

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

代表者: 齋藤光代(岡山大学大学院環境生命科学研究科・准教授)

共同研究者: 岩田 徹(岡山大学大学院環境生命科学研究科・准教授)

王 崑陽(広島大学大学院総合科学研究科・博士後期課程)

[研究目的]

大阪湾の環境の将来予測および水質保全対策にあたっては、陸域からの栄養塩負荷量の現状把握だけでなく、過去から現在に至る長期の変遷を含めた定量的評価が重要である。これに対し、従来原単位法による発生負荷量の推定¹⁾や公共用水域調査結果を用いた流入負荷量の推定²⁾が行われてきたが、過去50年間以上の長期にわたる栄養塩流入負荷量の変遷は不明確であり、特に、最も汚濁が顕著であったと考えられる1960~70年代にかけて、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これまで明らかにされていない。また、大阪湾流入河川においては、懸濁態栄養塩の起源や供給域に関する解析や定量的評価はこれまで十分に行われていない。

そこで本研究では、大阪湾に流入する一級河川の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た。そのため、(1)1980年代以降の国交省の観測データの収集に加えてそれを補完する

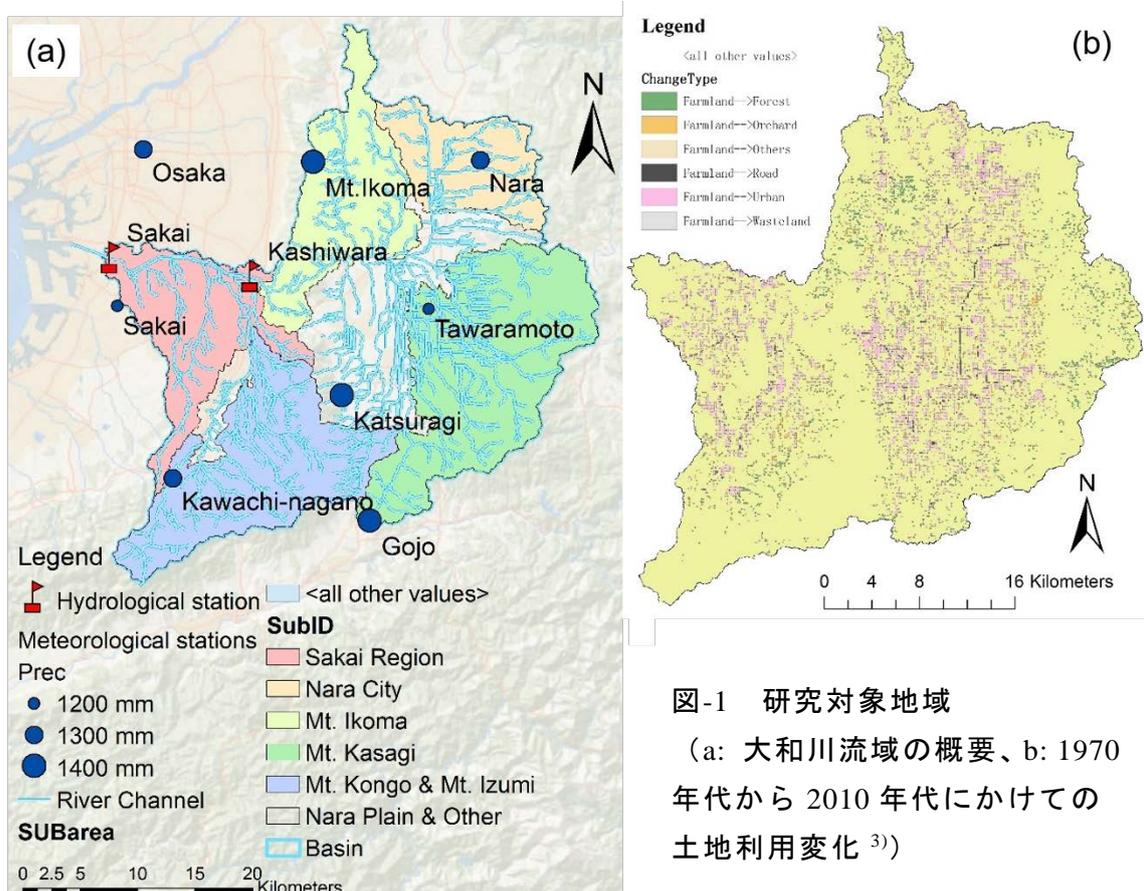


図-1 研究対象地域

(a: 大和川流域の概要、b: 1970年代から2010年代にかけての土地利用変化³⁾)

高頻度水質データを取得するとともに、洪水時に負荷量が増加する懸濁態栄養塩の起源となる河床堆積物や表層土壌の調査を行い、(2) 流域の土地利用変化、特に都市域の拡大やインフラ状況の変化および森林域における樹木の成長が水文流出過程・栄養塩流出量に及ぼす影響を定量的に評価した上で栄養塩流出量の長期変化の推定を行い、(3) 洪水時の流出量評価を念頭に置き、日単位から時間単位での解析を試みた。

[研究方法]

1. **対象地域**: 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 1,077km²、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ているが、近年は環境基準値を下回るまで回復してきている。大和川流域の土地利用は最近数十年間で大きく変化しており、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 (図-1(b))³⁾。一方で、主要な土地利用の一つが森林であり、流域の約 40% を占めている。

2. **現地調査および試料分析**: 国土交通省により 1980 年代以降整備されている水質データ (概ね月 1 回の頻度) を補完するため、大和川本流下流部の堺、大和川流域北部の支流で奈良市を経由する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、洪水時に河川経路の負荷量が増加すると想定される懸濁態栄養塩について明らかにするため、その起源となりうる河床堆積物および表層土壌をそれぞれ流路沿いの 8 地点および河道近傍の異なる土地利用 (森林、水田および放棄地) の 6 地点で採取した。

水試料については溶存無機態窒素 (硝酸態窒素: NO₃-N、亜硝酸態窒素: NO₂-N、アンモニア態窒素: NH₄-N) および溶存無機態リン (PO₄-P) の定量分析を行い、河床堆積物および表層土壌試料については、有機態窒素・炭素量および窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$)、炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) の分析を行った。

3. **水文水質モデル解析**: 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 Water Assessment Tool)⁴⁾ の version2012Rev635 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 個に設定し、小流域は 51 個に分割し計算した。地表流量および蒸発散の推定法には、それぞれ Daily Curve Number 法および Penman-Monteith 法を選択した。各種パラメータのキャリブレーションは SWAT-CUP version5.1.6.2 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⁾。

解析に用いるデータとして、国土交通省の水文水質データベースより大和川の堺および柏原観測所における最近約 40 年間の流量・水質データを収集し、同期間の気象観測データは気象庁のデータベースより収集した。また、都市部のインフラ情報として、大阪府および奈良県における下水道普及率、下水処理区・処理量に関する情報を収集し解析に用いた。森林域においては、詳細な植生の情報を取得するため、生駒山地エリア、笠置山地エリア、および金剛山地-和泉山地エリアの 3 つの森林流域を対象に

UAV による空撮を各エリアで 50 ショットずつ実施し、得られた画像データを基に植生構造のタイプ分けを行った。また、森林の植生の分布状況や活性度を示す指標として、正規化差植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)、葉面積指数 (Leaf Area Index: LAI) などを用いた評価を行った。

[結果と考察]

- (1) 大和川本流および支川における高頻度栄養塩濃度変化：大和川本流下流部の堺、奈良市を經由する支川の佐保川および秋篠川の 3 地点における約 1 週間間隔での栄養塩濃度の変化から、全体的に本流の下流部で最も高濃度を、支川の佐保川で最も低濃度を示す傾向が確認できた。一方で、支川の秋篠川では $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が比較的高く、本流下流部では濃度の変動幅が比較的大きい ($\text{NO}_3\text{-N}$ については 1.5~4.5mg/L) ことも明らかになった。今回観測された従来の月 1 回頻度の測定では捉えられない濃度の変動は、栄養塩流出量の推定精度向上に寄与するものと考えられる。
- (2) 河川中の懸濁態栄養塩の起源：河床堆積物および河川近傍の表層土壌中の有機物の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 、窒素含有量、および C/N 比の結果から、河床堆積物の一部は洪水時に河川へ流入した表層土壌に由来していると考えられるが、その大部分が土壌試料よりも高い $\delta^{15}\text{N}$ を示したことから、河川へ流入する下水処理排水の影響を強く受けていることが明らかになった。
- (3) 長期栄養塩流入量の変遷：大阪湾への長期栄養塩流入量の解析期間として、窒素流出量に大きな影響を及ぼす下水道の整備状況を考慮し、大阪府および奈良県における下水道普及率の変遷などを基に次の 4 つの期間(①未整備期間:1960~1974 年、②整備初期:1975~1984 年、③整備中期:1985~2008 年、④整備後期:2009~2016 年)に分けて SWAT を用いた窒素流出量の推定を実施し、4 種類の信頼性指標に基づき比較的精度良く推定ができていることを確認した。図-2 に堺観測所における窒素濃度および窒素流出量の推定結果の長期変遷を示す。この結果から、窒素流出量は濃度の変化に概ね対応しており、1965~1975 年あたりをピークにそれ以降は減少傾向を示すことが明らかになった。これは、既存の発生負荷量の推定結果¹⁾とは異

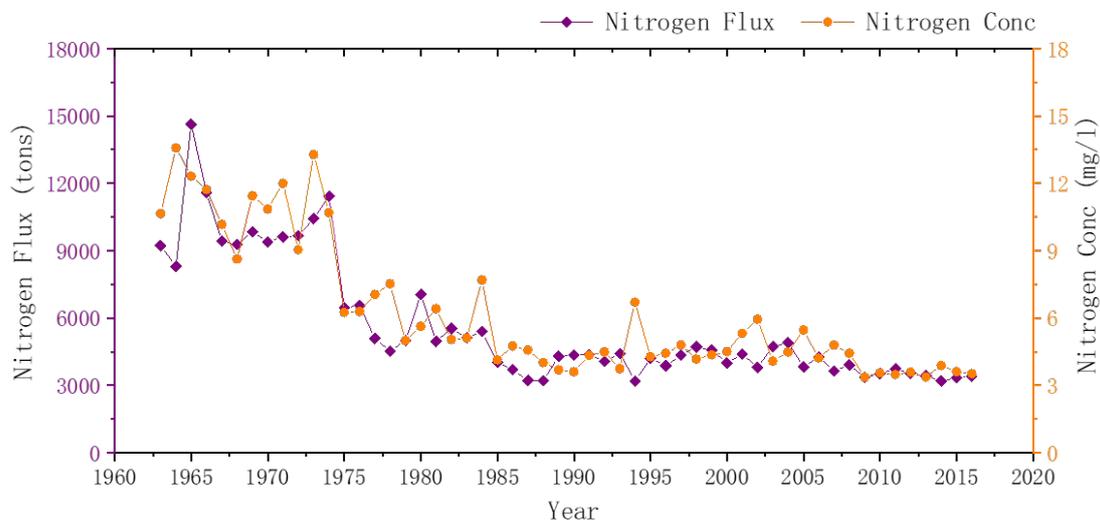


図-2 堺観測所における窒素濃度および窒素流出量の推定結果の長期経年変化

なる傾向であり、本研究において、大阪湾への過去 50 年間を超える長期での窒素流入量変化を再現できた意義は大きいと考えられる。また、トータル窒素流出量（図-2）と同様に、点源以外からの流出量（下水道処理区以外において農地などから排出される窒素量：面源由来など）は減少しているが、対照的に点源由来（下水道処理区において処理排水として排出される窒素量）の流出量は増加傾向にあり、最近ではトータル窒素流出量の約 6 割を占めていることが明らかになった（表-1）。この結果から、流域内の下水道整備により窒素の流出形態が面源から点源にシフトしてきたことが分かる。さらに、一人当たりの年間窒素排出量を推定した結果減少傾向にあることが明らかとなった。流域人口は増加傾向にあることを考えれば、流域下水道の整備は、トータル窒素流出量の低減には大きく貢献してきたといえる。

表-1 窒素流出量とその形態の内訳および一人当たりの年間窒素排出量の変遷

	Total non-point source (Tons/yr)	Total point source (Tons/yr)	Total point source ratio (%)	Total Non-point & point sources (Tons/yr)	Total N discharge of each person (kg/yr)
1960-1974	10230	0	0	10230	8.56
1975-1984	5141	427	8	5568	3.04
1985-2008	2932	1570	35	4502	2.04
2009-2016	1314	2123	62	3437	1.56

- (4) 森林の成長が水文流出過程に及ぼす影響：大和川流域の主要な土地利用である森林にも着目し、3 つの森林流域を対象に、従来の長期流出モデル解析では考慮されてこなかった森林の成長にともなう蒸発散や浸透特性の変化を最近約 40 年間について推定した。その結果、SWAT における森林上層部（林冠）のモデルパラメータ値が増加し、森林の成長を反映していることが明らかになった。また、森林流域における蒸発散量は森林の成長にともない長期的な増加傾向を示し、特に夏季においてその傾向が顕著に確認された。
- (5) 日単位および時間単位での流出量推定：洪水時を含めた大和川から大阪湾への栄養塩流入量を高精度で評価することを念頭に置き、大規模な降雨イベントが発生した 2014 年 8 月、2016 年 9 月、および 2018 年 7 月を対象に SWAT を用いて従来の日単位に加えて時間単位での流出解析を実施した。その結果、4 種類の信頼性指標に基づき比較的精度良く推定ができていることを確認し、そのうえで実測データが整備されていない 2018 年 7 月の流出量変化を時間単位で推定することに成功した。今後は、懸濁物質および栄養塩を含めた流出量の評価を実施することが課題である。

引用文献

- 1) 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, 741, VII-28, 69-87.
- 2) 中谷祐介・川住亮太・西田修三 (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) 王 崑陽・齋藤光代・小野寺真一・岩田 徹 (2019) SWAT モデルによる都市化流域での地下水涵養量の長期的な変動評価—森林の成長及び都市化段階を考慮した大和川流域での例—. Kansai Geo-Symposium 2019 論文集.
- 4) SWAT (Soil & Water Assessment tool) (<https://swat.tamu.edu/>) (2020.2.26 閲覧)
- 5) Moriasi, D., Arnold, J. G., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., Veith, T. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50, 3, 885–900.