

大阪湾岸流域における下水道由来栄養塩負荷の影響評価（その3） —地下水流入および洪水時フラッシングを考慮した時空間変化の解析—

代表者：小野寺真一（広島大学大学院総合科学研科・教授）

共同研究者：齋藤光代（岡山大学）・清水裕太（農業・食品産業技術総合研究機構 西日本農業研究センター）・谷口正伸（和歌山大学）

【研究目的】

本研究では、大阪湾に対する下水道由来の栄養塩負荷の影響評価を目的とする。代表者らによるこれまでの結果¹⁾から、①下水処理場からの直接的な流入負荷に加えて②堆積物からの二次的な栄養塩負荷（再生産）の存在が確認されてきたが、定量化は不十分であった。具体的には①と②の影響は分離できておらず、②については拡散のみを考慮した負荷量は小さく、現場の状況を十分に説明できていなかった。そこで、最終年度である本年度は、(1)大阪湾岸の下水処理場から沖合（図1）を対象に洪水時を含む現地観測を実施し、水中および堆積物中の栄養塩、安定同位体比の空間分布から下水道由来の負荷の影響を評価し、(2)拡散に加えて潮位変化にともなう移流現象（タイダル・ポンピング、海底地下水湧出）を考慮した堆積物からの栄養塩負荷の推定を行い、(3)以上の結果をもとに栄養塩収支解析を行い、二種類の負荷（①・②）の定量的な評価を試みた。また、(4)下水道管の老朽化にともなう周辺地下水とのインタラクション^{2),3)}について、水文流出モデルによる評価を実施した。

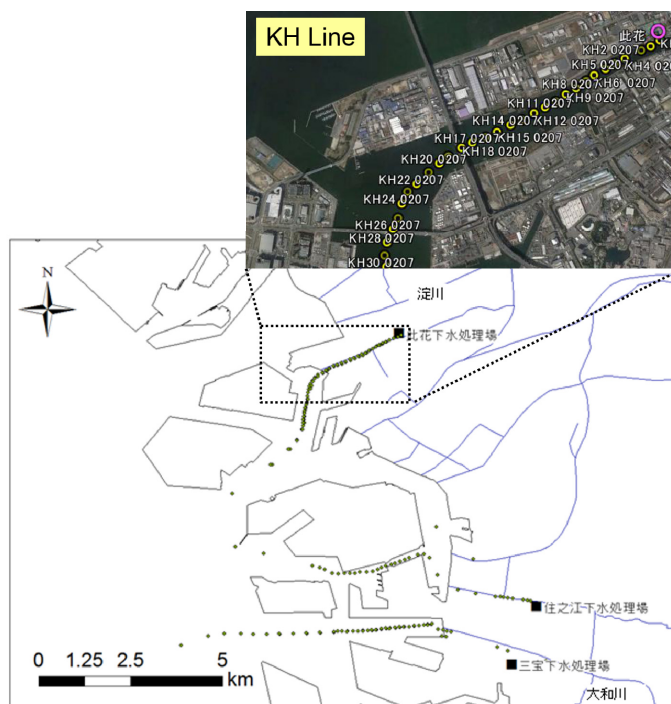


図1 現地調査対象地域

洪水時を含む現地観測を実施し、水中および堆積物中の栄養塩、安定同位体比の空間分布から下水道由来の負荷の影響を評価し、(2)拡散に加えて潮位変化にともなう移流現象（タイダル・ポンピング、海底地下水湧出）を考慮した堆積物からの栄養塩負荷の推定を行い、(3)以上の結果をもとに栄養塩収支解析を行い、二種類の負荷（①・②）の定量的な評価を試みた。また、(4)下水道管の老朽化にともなう周辺地下水とのインタラクション^{2),3)}について、水文流出モデルによる評価を実施した。

【研究方法】

1. 現地調査および試料分析

大阪湾沿岸に位置する三か所の処理場のうち、特に此花下水処理場を対象により詳細な観測を実施した（図1）。処理場の処理排水放流口を起点として、沖側に向かう約2.5kmの側線（此花処理場ライン：KH Line）を設定し、2016年7月9日、8月30日および9月17～19日の期間で現地観測を行った。このうち、7月および8月は観測日とその前日に大規模の降雨（それぞれ合計30mm、148mm）があり、9月は観測期間中（18日～19日）に25mmの降雨があった。その中でも、8月の観測直前の降雨（日雨量145mm）は、2016年の日雨量では最大であった。また、7月および8月の観測日は中潮で、観測は下げ潮時に実施した。9月は大潮から中潮への移行期であり、観測

は下げ潮と上げ潮（午前および午後）時にそれぞれ実施した。現地では、処理場の処理排水放流口を起点とし、数百 m 間隔で CTD センサーによる海水の水温および電気伝導度の鉛直分布を測定するとともに、海水試料の採取を行った。なお、9 月の観測時は、表層に加えて底層の海水および海底堆積物も数地点で採取した。

海水試料はメンブレンフィルターおよびガラスフィルターで濾過後に栄養塩（窒素、リン、珪素）濃度、酸素・水素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O} \cdot \delta\text{D}$ ）、懸濁態有機炭素（POC）および窒素（PON）量および窒素・炭素安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N} \cdot \delta^{13}\text{C}$ ）の定量分析を行った。堆積物試料については、まず遠心分離機を用いて間隙水を採取し、栄養塩濃度の定量分析を行い、堆積物の窒素・炭素量および $\delta^{15}\text{N} \cdot \delta^{13}\text{C}$ の測定も実施した。

2. 堆積物由来の栄養塩負荷量評価

堆積物からの栄養塩負荷について、一次元のタイダル・ポンピングの影響がある場合（TP）と無い場合（拡散のみ：N-TP）とを再現し、その変化を確認した。まず、海底堆積物試料を用いたカラム実験を実施し、タイダル・ポンピング（TP）の再現については、堆積物試料の上部に対象地域の潮位変化（約 200cm）を想定した水圧変化を与え、潮汐にともなう堆積物への海水の出入りを再現した。N-TP と TP の双方について、堆積物直上水の栄養塩濃度変化を 30 日間モニターし、それらの結果から拡散およびタイダル・ポンピングによる栄養塩負荷量を推定した。

また、上記の実験結果を検証するため、一次元の水分、熱、溶質移動を数値計算する Hydrus-1D によるシミュレーションを実施した。TP の再現にあたっては、カラム実験と同様に水圧変化を与えた。それらのシミュレーションを 20 日間継続し、その間の海水栄養塩濃度の変化からフラックスを推定した。

3. 栄養塩収支解析

下水処理場放流水および堆積物からの栄養塩負荷の影響について、KH Line（図 1）を対象に現地観測結果に基づく収支計算を行った。晴天時は河川からの流入がほぼ無く、処理区の下水の全てが此花下水処理場へ流入していることから、処理場から排出される処理水を陸側からの入力条件とした。また、大阪湾と接する海側との境界を正蓮寺川水門から直線距離で約 2km 西側に設定し、最干潮時と最満潮時の水深をそれぞれ 5.5m、7m とし、解析領域の幅（南北方向）を 200m と仮定し、潮位変化を考慮した水収支、塩分収支および栄養塩収支を推定した。

4. 下水道－地下水インタラクションの解析

流域内の土地利用 や土壌、勾配などの不均一性を考慮できる Soil and Water Assessment Tool (SWAT) モデルを用い、大阪湾沿岸における下水道と地下水とのインタラクションについて解析を実施した⁴⁾。まず、大阪市域における地下水涵養量を求めるため、淀川および大和川の下流域を対象に SWAT を構築し、1996 年～2016 年を計算期間とし、そのうち 1996～1998 年をウォームアップ期間、1999～2001 年をキャリブレーション期間、そして 2002～2003 年をバリデーション期間とした。

【結果と考察】

(1) 洪水時を含む下水道

由来の栄養塩負荷の影響

：2016年8月における洪水直後の観測結果から、水深約4m付近に明瞭な塩分躍層が形成され（図2）、海水の顕著な酸素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）の低下に加え、表層海水の栄養塩

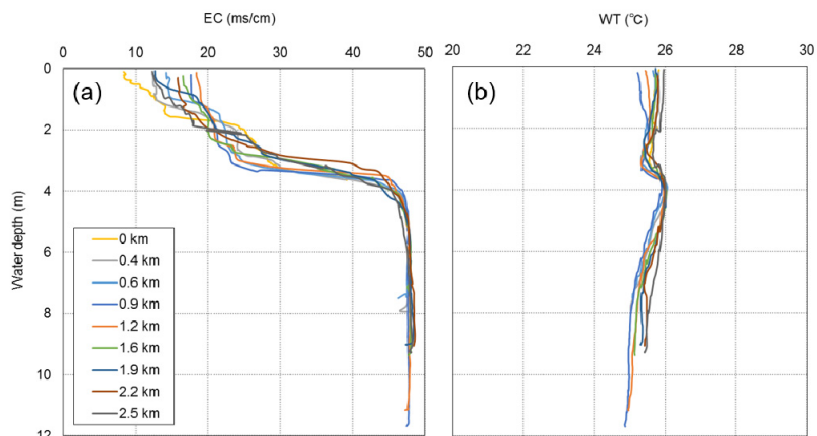


図2 洪水直後の海水の EC (a) と水温 (b) の鉛直分布

濃度が排水流入点から沖側約2.5kmまで上昇していることが確認された。平水時における処理排水の影響範囲は約1kmであり、洪水時にはその範囲が2倍以上に拡大したことになる。また、上げ潮時と下げ潮時の観測結果から、全体的に表層の栄養塩濃度は下げ潮時よりも上げ潮時において高く（図3a, c）、対照的に底層は下げ潮時に高くなる（図3b, d）傾向を示した。上げ潮時の観測は最干潮の直後であったため、処理排水の影響が強く表層で栄養塩濃度が高かったと考えられる。一方で、底層の栄養塩濃度が下げ潮時に上昇した原因として、それ以前の上げ潮時に一旦堆積物へ侵入した海水が潮位の低下にともない流出すること（移流過程）による栄養塩負荷が生じていると考えられる。

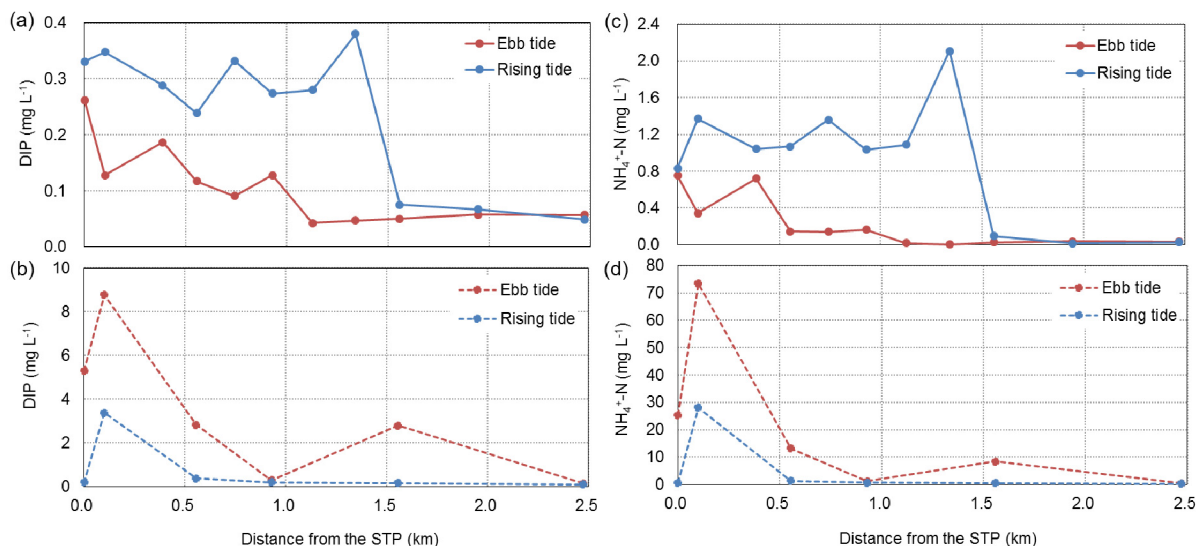


図3 表層 (a, c) と底層 (b, d) 海水の下げ潮および上げ潮時の DIP と $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の変化

(2) 移流現象を考慮した堆積物からの栄養塩負荷の推定

：堆積物からの栄養塩負荷について、拡散のみでなく一次元の移流過程（タイダル・ポンピング）による影響を評価するため、現地の堆積物試料を用いた室内カラム実験および一次元の溶質輸送モデルによるシミュレーションを行った結果、全ての種類の栄養塩について、拡散のみの場合と比較して、水圧変化によるタイダル・ポンピングの影響を仮定した実験のほうが時間とともに濃度が明瞭に上昇する傾向を確認できた（図4）。その結果

をもとに日単位の栄養塩負荷量を推定した結果、DIP についてはタイダル・ポンピングの影響により負荷量が拡散のみの場合の約 6 倍に、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は約 3 倍に増加した。

(3) 栄養塩収支の検討：現地での観測結果にもとづき対象領域の栄養塩収支を検討した結果、処理排水の流入量および移流によって海底堆積物を出入りする水の量は、対象領域と沖合との水の交換量の 1 割未満であるのに対し、堆積物から供給される溶存態の栄養塩量は、少なくとも処理排水由来の供給量の数倍以上に及ぶと推定された。また、この収支計算にもとづく供給量は、室内カラム実験および一次元のシミュレーション計算（一次元のタイダル・ポンピング）による推定よりも大きな値であった。この結果から、現地で生じている移流過程にともなう栄養塩負荷は、室内実験およびシミュレーションで仮定した一次元の現象だけではなく、観測結果から想定されるような陸域隣接部での海底湧水（海水の再循環）によっても生じていることが示唆される。

(4) 下水道と周辺地下水とのインタラクション：平均地下水面標高をもとに SWAT モデルによる下水-地下水交流可能域の推定を行った結果⁴⁾、淀川沿いおよび大阪湾臨海部では下水道管への地下水の侵入が、対照的に上町台地周辺部およびそれ以東では地下水への下水の漏水が生じている可能性が示された（図 5）。

引用文献および成果論文

- 1) Onodera, S. et al., Nutrient transport and surface water-groundwater interactions in the tidal zone of the Yamato River, Japan. IAHS Publication, 361, 204-211, 2013.
- 2) 齋藤光代・小野寺真一・他 5 名, 大阪湾沿岸地下水と下水道の相互作用について—栄養塩類からみて—. Kansai Geo-Symposium 2015 論文集, 2015.
- 3) 小野寺真一・齋藤光代・清水裕太, 沿岸巨大都市における地下水水質汚染の傾向について. Kansai Geo-Symposium 2016 論文集, 2016.
- 4) 清水裕太・小野寺真一・齋藤光代・谷口正伸・友澤裕介, 大阪平野の浅層地下水環境に及ぼす地下水涵養と下水道の影響. Kansai Geo-Symposium 2016 論文集, 2016.
- 5) 小野寺真一・清水裕太・齋藤光代・他 1 名, 大阪平野における浅層地下水-下水道交流量の推定. Kansai Geo-Symposium 2017 論文集, 2017.
- 6) 友澤裕介・小野寺真一・齋藤光代・他 1 名, 大阪沿岸地下水における水素・酸素安定同位体比と塩化物イオン濃度の分布特性. Kansai Geo-Symposium 2017 論文集, 2017.
- 7) Saito, M., Onodera, S., Jin, G., Shimizu, Y., 他 1 名, Nitrogen dynamics in a highly urbanized coastal area of western Japan: impact of sewage-derived loads. Progress in Earth and Planetary Science, 5:17, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0177-6>, 2018.

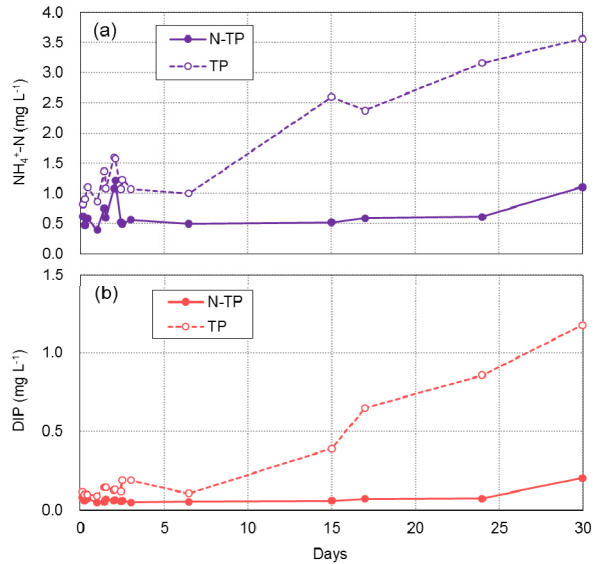


図 4 拡散のみ (N-TP) とタイダル・ポンピング (TP) の影響を再現した場合の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a) および DIP (b) の濃度変化

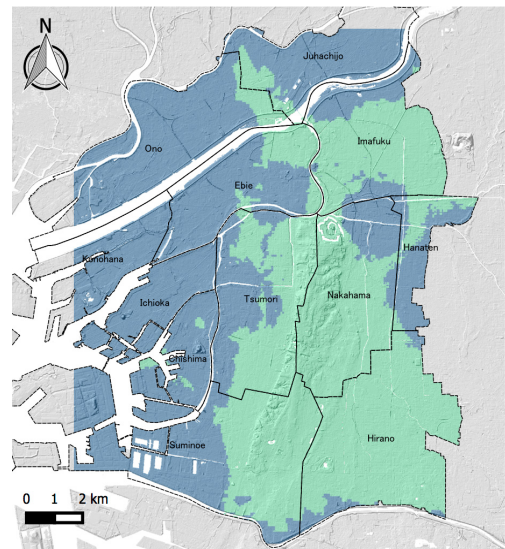


図 5 推定された下水-地下水交流可能域 (青：地下水侵入、緑：下水漏水)