大阪湾に流入する陸域負荷の実態・変遷と海域環境の変化

Change of Inflow Load and Water Environment in Osaka Bay

中谷祐介¹・川住亮太²・西田修三³

Yusuke NAKATANI, Ryota KAWASUMI and Shuzo NISHIDA

To clarify change and actual condition of inflow load and sea environment in Osaka Bay from a not only quantitative but also qualitative point of view, loading amounts of COD, phosphorus, and nitrogen from 1980 to 2005 were estimated by collecting and analyzing statistical data about rivers, coastal waters, sewerage systems and so on. As a result, it was revealed that the plan outlined for reducing total pollution loads and the construction of sewerage system for years have shifted a nutrient balance of the inflow load and brought about changes in water quality structure and ecosystem in the bay. Moreover, analysis results indicated that nutrient loads caused by flood which people couldn't control had a significant impact on an annual total load compared with inflow loads in the ordinary condition.

1. はじめに

劣化した閉鎖性海域の環境再生のためには、総量規制に代表される量的な負荷削減対策だけでは不十分であり、物質循環や生態系の管理が必要との認識が広まりつつある。大阪湾流域圏では長年にわたる排出規制や上下水道の整備により人工的な水・物質循環系が発達し、自然系と人工系からなる複合循環系によって海域への汚濁負荷が決定されるようになった(西田ら, 2010)。今後は人工循環系を活用して陸域負荷を人為的に制御することにより、健全な海域環境を再生・創造していくことが求められる。しかし、流入栄養塩の形態や出水時を含めた物質輸送量など、陸域負荷の実態については不明な点が依然多く、海域の物質循環は精確には把握されていない。そのため、健全な海域環境の保全・創造に向けた適切な陸域負荷の在り方を提案することは現状では難しい。

一方、過去数十年にわたり大阪湾が経験した陸域負荷と海域環境の変遷は、人為的なインパクトと自然環境システムのレスポンスに他ならない。過去のデータから見出される両指標の対応関係は、今後の物質循環の管理方策を講じる上で有用な知見となり得る。幸いにも大阪湾では関係機関による水質調査が継続的に実施され、豊富な実測データが蓄積されている。しかし、陸域負荷の変遷についてはCOD、T-N、T-Pを指標とした量的変化は見積もられているものの(環境省, 2009; 中辻ら, 2003)、栄養塩構成比などの物質循環解析に重要な質的要素については十分には把握されていない。

本研究では、河川の水文水質データや公共用水域への各種排水に関する統計資料の分析を行い、大阪湾に流入

する陸域負荷の量的・質的変遷を明らかにする。加えて、海域観測資料を基に、陸域負荷の変化が海域環境に及ぼした影響について考察を行う。さらに、雨天時負荷を含めた陸域負荷の実態を明らかにするとともに、今後の下水道整備による負荷削減効果について評価を行う。

2. 方法

(1) 陸域負荷の算定方法

本研究では図-1に示すように大阪湾流域を7つに区分して扱った。算定対象期間は水質総量規制開始後の1980年から2005年とし、CODおよび形態別窒素・リン(NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, O-N, PO₄-P, O-P)について、晴天時負荷量(平水時における日平均負荷量)を5年ごとに算定した。なお、DIN(溶存無機態窒素)はNH₄-N, NO₂-N, NO₃-Nの合計とし、有機態成分(O-N, O-P)は全成分から溶存無機態成分を差し引くことで求めた。また、海域の物質循環を精確に捉えるためには、人為起源の排出負

図-1 大阪湾流域と算定区分

1 学生会員 修(工) 大阪大学大学院 地球総合工学専攻
2 学生会員 学(工) 大阪大学大学院 地球総合工学専攻
3 正会員 工博 大阪大学大学院教授 地球総合工学専攻

荷だけでなく、人為的な制御やモニタリングが難しい自然系の負荷についてもあわせて把握する必要がある。そこで、現況については雨天時負荷を含めた年間負荷量の算定も行った。雨天時負荷としては河川出水、雨水の海面沈着、合流式下水道からの越流（CSO）が挙げられるが、このうちCSOに関しては実測データが不足しているため今回は考慮しなかった。

まず、大阪湾に流入する一級・二級河川を対象に、公用水域水質調査が行われている調査地点のうち、下流部に位置しかつ観測頻度が高い地点を代表地点に選定した。この地点における物質輸送量を「河川負荷」として算定し、これより上流で発生し流下する負荷はこの河川負荷に含まれると考えた。次に、代表地点より下流に位置する下水処理場、事業場、浄化槽等からの排出負荷を個別に算定し、河川負荷に加算することで大阪湾への総陸域負荷量を求めた。これら排出負荷については河口までの距離が短いことから、海域への流達率は1とした。各負荷の算定方法について以下で説明する。

a) 河川負荷

平水負荷の算定にあたっては、公用水域調査結果の流量と水質の年平均値（3年移動平均）を用いた。ただし、継続的な流量観測が実施されている淀川、大和川、猪名川、武庫川については、流量年表等から求めた平水流量（185日流量）を適用した。なお、寝屋川では淀川と大和川から、神崎川では淀川から導水がなされているため、取水地点の水質と実績流量を基に負荷量の受け渡しを考慮した。また、淀川と神崎川では代表地点よりも下流で取水が行われているため、代表地点における河川負荷から取水に伴う負荷を除去した。出水負荷を含めた年間負荷量の算定に際して、主要河川である淀川と大和川については1時間ごとの水位データとH-Q式から流量を求めた。猪名川と武庫川については流量年表から、その他の中小河川については集水域内の年間降水量に集水面積を乗じることで年間流量を求めた。また、淀川と大和川については平水流量を閾値に、低流量時には公用水域調査結果の水質濃度を適用し、高流量時には独自の観測結果を基に構築したL-Q式を用いて負荷量を算定した（中谷ら、2010）。その他の中小河川では出水時の水質データが不足しているため、流況に依らず平水時の水質濃度を適用した。

b) 下水処理場負荷

放流量と水質（COD, T-N, T-P）については下水道統計よりデータが入手可能である。また、各処理場では個別に水質試験が実施され、形態別栄養塩濃度を含めた詳細なデータが取りまとめられている。本研究ではこれらの統計資料を収集、分析することにより、処理場からの排出負荷を算定した。なお、データが欠損している処

理場からの排出負荷量は、実測報告値のある処理場の負荷特性（水質項目間の負荷量相関など）を基に対象年度ごとに推定した。

c) 事業場負荷

下水道を介さずに公用水域に汚濁負荷を直接排出している事業場（水質汚濁防止法上の特定施設を設置している特定事業場）のみを対象とし、その他の事業場についてはデータの不足により算定が困難なため今回は除外した。まず、各特定事業場からの届出排水量に関するデータを各自治体から収集した。ただし、この排水量データは間接冷却水や雨水を含めた総排水量である。一方、環境省は特定排水を対象にした実測報告値を基に、大阪湾流域全体における事業場からの業種別発生負荷量（COD, T-N, T-P）を事業場規模別に算定し公表している。そこで、日平均排水量50m³以上の事業場については業種別に大阪湾への総負荷量を届出排水量で按分し、個々の事業場からの負荷量を算定した。また、日平均排水量50m³未満の事業場については排水量が少なく負荷量が微小であると仮定し、環境省の実測調査に基づいた業種別平均水質に届出排水量を乗じることで各事業場からの負荷量を算定した。事業場と下水処理場での処理方式は類似していることから、各年度における下水処理場負荷の平均的な栄養塩構成比を用いて、事業場からの形態別窒素とリンの負荷量を推定した。また、過去のデータには欠損が多いため、2005年度の事業場負荷量に対して発生負荷量算定値（環境省、2009）の経年変化率を乗じることで、過去の事業場負荷量を推定した。

d) 浄化槽等負荷

浄化槽等については十分なデータがなく個々に負荷量を算定することが困難なため、原単位法により面源負荷として算定した。単独浄化槽、合併浄化槽、汲み取り、自家処理による負荷をあわせて浄化槽等負荷とし、各処理形態別の人口と原単位、除去率から発生負荷量を算定した。ただし、データの都合上、原単位と除去率には現状の値（環境省、2009）を全ての年度に適用した。栄養塩の形態は事業場負荷と同様の方法により推定した。

e) 降水負荷

2007年5月から2010年3月までの約3年間にわたる独自の雨水水質調査から得られた雨水平均水質に、算定期間における降水量を乗じることで負荷量を求めた。調査方法等の詳細については西田ら（2008）を参照されたい。

(2) 海域環境の分析

海域環境の変遷を明らかにするために、既往の海域観測資料の分析を行った。水質データについては浅海定線調査結果を、植物プランクトンに関するデータについては公用水域調査結果を使用した。経年的な変化傾向を捉えるために、いずれも年平均値に5年移動平均を施した。

図-2 晴天時負荷量とDIN/T-N比および $PO_4\text{-P/T-P}$ 比の経年変化

図-3 下水道普及率の経年変化

図-4 下水処理場における負荷除去率の経年変化

図-5 陸域負荷の $NH_4\text{-N/DIN}$ 比と $DIN/PO_4\text{-P}$ 比の経年変化

3. 結果と考察

(1) 晴天時負荷の経年変化

晴天時負荷の経年変化を図-2に、下水道普及率と下水処理場における負荷除去率の経年変化をそれぞれ図-3と図-4に示す。ここで負荷除去率とは、各処理場の負荷除去量（流入負荷量と放流負荷量の差）を流入負荷量で除した割合である。まず、CODは1980～2005年度の25年間に負荷量は約半減しており、瀬戸内法以降の継続的な総量規制と下水道普及率の向上により着実に削減されてきたことがわかる。

T-Pについても1980年度から減少傾向にあり、2005年度までに約65%が削減されている。瀬戸内法ではリンの削減指導が行われたものの規制まではなされず、法的規制は2000年に始まる第5次総量規制の富栄養化対策まで行われなかった。それにも拘わらず1980年度から負荷量が減少傾向にあった原因としては、下水道普及率の向上と無リン洗剤の普及によるところが大きいと考えられる。

T-Nについては25年間に約40%の削減がなされているが、1990年度まではほとんど変化がなく、その後減少が始まっている。これは窒素については1995年からの削減指導と2000年から始まる第5次総量規制まで実効性のある対策がなされなかったこと、さらに図-4に示すように下水処理における除去能力がCODやリンに比べて低かったために、下水道整備による削減効果が現れにくかったことが原因と考えられる。形態別窒素に注目すると、1980～1990年度にはO-Nが減少する一方で $NH_4\text{-N}$ が増加

している。これは下水道普及率が向上するとともに、当時の一般的な下水処理方式である活性汚泥法が有機物除去を主な目的としていたためである。1995年度以降は削減指導および規制の効果が加わりT-Nは減少するが、その内訳をみるとO-NよりもDINの減少によるところが大きい。さらにDINの中でも $NH_4\text{-N}$ の減少と $NO_3\text{-N}$ の増加という質的変化が生じている。これは、地域によって時期に若干差はあるものの、概ね1985年頃から多くの下水処理場で高度処理技術が導入され始め、処理過程における硝化能力および窒素除去能力が向上したためである（西田ら、2010）。このように、陸域負荷の経年変化は各水質項目によって大きく異なり、環境施策の変遷や社会環境、さらに下水道システムの整備と高度化の影響が明瞭に現れていることがわかった。

(2) 陸域負荷と海域環境の質的変遷

晴天時負荷の $NH_4\text{-N/DIN}$ 比と $DIN/PO_4\text{-P}$ 比の経年変化を図-5に示す。1985年度以降、高度処理技術の普及に伴って $NH_4\text{-N/DIN}$ 比は0.8から0.3へと大幅に低下している。一方、 $DIN/PO_4\text{-P}$ 比は1980～1985年度にかけて25から40へと急増し、その後ほとんど変化はみられない。これは、上述したようにリンは総量規制開始前から負荷削減が進んだのに対して、窒素には大きな変化がなかったためである。また、陸域負荷の $DIN/PO_4\text{-P}$ 比はRedfield比に比べて高いことから、沿岸海域の栄養塩環境はリン制限下にあったと推察される。

次に、大阪湾表層水の $NH_4\text{-N/DIN}$ 比と $DIN/PO_4\text{-P}$ 比の経年変化を図-6に示す。 $NH_4\text{-N/DIN}$ 比は1975年度には湾奥部で0.6以上の高い値を示していたが、1990年頃を境

図-6 海域表層における栄養塩バランスの経年変化

に徐々に低下し始め、2005年度には0.3以下にまで下がっている。また、 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比は1975～1985年度にかけて大きく上昇し、その後は50前後で推移している。図-5の結果と比較すると、湾奥部表層の栄養塩バランスは陸域負荷の質的变化によく対応した経年変化を辿っていることがみてとれる。図-7に湾東部海域における植物プランクトンの種構成比の変化を示す。従来からの優占種である *Skeletonema costatum* は1974年度には約90%を占めていたが1985年度には約50%にまで減少し、その後は大きな変化はみられない。その経年変化は陸域負荷や海域水質の $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比の変遷と概ね対応しており、山本ら（2003）が指摘したように、陸域からの栄養塩の供給バランスの変化が低次生態系の種組成変化を引き起こした可能性が考えられる。海域のN/P比と植物プランクトンの増殖生理の関係については多くの研究例（林ら、2000；矢持，1993）が存在するが、十分には解明されておらず今後の課題と考える。以上より、長期にわたる人為的な負荷削減は陸域負荷の質を大きく変化させ、沿岸海域の水質構造、さらには低次生態系の変質を引き起こしたことが示唆された。

一方、湾西部海域では1975年度以降、継続的に $\text{NH}_4\text{-N}/\text{DIN}$ 比が上昇、 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比が低下する傾向にあり、湾奥部との環境勾配は増しつつある。特に2000年度以降

図-7 湾東部における植物プランクトン種構成比の経年変化

図-8 各流域からのT-N・T-Pの年間負荷量

は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の急激な低下に伴って大きく変化している。今回は示していないが、湾西部海域と播磨灘の表層水質の経年変化には同様の変動傾向が確認された。播磨灘ではノリの色落ち被害が生じるなど貧栄養化の進行が近年報告されており、今回の結果から大阪湾西部にもその影響が及んでいることが考えられる。

(3) 雨天時含めた陸域負荷の現状

2005年度を対象に、出水負荷を含めた流域別の年間負荷量の算定結果を図-8に示す。淀川流域からの淡水流入量は大阪湾への総流入量のおよそ半分を占めているが、T-NとT-Pの負荷量割合はそれぞれ約21%、25%にとどまっている。一方で、寝屋川・大阪市内河川流域からは淀川流域に匹敵、もしくは上回る量の窒素やリンが負荷されている。当該流域の大半は感潮域であり、栄養塩動態に生物化学過程が大きく作用する場合には海域への流達率が小さくなることを考えると、流達率を1と設定した今回の算定結果は負荷量を過大評価している可能性が考えられる。一方、流域内には合流式下水道を有する処理場が多く存在し、今回CSOを無視したことを考えると、実際の負荷量はさらに大きいと予想される。今後、大阪湾への陸域負荷の算定精度をさらに向上させるためには、寝屋川・大阪市内河川流域における栄養塩動態の解明が極めて重要であると言える。

次に、図-9に大阪湾への陸域負荷と降水負荷の年変動

図-9 陸域負荷と降水負荷の年変動

を示す。平水負荷は経年的に微減傾向にある一方で出水負荷は大きく変動し、年間負荷量はT-N、T-Pについてそれぞれ約±10%、±20%の変動幅を有している。出水負荷が年間負荷量に占める割合はそれぞれ7~23%、14~42%であり、さらにCSOの影響を考慮すると出水負荷の寄与は極めて大きい。降水負荷はT-N、T-Pのそれぞれについて雨天時負荷全体の約3%、0.5%と小さく、湾内の栄養塩収支に及ぼす影響は年スケールでは軽微と言える。ただし、一降雨あたりの窒素負荷量は最大で陸域からの日平均負荷量の約40%弱に相当し、集中的な降水負荷は無視できないことが指摘されている(西田ら, 2008)。

また、河川負荷を見積もる際には出水負荷の取り扱いが算定精度に大きく影響する(中谷ら, 2010)。そこで、2003~2007年度を対象に、淀川と大和川からの負荷量算定にL-Q式を適用せずに、出水時にも平水水質を適用した場合に大阪湾への年間陸域負荷量に生じる算定差を見積もった。その結果、T-Nでは最大でも4%以内の差にとどまる一方で、T-Pでは最大17%もの算定差が生じた。これより、出水時の負荷特性を無視した場合には、年間負荷量の見積もりに大きな差異が生じることが示された。

(4) 将来の下水道整備による負荷削減効果

現在実施段階にある大阪湾流域別下水道整備総合計画では、放流水質の整備目標(2025年度時点)をCOD: 8 mg/L、T-N: 8 mg/L、T-P: 0.8 mg/Lと設定している。今回の算定結果を基に、仮に整備目標が達成された場合の負荷削減量を見積もったところ、現況の総陸域負荷量(2003~2007年度平均値)に比べてCOD、T-N、T-Pについてそれぞれ6.1%、18%、6.0%が削減される結果が得られた。T-Nについては今後も大幅な削減効果が見込まれるが、これは現状の下水処理過程の除去率が依然低いためである(図-4)。一方で、CODとT-Pについては既に除去率が高い水準にあることから、今後大きな削減効果は期待できないことがわかった。

4. おわりに

本研究で得られた主たる結論を以下に示す。

- (1) 1980~2005年度の25年間にCOD、リン、窒素の陸

域負荷はそれぞれ約50%、65%、40%の量的削減がなされた。その変遷には環境施策や社会環境、下水道整備の影響が明瞭に反映されており、水質項目ごとに異なる変遷を辿っていたことが明らかになった。

- (2) 長期にわたる人為的な負荷削減は、陸域から供給される栄養塩のバランスを変化させ、湾奥部海域の水質構造と生態系の変質を引き起こした可能性が示唆された。
- (3) 寝屋川・大阪市内河川流域からの負荷量は淀川流域に匹敵、もしくは上回るほど大きいことが示された。今後、大阪湾への負荷量をより高い精度で算定するためには、当流域における栄養塩動態の解明が重要であると言える。
- (4) 大阪湾への年間陸域負荷量は、気象状況によりT-N、T-Pについてそれぞれ約±10%、±20%の変動幅を有していた。また、総陸域負荷量に占める出水負荷の割合は、それぞれ7~23%、14~42%と極めて大きいことが示された。
- (5) 現行の下水道整備施策の整備目標が達成された場合、窒素に関しては大幅な削減が予想されるのに対し、CODとリンについては今後大きな削減効果は期待できないことがわかった。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、各関係機関の方々には資料のご提供等のご高配を受けた。また、本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(B) No.21360236)および公益財団法人大林都市研究振興財団による補助を受けて行われた。ここにあわせて感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 環境省(2009):平成20年度発生負荷量等算定調査報告書。
 中谷祐介・西田修三(2010):淀川・大和川における出水時負荷特性と陸域流入負荷の評価, 水工学論文集, 第54巻, pp. 1615 - 1620。
 中辻啓二・韓 銅珍・山根伸之(2003):大阪湾における汚濁負荷量の総量規制施策が水質保全に与えた効果の科学的評価, 土木学会論文集, No. 741, VII - 28, pp. 69 - 87。
 西田修三・中谷祐介・嶋田恭佑・入江政安(2008):降水の水質特性と大阪湾への栄養塩負荷の影響解析, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1061 - 1065。
 西田修三・前田瑛美・吉田淳貴・長澤稔郎(2010):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。
 林 美鶴・柳 哲雄(2000):伊予灘南部・大阪湾におけるDIN:DIP濃度とN:P比の変遷, 海の研究, 9 (3), pp. 133 - 142。
 山本民次・橋本俊也・松田 治・多田邦尚(1999):瀬戸内海における植物プランクトン動態N:P比とその変動要因, 水産海洋研究, 63 (6), pp. 6 - 13。
 矢持 進(1993):水域別の水産生物に及ぼすN:P比の影響, 水域の窒素:リン比と水産生物, 恒星社厚生閣, pp. 120 - 132。