流域圏の土地利用変遷および洪水流出を考慮した大阪湾への長期栄養塩流出量の推定（その３）

代表研究者：齋藤光代（岡山大学学術研究院環境生命科学学域・准教授）
共同研究者：王 崑陽（広島大学大学院総合科学研究科・博士後期課程）
川口智弥（岡山大学環境理工学部・学部４回生）

［研究目的］

大阪湾に対する栄養塩流出量の長期変遷については、これまで原単位法 [1)]や公共用水域調査結果に基づく推定 [2)]が行われてきたが、最も汚濁が顕著であったと考えられる 1960～70 年代に洪水時を含めてどの程度の栄養塩が大阪湾に流出したかは従来明らかにされておらず、また、土地利用の変化にともなう栄養塩負荷の起源や供給域の変化に関する解析も不十分である。そこで本研究では、大阪湾に流入する一級河川の一つである大和川流域を対象とし、準分布型水文水質モデル（SWAT）を用いて実測データの整備が不十分な 1970 年代以前の栄養塩流出量を復元し､過去 50 年間を超える長期的な変化を推定することを目的とし、最終年度の３年目は、（１）洪水時を含む高頻度の栄養塩実測濃度データを蓄積し、それらの結果を基に（２）大和川の支流域スケールでの水・栄養塩流出量とその空間的特性を明らかにし、さらに（３）大和川本流スケールでの大阪湾への水･栄養塩流出量を高時間分解能（週～時間単位）で推定した。

［研究方法］

1. <u>対象地域</u>：大和川は奈良盆地および大阪府南部を集水域とし、流域面積は 1,077km^2、本流の流下距離は 68km、流域の年平均降水量は 1,300mm である（図-1(a)）。大和川では 1970 年代に最も汚濁が深刻であったとされるが、近年は環境基準値を下回るまでに回復してきている。また、1970～2010 年代にかけての

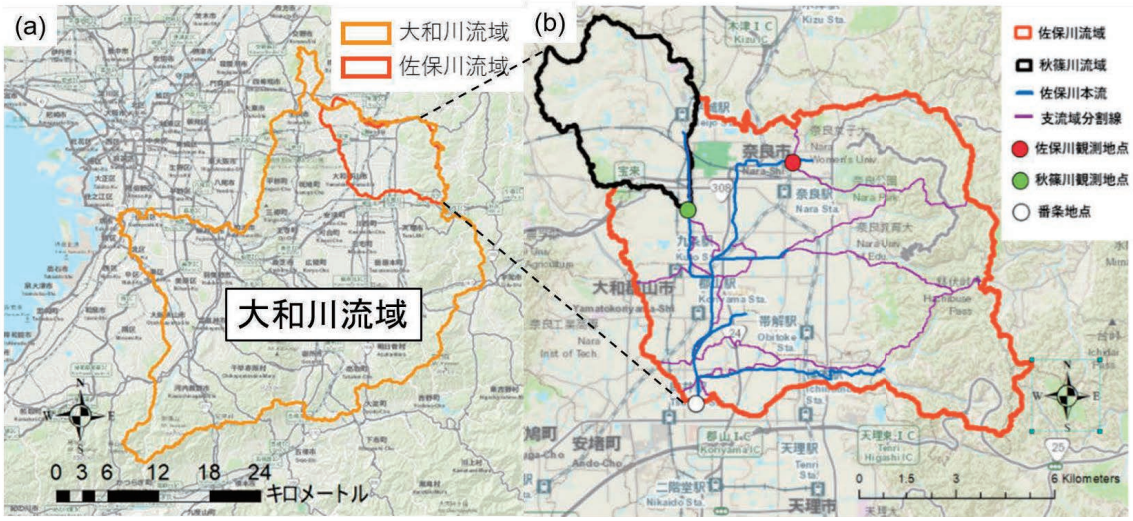

図-1　大和川流域と佐保川流域の位置(a)および佐保川における観測地点（佐保川観測地点、秋篠川観測地点、番条地点）の位置(b)

土地利用変化をみると、特に堺市および奈良市を中心に農地（主に水田）から都市への変化が最も著しい[3]。一方で、主要な土地利用の一つは森林であり、流域の約 40%を占めている。また、特に洪水時の時間単位での水位、流量、および水質の変化を確認するため、調査対象として、大和川の支川の一つである佐保川を設定した（図-1(b)）。佐保川流域は大和川流域の北東部に位置し、流域面積は 129km^2 で大和川流域の約 12%を占め、流路延長は 19km である。また、土地利用は、水田が 15.6%、畑地が 1.4%、森林が 32.6%、市街地（建物用地、道路・鉄道、その他の用地の合計）が 45.5%であり、流域に占める土地利用の割合としては市街地が最も大きく、次いで森林、農地の順となっている。佐保川の支流域（佐保川観測地点流域および秋篠川流域）2 地点において（図-1(b)）、後述する現地観測を実施した。流域に占める土地利用の割合として、前者は森林、後者は市街地が最も大きくなっている。また、佐保川流域全体での下水道整備率は約 90%であるが、佐保川観測地点流域などでは、一部下水道が未整備の地域も含まれている。

2. <u>高頻度現地観測データの採取および試料分析</u>：国交省による水質データを補完するため、大和川本流の堺、大和川の支流の佐保川および秋篠川の 3 地点において、週 1 回の頻度で採水を実施した。また、洪水時を含むモニタリングとして、佐保川観測地点（図-1(b)）において水圧センサーおよび濁度計を河床に設置し、河川の水位および濁度を 10 分間隔でモニターするとともに、水位の異なる時期に流量の計測を実施し、水位－流量関係式（H-Q 式）を作成した。また、2020 年 7 月から 2021 年 10 月にかけて発生した複数回の降雨イベント時に現地での集中観測を実施し、流量の計測に加えて数時間おきに採水を実施した。現地で採取した水試料については、栄養塩自動分析装置により溶存無機態窒素（硝酸態窒素：NO_3-N、亜硝酸態窒素：NO_2-N、アンモニア態窒素：NH_4-N）および溶存無機態リン（PO_4-P）の定量分析を行った。また、洪水時の水試料については、硝酸（NO_3^-）の窒素安定同位体比（$\delta^{15}N$）、懸濁物質（Suspended Solids: SS）濃度、および懸濁態有機物（Particulate organic Matter: POM）の窒素・炭素量および窒素・炭素安定同位体比（$\delta^{15}N$、$\delta^{13}C$）の分析も行った。

3. <u>水文水質モデル解析</u>：大和川流域から大阪湾への長期栄養塩流入量を推定するにあたり、準分布型流域水文水質モデルである SWAT（Soil and Water Assessment Tool）[4]を使用した。大和川流域全体における水文応答単位（Hydrologic Response Units: HRU）は 3,300 個に、小流域は 51 個に設定した。佐保川流域については、HRU を 473 個、小流域を 11 個とした。各種パラメータのキャリブレーションは SWAT-CUP を使用して SUFI2 法によって行い、キャリブレーションの可否は Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)、Percent bias (PBIAS)、および RMSE-observations standard deviation ratio (RSR)の指標を用いて評価した[5]。なお、①支流域（佐保川）スケールでの解析は、佐保川観測地点および番条地点（図-1(b)）における日単位流量および NO_3-N 流出量変化、また、②佐保川流域の支流域単位での NO_3-N 流出量の空間分布について実施した。また、

大和川本流スケールでの解析は、①比較的大規模な降雨イベントが発生した2014年、2016年、および2018年を対象とした日単位および時間単位での流量変化の再現と比較、②大和川下流の国土交通省遠里小野橋観測所、および本研究における堺採水地点（遠里小野橋観測所のごく近傍）における栄養塩濃度データ（遠里小野橋観測所：月1回、堺観測地点：週1回の頻度）を用いた、2009年～2021年における日単位 NO_3-N 流出量の推定と比較を行った。

［結果と考察］

(1) **洪水時を含む流量、栄養塩濃度および窒素安定同位体比の変化**：本流下流部（堺）、支川の佐保川および秋篠川における約1週間間隔での栄養塩濃度の変化に加え、佐保川において洪水時の集中観測を実施し、河川水位と流量の関係式（H-Q式）を構築するとともに、洪水イベント期間中の栄養塩濃度の数時間単位での変動を確認した（図-2）。以上の結果は、従来の月1回～数か月に1回の頻度の水質測定では捉えられないものであり、特に、洪水時の流量増加に対応する濃度変化の把握は、栄養塩流出量の推定精度向上に大きく貢献した。また、窒素安定同位体比（$\delta^{15}N$）の結果から、平水時と降雨時とでは、河川への窒素供給源が変化していることが示唆された。

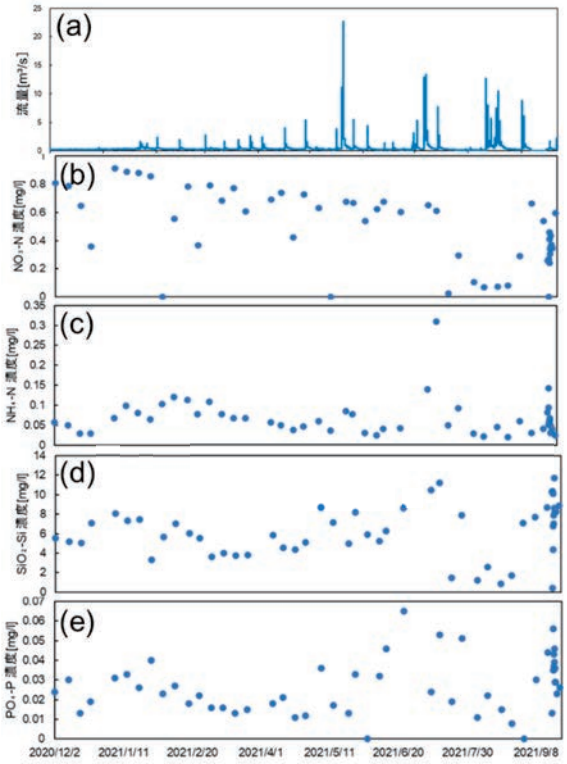

図-2　佐保川実測地点における河川流量（a）、栄養塩濃度（b: NO_3-N, c: NH_4-N, d: SiO_2-Si, e: PO_4-P ）の変化

(2) **支流域スケールでの日単位流量・栄養塩流出量の推定**：佐保川流域を対象に、洪水時を含む高頻度かつ長期の実測データを用いて SWAT モデルの検証を行い、洪水の影響を考慮した日単位での流量および栄養塩（NO_3-N）流出量評価が可能となった。特に、下水道で処理されずに直接河川へ流入する NO_3-N のインプット量を考慮した結果、日単位 NO_3-N 流出量を高い精度で再現することに成功し、未処理排水経由の NO_3-N 負荷の存在が本解析結果からも裏付けられた（図-3）。

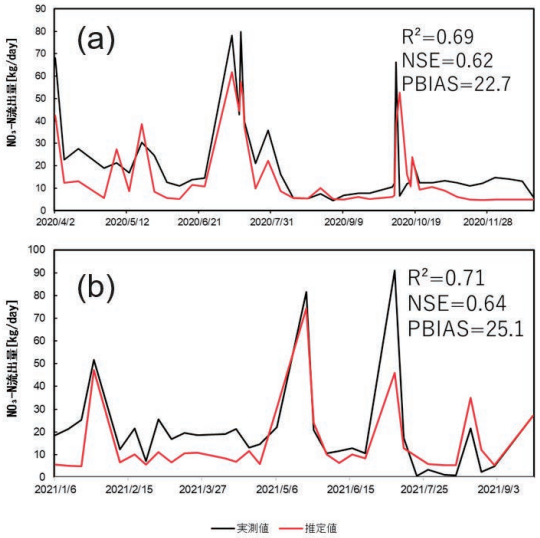

図-3　佐保川観測地点における日単位 NO_3-N 流出量のキャリブレーション(a)およびバリデーション結果(b)

(3) **支流域スケールでの栄養塩流出量の空間的特性評価**：佐保川流域をさらに11の支

流域に分割して支流域ごとの NO_3-N 流出量を推定し、その空間的な特性を把握した結果、特に農地（水田）の多い支流域で NO_3-N 流出量が大きく、従来は脱窒による NO_3-N の浄化に寄与すると認識されてきた水田が、下水道整備が進んだ地域では NO_3-N の負荷源になっていることが明らかになった。また、前述した未処理の排水も、負荷の要因となっていることが空間的にも確認できた。

(4) <u>大和川本流スケールにおける流量の高時間分解推定および検証</u>: SWAT を用いて、比較的大規模な降雨イベントが発生した 2014 年、2016 年、および 2018 年における日単位および時間単位での流量解析を実施した結果、時間単位の推定では、特に洪水時のピークの再現性が大幅に向上し、水収支の内訳では、降水量に対する河川流出量、特に表面流出量の割合が増加し、降雨後の流出をより精度良く推定できることが確認された。

(5) <u>大和川本流スケールにおける栄養塩流出量の高時間分解推定および検証</u>: SWAT を用いて、2009～2021 年の期間を対象に従来の月単位および本研究による週単位での栄養塩濃度データを用いた NO_3-N 流出量の推定を実施した結果、週単位での推定結果のほうが、月単位での結果を全体的に上回り、特に、日最大流出量については 2 倍以上の差があった（図-4）。これらの結果から、本研究で新たに取得した高頻度の栄養塩濃度を用いて構築したモデルにより、従来よりも高精度で大阪湾への NO_3-N 流出量を推定することが可能となった。

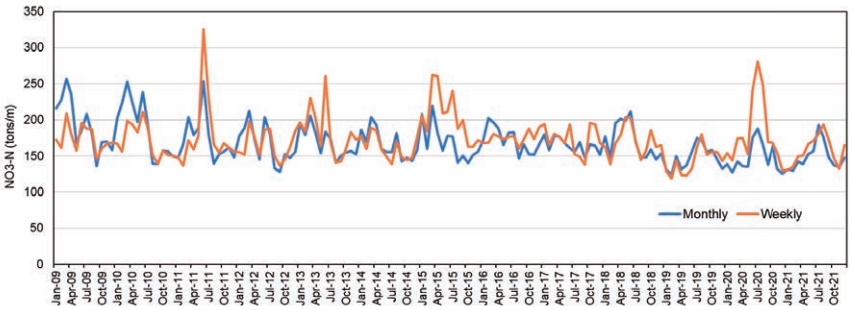

図-4　大和川下流における月単位および週単位の NO_3-N 濃度を用いた流出量の推定結果

<u>謝辞</u>

本研究の実施にあたり、現地での高頻度採水には佐保川清掃対策委員会の皆様、秋篠川桜の会の皆様、および雑魚寝館の亀井館長と採水チームの皆様にご協力をいただき、SWAT モデルの解析に用いた流域下水道データについては、奈良県流域下水道センターおよび大阪府南部流域下水道事務所よりご提供をいただきました。以上を記し、深く御礼申し上げます。

<u>引用文献</u>

1) 中辻啓二ほか（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，741，Ⅶ-28，69-87.

2) 中谷祐介ほか（2011）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．土木学会論文集 B2（海岸工学），67(2)，Ⅰ_886-Ⅰ_890.

3) Wang, K., et al. (2022) Evaluation of nitrogen loading in the last 80 years in an urbanized Asian coastal catchment through the reconstruction of severe contamination period. Environmental Research Letters, 17, 014010, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3ced.

4) SWAT (Soil & Water Assessment tool) (https://swat.tamu.edu/)　（2021.3.13 閲覧）

5) Moriasi, D.,et al. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50, 3, 885–900.