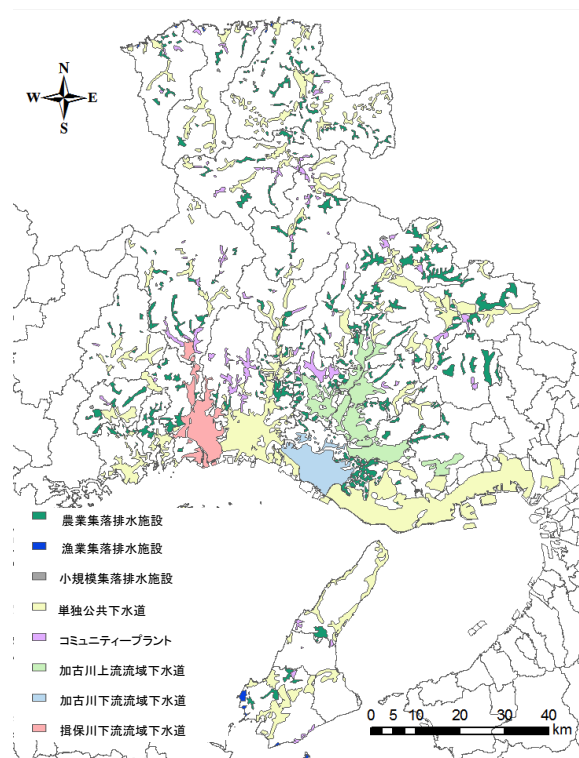
除去率については、各下水道の除去方法を調べ、各種排水処理技術の平均的な除去率と普及率³⁾を参考に設定した。流域下水道の除去率については兵庫県HP²¹⁾を参考にした。コミュニティプラント、漁業集落排水施設、小規模集落排水施設、農業集落排水施設については、各種処理場の放流水質と除去率調査結果例²²⁾をもとに設定した。単独公共下水道は、処理方法が不明なため、各種処理方法の除去率の平均値を用いて設定した。

iii 浄化槽人口と未整備人口の算出

下水道範囲外からの生活系負荷量は浄化槽(合併・単独)と未整備に分けられ、これらは兵庫県の県内各地域の生活排水処理率と兵庫県統計年表(2008)²³⁾より、各地域の浄化槽人口および未整備人口を算出し、その比を下水道範囲外の人口に乗じて浄化槽人口および未整備人口を算出した。これにより、播磨灘流域圏で下水道範囲以外の53%が浄化槽利用者、47%が未整備であることが分かった。

iv 生活系原単位

1人1日当たりの汚濁負荷量の参考値(原単位g/人・day)は日本下水道協会²⁴⁾の値を参考にした。浄化槽および未整備からの汚濁負荷量の除去率は環境省²⁵⁾の値を参照した。なお、浄化槽の平均原単位は環境省²⁵⁾が示した合併浄化槽と単独浄化槽の原単位から平均値を算出した。また、未整備の原単位は環境省²⁵⁾より、兵庫県の数値を参照した。



図(2)-22 GISにより作成した兵庫県的生活排水処理範囲

b 産業系

工業統計年表から排水量原単位（ $\text{m}^3/\text{day}/\text{百万円}$ ）と環境省調査により得られた業種別平均水質濃度（ mg/l ）を乗じて算出された原単位（ $\text{g}/\text{day}/\text{百万円}$ ）を産業系負荷量原単位と設定し、工業統計メッシュデータ（出荷額：万円）と乗じて産業系負荷量を算出した。しかし、匿名に関する出荷額が大きく、また、原単位法では、環境省が示した発生負荷量²⁰⁾と比べて過小評価であった。そこで、環境省が算定した産業系負荷量に合致するように補正値を算出し、再現補正を行った。

i 原単位の設定

業種別原単位は、372種類と非常に多くに分類されており（小分類）、これらのデータを工業統計メッシュデータと分類を統合させるために、工業統計メッシュデータの分類（中分類）に再分類を行った。また、分類する際に、関連する項目の原単位は各平均を用いることとした。具体的には、食品製造業に関連する項目を1つに、飲料・タバコ・餌料製造業に関する項目を1つに、繊維に関する工業を1つになど、21種に再分類を行った。また、匿名業種の原単位は、全業種の原単位の平均値を用いることとした。

ii 下水道整備率の補正

生活系と同様の方法で、下水道による排水除去による負荷の減少を考慮した。

iii 下水処理における除去率

産業系負荷量は、各流域下水道および単独公共下水道に接続され除去されるものとして、生活系と同様に設定した除去率を用いて算出した。

iv 補正係数

上記の手順により負荷量を算出した結果、本研究での手法では環境省の算出している発生負荷量²⁰⁾と比べて過小評価であり、産業系負荷量を十分評価できなかったため、環境省が算定した産業系負荷量に合致するように補正値を算出し、再現補正を行った。産業系負荷量を算出する際には、匿名による出荷額が多く、また、平均的な原単位を用いることには限界があり、推定方法の検討が今後必要である。

c その他系（土地系）

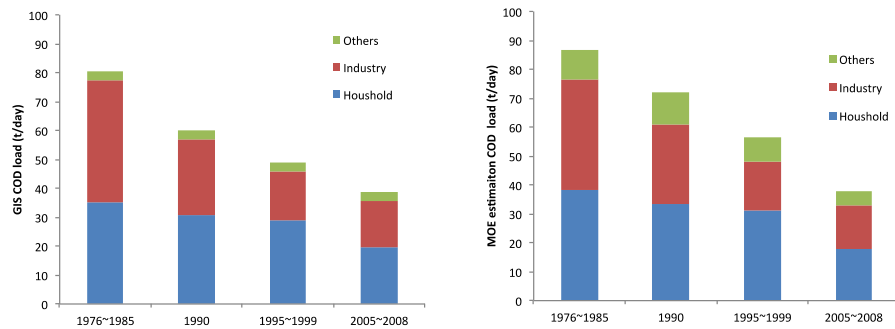
環境省⁸⁾が示した原単位を用いて、播磨灘流域圏の土地系（ノンポイントソース）からの負荷量を算出した。国土数値情報ダウンロードデータサービスより入手した土地利用細分メッシュ（100 mメッシュ）は、土地利用の分類が各年度によって異なるため、分類を2006年の分類数に合わせて計11種類に再分類した。

3) 推定結果の検証

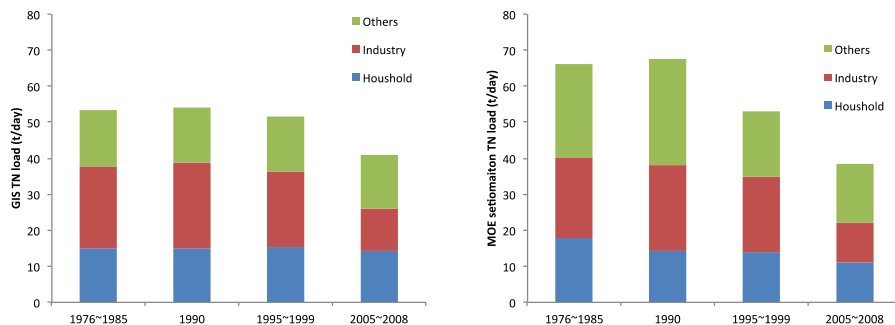
以上の方法により、各発生負荷量の長期変化を推定した。その結果を、環境省が推定した発生負荷量²⁶⁾（統合年度の平均値を算出）と比較した（図(2)-23）。なお、本研究で算出したその他系負荷量は土地系のみであり、環境省の負荷量データのその他系には、畜産系・養殖系も含まれる。そのため、その他系については、いずれの項目についても大きな差異がある。

算出した負荷量の総量と環境省の負荷量を比較すると、COD・TN・TPの総負荷量の傾向を再現することができた。とくに、2005年～2008年区間での総負荷量は環境省のデータと比較してCOD負荷量が2%、TN負荷量が6%、TP負荷量が-2%の誤差であった。使用したデータの年度の違いや、環境省のデータの平均値を用いている点等、直接的な比較はできないが、本手法により発生負荷量を再現することができたと判断した。なお、古い年度になるほど誤差が大きくなったため、古い年度のデータについて今後見直しが必要である。

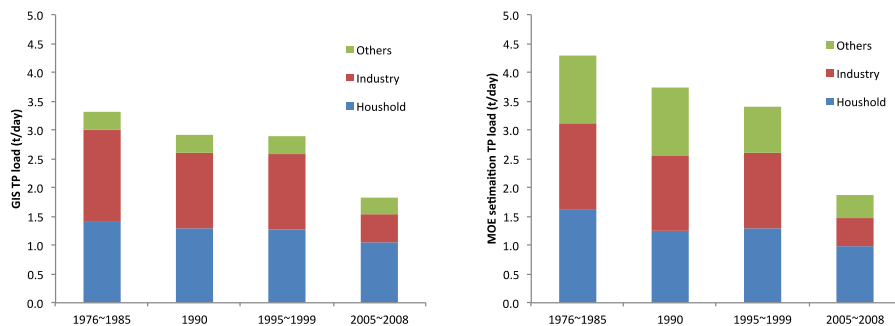
生活系発生負荷量の誤差は、CODは8～9%、TNは3～23%、TPは2～17%であった。生活系の負荷量は、下水道等の生活排水処理施設を考慮することで、環境省の推定値²⁶⁾に近い値を得ることができた。なお、産業系については、補正係数を乗じることで補正しており、原単位法による負荷量算定に対して、今後検討が必要である。



(a) COD発生負荷量



(b) TN発生負荷量



(c) TP発生負荷量

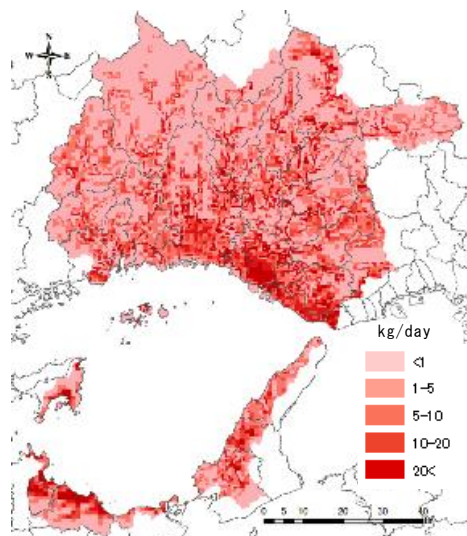
図(2)-23 発生負荷量の長期変化の比較 (左：本研究、右：環境省²⁶⁾)

(4) 播磨灘流域圏における発生負荷量の空間分布

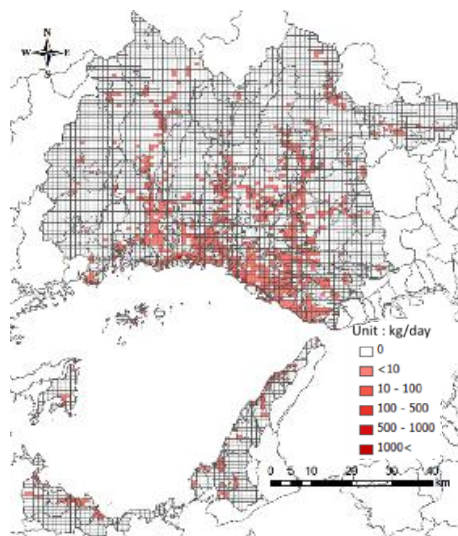
生活系、産業系、その他系（土地系のみ：ノンポイントソース）による2005～2008年におけるCOD・TN・TPの発生負荷量の空間分布図を図(2)-24～26に示す。

COD負荷量について、生活系負荷量は播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることがわかった。また、下水道を考慮しない場合と下水道を考慮した場合を比較すると（課題1の結果、図(1)-18）、負荷量分布に大きな違いが出ており、下水道整

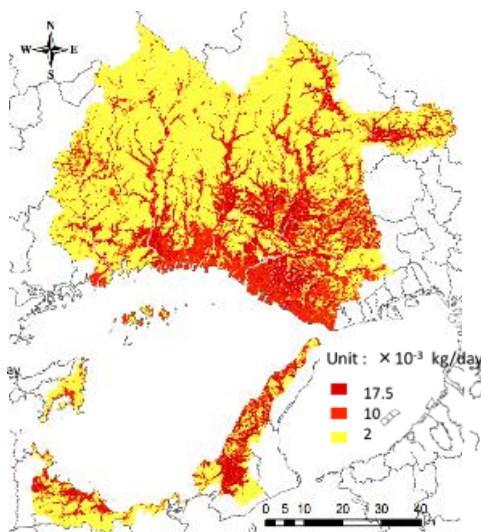
備により、集約的に負荷が大きく削減されている結果が示された。産業系負荷量も播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心として、臨海部および河道沿いに集中して分布していることが分かった。とくに集中している場所は、加古川下流および明石川下流の臨海部と、揖保川や市川、加古川流域の河道沿いである。産業系の特徴は、化学工業、パルプ・紙・繊維製品、鉄鋼業からの負荷量が多いという点である。土地系負荷量は、原単位の大きい水田（17.5 g/ha/day）や森林以外の土地利用（10 g/ha/day）において負荷量が高くなっており、森林の原単位が最も小さいことから（2.5 g/ha/day）、播磨域の東側で負荷量が多く、西側では低い分布となっている。



(a) 生活系（2005年）



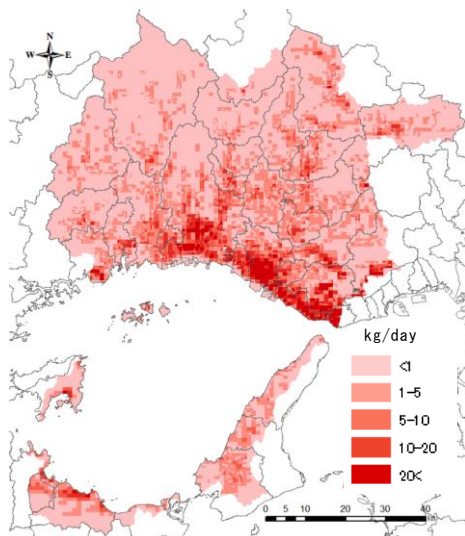
(b) 産業系（2008年）



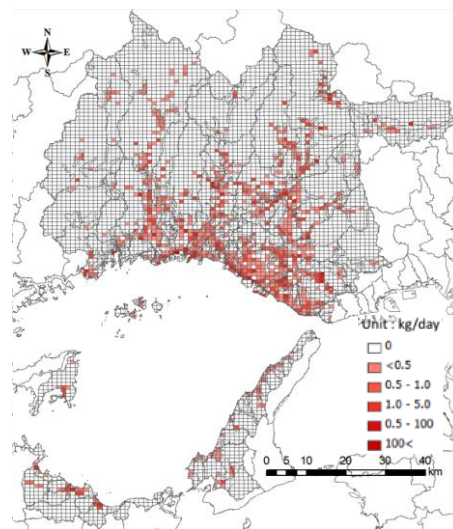
(c) その他系（土地系：ノンポイントソース）（2006年）

図(2)-24 COD発生負荷量の空間分布

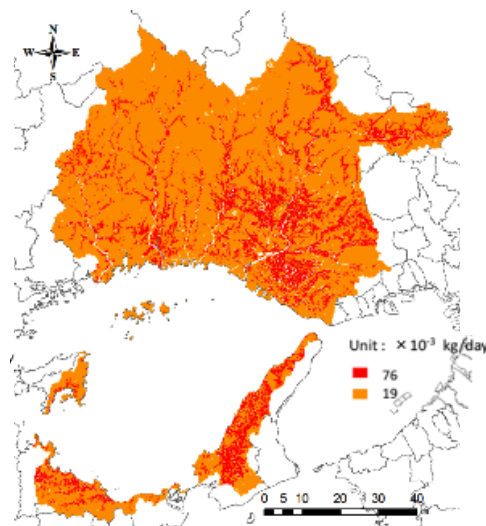
TN負荷量について、生活系負荷量はCODと同様に、播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることがわかった。産業系負荷量も、CODと同様に播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心として、臨海部および河道沿いに集中して分布していることがわかった。産業系の特徴は、鉄鋼業からの負荷量が高い点である。土地系負荷量の分布は、水田とその他農用地の原単位（それぞれ、76 g/ha/day）が、それ以外の土地利用の原単位（19 g/ha/day）と比較して大きいため、農地において高い値を示しており、加古川中下流域、河道に沿った場所、淡路島において高い値を示すことがわかった。



(a) 生活系（2005年）



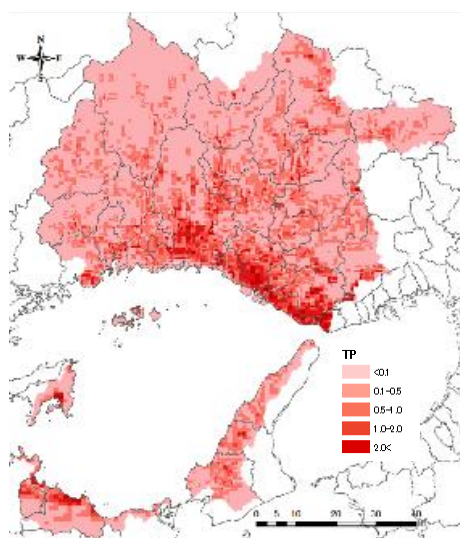
(b) 産業系（2008年）



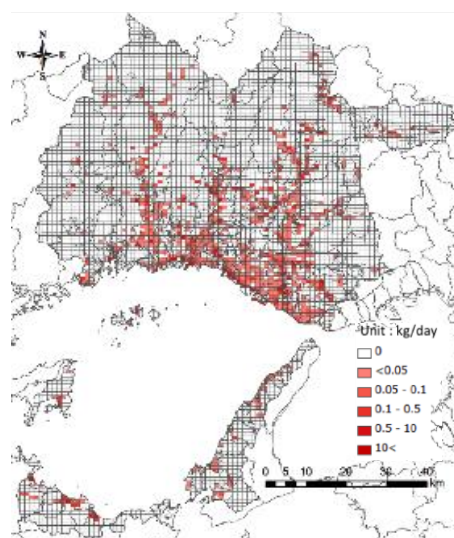
(c) その他系（土地系：ノンポイントソース）（2006年）

図(2)-25 TN発生負荷量の空間分布

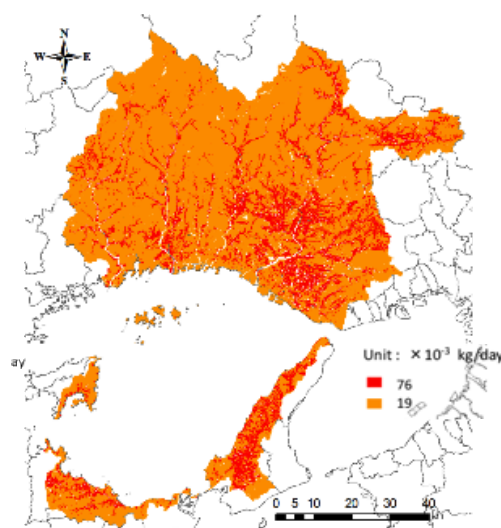
TP負荷量について、生活系負荷量はCOD・TNと同様に、播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることがわかった。産業系負荷量も、COD・TNと同様に播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心として、臨海部および河道沿いに集中して分布していることがわかった。産業系の特徴は、食料品からの負荷量が高い点である。土地系負荷量の分布は、水田とその他農用地の原単位（それぞれ、1 g/ha/day）が、それ以外の土地利用の原単位（0.5 g/ha/day）と比較して大きいいため、農地において高い値を示しており、加古川中下流域、河道に沿った場所、淡路島において高い値を示すことがわかった。また、水田とその他農用地の原単位が同一であることから、土地系のTN・TP負荷量の分布パターンは同じである。



(a) 生活系（2005年）



(b) 産業系（2008年）



(c) その他系（土地系：ノンポイントソース）（2006年）

図(2)-26 TP発生負荷量の空間分布

以上より、播磨灘流域圏における発生負荷量の特徴として、生活系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に生活系負荷量が多く集中していることがわかった。また、下水道整備により、人口増加に伴う生活系負荷量の増加が抑制され、下水道整備の進んだ沿岸域における負荷が減少していることがわかった。産業系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において、沿岸部および加古川下流および明石川下流の臨海部、揖保川や市川、加古川流域の河道沿いに集中して分布していることがわかった。分類をみると、沿岸部では、食品製造業や鉄鋼業、輸送機械工業が発達しており、揖保川流域では革工業、加古川流域では繊維工業がそれぞれ盛んであることがわかった。土地系負荷量は、CODは水田、TN・TPは水田とその他農用地において高い負荷量を示すことから、加古川中下流域、河道に沿った場所、淡路島において高い値を示すことがわかった。

（５）播磨灘流域圏における発生負荷量の特徴と長期変化

１）総負荷量（生活系・産業系・土地系）

図(2)-23より、1976～1985年区間から2005～2008年区間の約30年間で、播磨灘流域圏のCODの総発生負荷量は80t/dayから39t/dayへと42t/day減少した（削減率52％）。また、TNの総発生負荷量は、53t/dayから41t/dayへと12t/day減少し（削減率23％）、TPの総発生負荷量は、3.3t/dayから1.8t/dayへと1.5t/day減少した（削減率45％）。このように、人口や工業出荷額が80年代・90年代にかけて増加したが、発生負荷量（とくに生活系）は減少しており、下水道整備等生活排水処理施設の普及の効果が大きい結果が示された。

２）人口・生活系負荷量の特徴

図(2)-23より、播磨灘流域圏における生活系COD負荷量は、減少傾向にあり、1985年から2005年にかけて約45％減少した。これは、1985年で全体の67％あった未整備からの生活系COD負荷量が、2005年で全体の46％まで減少したためである。下水道からの負荷量は、1985年から2005年にかけて、下水道処理人口の増加に伴い増加傾向にあり、増加量は流域下水道で1,100kg/day（加古川下流域下水道816kg/day、加古川下流流域下水道169 kg/day、揖保川下流流域下水道115 kg/day）、単独公共下水道で1,560 kg/dayである。播磨灘流域圏における生活系TN負荷量は、増減を繰り返しながらも減少傾向にあり、1985年から2005年にかけて約5％減少した。播磨灘流域圏における生活系TP負荷量は、減少傾向にあり1985年から2005年で約25％減少した。生活系TN・TPについても、生活系COD負荷量と同様、未整備からの負荷量が大きく減少し、流域下水道および単独公共下水道から負荷量が増加していることがわかった。

３）出荷額・産業系負荷量の特徴

図(2)-23より、産業系負荷量は1977年から2008年にかけて、産業系COD負荷量は62％減少し、産業系TN負荷量は48％減少し、産業系TP負荷量は70％減少した。これらの負荷量の要因として、COD負荷量は、食品製造業および繊維工業からの負荷量、TN負荷量は鉄鋼業からの負荷量、TP負荷量は、金属製品製造業と印刷・同関連業および食料品製造業からの負荷量が減少しているためと推察された。

４）土地系負荷量（ノンポイント負荷量）の特徴

図(2)-23より、土地系COD負荷量はわずかに増加傾向、土地系TN負荷量は減少傾向、土地系TP負

荷量はわずかに減少していることがわかった。土地系COD負荷量が増加している原因は、原単位の最も小さい森林の減少による影響が大きい。とくに、流域面積の大きい加古川と宅地開発が急速に進んだ明石川から土地系COD負荷量が増加しているためであるとわかった。加古川は流域面積が大きいので、播磨灘流域圏全体の負荷量に与える影響が大きい。また、明石川の流域面積は小さいものの負荷量の増加率が高い。土地系TN・TP負荷量の減少に影響を与えている原因は水田とその他農用地の減少である。それらの面積が減少している場所は、加古川流域と播磨灘北部の沿岸域であった。加古川は、流域面積が大きく播磨灘流域圏に与える影響が大きいためであり、沿岸域では原単位の大きい水田の多くが原単位のより小さい建物用地や幹線交通用地へと変化したためである。土地系負荷量は、近年、生活系および産業系の負荷量が減少していることにより、総負荷量に与える影響が相対的に大きくなっており、どのような値の原単位を使うのか十分な検討が必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

播磨灘流域圏における発生負荷量の特徴として、生活系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において播磨灘北部沿岸（播磨域）を中心とする人口の集中している地域に多く集中していることが分かった。また、下水道整備により、人口増加に伴う生活系負荷量の増加が抑制され、下水道整備の進んだ沿岸域における負荷が減少していることがわかった。産業系負荷量は、COD・TN・TPのすべての項目において、沿岸部および加古川下流および明石川下流の臨海部、揖保川や市川、加古川流域の河道沿いに集中して分布していることがわかった。分類をみると、沿岸部では、食品製造業や鉄鋼業、輸送機械工業が発達しており、揖保川流域では革工業、加古川流域では繊維工業がそれぞれ盛んであることがわかった。土地系負荷量は、CODは水田、TN・TPは水田とその他農用地において高い負荷量を示すことから、加古川中下流域、河道に沿った場所、淡路島において高い値を示すことがわかった。

人口や工業出荷額が80年代・90年代にかけて増加したが、発生負荷量（とくに生活系）は減少しており、下水道整備等生活排水処理施設の普及の効果が大きい結果が示された。

土地系の負荷量について、CODはわずかに増加傾向、TNは減少傾向、TPはわずかに減少していることがわかった。土地系COD負荷量が増加している原因は、原単位の最も小さい森林の減少による影響が大きく、土地系TN・TP負荷量の減少に影響を与えている原因は原単位の最も大きい水田とその他農用地の減少である。土地系負荷量は、近年、生活系および産業系の負荷量が減少していることにより、総負荷量に与える影響が相対的に大きくなっており、どのような値の原単位を使うのか十分な検討が必要である。

また、明石川を対象とした詳細な検討の結果、以下のことが明らかとなった。a) 1970年後半と2000年後半を比較すると、3つ河川（本川、櫛谷川、伊川）におけるBOD負荷量は約84%、COD負荷量は約69%減少する結果が得られた。b) 下水処理水を含めた明石川流域から海域へのBOD負荷量は約40%減少したが、COD負荷量は減少していない（約6%増加）結果が得られた。c) 1970年代から2000年代にかけて人口が約3倍増加したことを考えると、人口増加に合わせて下水道整備を進めることで、河川の有機汚染が抑制され、下水道による負荷の抑制効果は非常に大きいことがわかった。d) 陸域からの負荷流入という視点で海域のCOD濃度に与える影響を考えると、i) 下水道に

よるCOD削減がBODと比較して進んでいない点、ii) 河川水質のCOD濃度が低下していない点、iii) CODの形態として溶存態（D-COD）が多い点が考えられた。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

今後、学会発表もしくは学術論文を通じ、成果の広報・普及に努める。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

地理情報システム（GIS）を用いることで、より詳細な面的情報を利用した発生負荷量の推定を行うことができ、その算定手法を示すことができた。とくに、下水道等整備範囲を考慮することで、広域的な発生負荷量の推定に対して、より分かりやすい情報を国民に提供できる。

また、下水道の放流水の水質について、明石川では有機物は他の支川と同程度に減少していることから、下水放流水質の基準策定や放流水質の緩和運転の実施に対して、河川と海域のバランスをどのように取るべきであるのかについて基礎的な知見を提供することができた。

下水水質処理を制御することで流入負荷量を人為的に調整することができ、海域環境を制御することにつながる可能性もある。下水道が河川環境の改善に果たした役割は明らかであるが、今後は、人口減少が進み、社会全体の活動の規模も減少してくることから、自然に負荷量全体が減少することが予想される。また、下水道整備率の向上も進むことから、下水処理施設からの負荷の比率が相対的に大きくなっていくため、河川環境の改善と合わせて海域への負荷供給としてのバランスを考える必要がある。下水処理に関するきめ細かい現状把握を行うことが必要である。

6．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

- 1) 石塚正秀・矢野利樹・平木大補・和田有朗：下水道整備が陸域の有機物負荷量の長期的な変化に与える影響、土木学会論文集B1（水工学）、第69巻、No. 4、I_1717-I_1722、2013.

＜その他誌上発表（査読なし）＞

特に記載すべき事項はない

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 矢野利樹・石塚正秀：播磨灘流域圏における河川流域の土地利用および土地系負荷量の変遷、瀬戸内海研究フォーラムin大分 発表概要集、p. 35、2011.
- 2) 矢野利樹・石塚正秀：播磨灘流域圏における流域内土地系負荷量の30年間の変化、土木学会第66回年次学術講演会講演概要集、II-087、pp. 173-174、2011.
- 3) 矢野利樹・石塚正秀：播磨灘流域圏における土地系COD負荷量の長期変化、平成24年度土木学会四国支部第18回技術研究発表会講演概要集、pp. 309-310、2012.

- 4) 平木大補・石塚正秀・和田有朗：明石川流域における下水道整備に伴う河川水質変化の特徴、平成24年度土木学会四国支部第18回技術研究発表会講演概要集、pp. 329-330、2012.
- 5) 平木大補・石塚正秀・矢野利樹・和田有朗：明石川流域における人口・土地利用変化と下水道整備にともなう河川水質変化の特徴、土木学会第67回年次学術講演会講演概要集、VII-037、pp. 73-74、2012.
- 6) Ishizuka, M.: Factor causing recent decrease of nutrients from rivers, EMECS 10 - MEDCOAST 2013 joint conference, Abstract to the Global Congress on ICM (integrated coastal management), accepted.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 環境省 水・大気環境局：平成22年度公共用水域水質測定結果、p. 119、2011.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：都道府県別 下水道処理人口普及率（平成23年度末）、
<http://www.mlit.go.jp/common/000221768.pdf>
- 3) (社)日本水環境学会編：日本の水環境行政 改訂版、ぎょうせい、288p、2009.
- 4) 西田修三・前田瑛美・吉田淳貴・長澤稔郎：淀川流域圏の水質の変遷と下水道システムの影響解析、水工学論文集、第 54 巻、pp. 1339-1344、2010.
- 5) 環境省中央環境審議会水環境部会：第7次水質総量削減の在り方について（総量削減専門委員会報告案）、35p、2010.
- 6) 神戸市：玉津処理場業務報告書（1981年度～2008年度）.
- 7) 兵庫県HP：兵庫の下水道、http://web.pref.hyogo.lg.jp/wd18/wd18_000000055.html.
- 8) 環境省：水・大気環境局：平成18年度発生負荷量等算定調査報告書、2007.
- 9) 兵庫県：明石川河川整備計画（原案）、29p、2008.
- 10) 兵庫県農政環境部環境管理局：公共用水域の水質等測定結果報告書、1975-2009.
- 11) 神戸市建設局：玉津処理場水質データ、1981-2012.
- 12) 明石市水道部：明石川取水量データ、1967-2010.
- 13) 神戸市建設局：玉津処理場 - 水の再生 - 、5p、2003.

- 14) 神戸市建設局：平成22年度下水道管理年報、2011.
- 15) 駒井幸雄・古武家善成：明石川におけるBODの変動とその要因、兵庫県公害研究所研究報告、23、pp.82-85、1991.
- 16) 古武家善成：河川環境における直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩（LAS）の生分解と吸着－兵庫県内明石川水系での事例－、Jpn. J. Limnol.、49、1、27-36、1988.
- 17) 兵庫県：平成2年度環境白書、434p、1991.
- 18) 国土交通省水管理・国土保全局：平成24年度版日本の水資源、国立印刷局、201p、2012.
- 19) 神戸市下水道事業審議会：「下水道事業における次期中期経営計画（平成23年度～27年度）の策定にあたっての考え方」について－専門部会 まとめ－、5p、2010.
- 20) 環境省：発生負荷量等調査報告書、1979～2008.
- 21) 兵庫県HP：兵庫の下水道、http://web.pref.hyogo.lg.jp/wd18/wd18_000000034.html.
- 22) 浮田正夫・朱春黙・今井剛・伊藤豊・中西弘：各種生活排水処理施設におけるTHMFP等汚濁負荷原単位および排出率、環境技術、Vol.25, No.8, 438-442, 1996.
- 23) 兵庫県：兵庫県統計年表、2008.
- 24) 日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説、270p、1999.
- 25) 環境省：水・大気環境局：平成20年度発生負荷量等算定調査報告書、2009.
- 26) 環境省：発生負荷量等調査報告書、1979～2008.

Study on Recent Decrease of Nutrients in Harima-Nada Sea and Factor Causing Variation of Nutrient Flux from Rivers

Principal Investigator: Masahide ISHIZUKA

Institution: Kagawa University
2217-20 Hayashi-cho, Takamatsu, Kagawa, 761-0396, JAPAN
Tel: +81-87-864-2143 / Fax: +81-87-864-2188
E-mail: ishizuka@eng.kagawa-u.ac.jp

Cooperated by: Kobe Yamate University

[Abstract]

Key Words: COD, TN and TP generation loads, Sewage plant, Chemical forms of nutrient, River flood, Oligotrophication and Sea of Harima-nada

Bleaching of "Nori" (*Porphyra*) from the culture fishery has become serious problems in the Sea of Harima-nada, which is located in the eastern part of the Seto Inland Sea, Japan. This situation has probably resulted from oligotrophication. One of possible cause is the reduction of nutrients load from land and rivers.

Chemical forms of nutrients of riverwaters were investigated in the catchment of Harima-nada Sea and the ratios of DIN, DON, and PON were approximately 70, 20, and 10%, and those of DIP, DOP, and PP were approximately 40, 20, and 40%, respectively. At the peak of flood, PON increased to 60% of TN, and PP increase to 90% of TP. In addition, the ratio to the discharge during a flood occupied approximately 35-60% in a total discharge per one year, when the number of flood days was defined 30 days. Because the riverwater discharge largely increased during flood and the river water distributed widely in the sea, the behavior of particulate matter after flood was thought to be important for the rapid growth of phytoplankton in the sea. The amount of riverwater from the Honshu side accounted for approximately 85% of the catchment. This result showed it was necessary to divide the sea into the north and south sides. The relationship between the northern Harima-nada Sea and the Bisan-Seto Sea was shown at the normal water flow, but, at the flood, the riverwater distributed to the south of the sea.

This study evaluated the spatial distribution of the generation of COD, TN, and TP loads from domestic, industry and non-point (land uses) sources during 1985–2005 by using Geographical Information System techniques in the catchment of the Sea of Harima-nada. As a result, the development of sewerage was revealed to be an important factor in the reduction of loading from domestic sources. If it were acceptable to increase the loads to the values in 1985–88, when fishery production was a maximum, the current percent removals in the sewage treatment plants could be reduced from 85–90% (in 2005)

to 60–70% for COD and from 80–90% (in 2005) to 70% for TP. In the case of TN, the present status appears to be good enough; there is no need to lower the percent removal. In the future, the control of sewage-treated water will be very important to nutrient management in both rivers and semi-enclosed seas.

[課題番号: RFb-1102]

播磨灘の栄養塩異変の解明と栄養塩流入負荷の変動要因の研究

Study on Recent Decrease of Nutrients in Harima-Nada Sea and Factor Causing Variation of Nutrient Flux from Rivers

所属: 香川大学

研究代表者: 石塚 正秀

