淀川下流域における 人工循環系によるケイ素輸送

DISSOLVED SILICATE TRANSPORT IN ARTIFICIAL SYSTEM IN LOWER YODO RIVER BASIN

西田修三¹・井ノ阪典子²・次田幸平³・中谷祐介⁴

Shuzo NISHIDA, Noriko INOSAKA, Kohei TSUGITA and Yusuke NAKATANI

¹正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 修(工) 元 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³学生会員 学(工) 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴正会員 博(工) 大阪大学大学院助教 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Dissolved silicate is an essential material for growth of diatom, and a decrease in the dissolved silicate supplied from the basin constitutes one of serious environmental problems. We measured dissolved silicate concentration in waterworks and sewerage, groundwater pumped up, and evaluated the water balance and nutrients transport. It was found that the dissolved silicate fluxes are hardly changing in water and sewage plants, and that artificial system in the Yodo River basin is a great source of dissolved silicate in the basin.

Key Words : *Yodo River, Dissolved Silicate, waterworks and sewerage, groundwater*

1. はじめに

急激な人口増加や産業の発達には、流域や沿岸海域の水環境に深刻な影響を及ぼし、その劣化した水環境の再生に向けて、下水道システムの整備や総量規制等の負荷削減施策が実施されてきた。これまで、有機汚濁や富栄養化の指標となるCODや窒素・リンについて、その動態も含め実態解明に向けた様々な研究が行われてきた。そして近年では、沿岸域の健全な物質循環と生態系保全という観点から溶存態ケイ素($\text{SiO}_2\text{-Si}$, 以下ケイ素と言う)も注目されている¹⁾。ケイ素は海洋生態系の一次生産において重要な役割を果たす物質であるが、近年、流域からのケイ素供給量が減少していることが世界各地で報告され、問題となっている^{2),3)}。

ケイ素は地殻中に存在する元素であり、岩石や土壌、粘土として存在するケイ酸塩鉱物に、河川水や雨水が接触することで溶出し、河川水や地下水に供給される。海域へのケイ素供給量の減少要因は、ダム貯水池等の建設により停滞水域が増加し、さらに富栄養化により発生した珪藻類による溶存態ケイ素の取り込みによる^{2),4)}。取り込まれたケイ素は生態系ケイ素となって水中に存在し、

有機懸濁態となり沈降・堆積し分解されるが、水中への回帰は窒素・リンに比して起こりにくい。陸域からのケイ素供給量が減少した海域では、ケイ素を必要とする珪藻類の増殖が抑えられ、ケイ素を必要としない渦鞭毛藻類などの非珪藻類が優位になるとの報告もされており、高次の生態系への影響も懸念されている⁵⁾。健全な生態系の構築には、窒素・リン・ケイ素の適正な濃度バランスを考慮した栄養塩管理が重要と考えられる。

また、淀川下流域のように都市部を抱える流域では、地下水揚水を含めた上下水道システムによる水輸送がケイ素を含む栄養塩輸送に大きな影響を及ぼしている。つまり自然の循環系だけではなく、上下水道システム等による水循環系の変化や水利用にともなう人為的なケイ素供給も、河川流域や沿岸海域のケイ素濃度の決定に大きく作用している⁶⁾。しかし、地下水揚水や上下水道システム等の人工循環系に着目したケイ素の輸送や動態に関する研究は少なく、有用な観測データも少ないのが現状である。

そこで本研究では、これまで水質調査を継続して実施してきた淀川下流域を対象に、河川、上下水道施設、井戸の水収支とケイ素輸送に関する現地調査を実施し、人工循環系が発達した都市域におけるケイ素輸送の実態を

図-1 調査対象域

明らかにし、人工循環系がケイ素輸送に及ぼす影響を評価した。

2. 調査概要

(1) 調査対象域

対象領域は、図-1に示す淀川下流域とし、淀川本川と上流三川（桂川、宇治川、木津川）、および流域内に存在する浄水場と下水処理場、井戸を対象に調査解析を行った。

淀川流域に含まれる京都府と大阪府の水道普及率は、それぞれ99.6%、100%、また下水道普及率も91.7%、93.8%と高く、上下水道システムの整備が進んだ都市域となっている。地下水の利用状況として、大阪府の揚水量の経年変化を図-2に示す。揚水量は年々減少し、特に1965年から1980年にかけて、揚水規制による工業用井戸の廃止が相次いだため、工業用の揚水量が激減している。なお、2008年以降の揚水量の増加は、集計井戸数が増えたために生じたもので、実質的な増加ではない。

(2) 調査方法

ケイ素濃度を把握するため、資料調査と現地調査を行った。河川水については、淀川本川（枚方大橋）、上流三川（宮前橋、宇治御幸橋、木津御幸橋）において2009年4月から2011年4月まで採水調査を実施し、上水道については、水道統計（資料編）⁸⁾のデータに加えて、2010年3月に京都府17ヶ所と大阪府5ヶ所の計22ヶ所の浄水場から原水と浄水の提供を受け分析を行った。また淀川を水源とする大阪市営及び大阪府営の浄水場から供給される水道水を、2011年4月から2012年6月まで、ほぼ毎

図-2 地下水揚水量の経年変化⁷⁾

日蛇口採水し分析を行った。下水道については、2011年11月から2012年1月まで、対象領域内に位置する京都府7ヶ所と大阪府20ヶ所の計27ヶ所の下水処理場において流入水と放流水を、また、合併浄化槽についても2012年12月に水道水と放流水を採水し分析を行った。地下水に関しては、揚水量が多い市町村の井戸を中心に48ヶ所121本の井戸の採水を2011年3月、2012年11月から2013年2月の期間に実施した。河川水と主要な流域下水処理場の放流水について月1回平水時に観測を実施し、また、その他必要に応じて適宜採水し水質分析を行った。

採水した試料は、現地にて水温、pH、電気伝導度を測定した後、冷暗条件下で実験室へ持ち帰り、水質分析を行った。分析項目は溶存態成分の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ とした。水質分析には保留粒子径 $0.6\mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙でろ過処理したのち、オートアナライザーAACSV（BLTEC社）を使用し栄養塩分析を行った。なお、ガラス繊維ろ紙によるケイ素濃度への影響は認められなかった。

3. 調査結果

(1) 河川調査

上流三川と淀川本川の平水時の観測結果を図-3に示す。上流三川の観測期間の平均ケイ素濃度は、木津川 6.4mg/L 、宇治川 1.4mg/L 、桂川 4.0mg/L 、合流後の淀川の濃度は 2.6mg/L を示し、比較的低い値であった。これは、合流三川の流量比（木津川12.6%、桂川16.4%、宇治川71.0%）に依存し、宇治川の影響を顕著に受けているためである。

宇治川・淀川のケイ素濃度は、夏から秋にかけて増加し、11月、12月頃が最も濃度が高く、1月から3月で最も低くなっている。これは、停滞水域である琵琶湖で、春季の珪藻ブルームによりケイ素が湖内にトラップされ濃度が低下したためと考えられる。

図-3 河川水のケイ素濃度変化

(2) 上水調査

前述のように、上水道のケイ素濃度については、水道統計のデータの解析に加え22ヶ所の浄水場にて採取した試料の分析を行った。今回対象とした浄水場では、原水として深井戸水・浅井戸水・表流水、およびそれらの混合水が利用されている。図-4は水道統計を基に、原水別にケイ素濃度の経年変化をまとめたものである。なお、年間分析回数は浄水場によって異なり、分析回数が1回の場合は観測値を平均値として図示している。原水が河川水、地下水のいずれの場合も明確な経年変化は見られない。河川水のケイ素濃度は、停滞水域における珪藻類によるトラップや河川流量の増加による希釈効果等により季節変動はするが、年平均値への影響は小さいことがわかった。

次に水道統計のデータと現地調査の結果を基に、浄水処理によるケイ素濃度変化について評価する。原水と処理後の浄水の水質を比較した結果、一部の浄水場でケイ素濃度の増減がみられた。データの入手が可能であった40ヶ所のうち、濃度が減少していた浄水場は6ヶ所、また、増加していたのは2ヶ所であった。それらの代表例を図-5に示す。これらの各浄水場では、自己水源から取水した原水を浄水処理した後、水量確保のため府営水や他の浄水場より受水し、混合して給水しているため、処理前後でこのような濃度変化が起こったことがわかった。実際、濃度が減少している浄水場ではケイ素濃度の低い府営水道などから受水し、濃度が増加している浄水場では、受水先がケイ素濃度の高い浄水場であった。

現地調査で得られた京都・大阪の各浄水場における浄水処理によるケイ素濃度の変化を図-6に示す。上述の、混合して給水している浄水場（P2, P4①, P4②, P16, P18, P25）を除いて、原水と浄水のケイ素濃度の値にほとんど差異はなかった。このことから、浄水のブレンドによる濃度変化はあるものの、浄水処理過程ではケイ素はほとんど除去されないことが明らかになった。なお、高濃度のケイ素を含む原水を利用する浄水場では、その低減処理を施す場合もあるが、本研究の対象領域ではそのような浄水処理はなされていなかった。

図-7に水道水のケイ素濃度の日変動を示す。これは2011年4月15日から2012年6月30日までのほぼ毎日、吹田

図-4 浄水の水源別のケイ素濃度変化

図-5 浄水処理によるケイ素濃度変化

図-6 浄水処理によるケイ素濃度変化 (現地調査結果)

図-7 水道水のケイ素濃度変化

図-8 下水処理によるケイ素濃度変化

市および大阪市の浄水場から供給された水道水のケイ素濃度を分析した結果である。調査対象とした浄水場2ヶ所は、取水位置は異なるもののともに淀川表流水を水源としているため、ほぼ同じ濃度変動を示している。また、水道水のケイ素濃度が淀川のケイ素濃度と同様の季節変動を示すことから、水源である淀川の影響を直接受けていることが推察される。

(3) 下水調査

図-8に各下水処理場における流入水と処理後の放流水のケイ素の分析結果を示す。処理系統が複数ある場合は、系統別に図示している。試料は各処理場において流入水・放流水のスポット採水を実施し、持ち帰って分析を行った。下水処理によるケイ素濃度の変化はほとんどみられないことから、下水処理場においてもケイ素の除去、付加が生じないことがわかる。

各処理場における流入水のケイ素濃度は処理場ごとに大きく異なっており、(b)京都府のうち、S22、S23の処理場では他に比べ2倍近く高い値を示していた。このように処理場によって流入水の濃度が異なっているのは、水利用による負荷量の差異に加え、その区域に給水して

図-9 合併浄化槽処理によるケイ素濃度変化

図-10 地下水のケイ素濃度

いる浄水場の原水の影響を顕著に受けているためと考えられる。河川水や湖沼水を原水としている地域の下水に比べ、地下水を原水に利用している地域の下水はケイ素濃度が高く、上述のS22、S23も地下水を原水とした区域であった。また、(a)大阪府の中の大阪市においては、浄水の平均ケイ素濃度が2.42mg/Lだったのに対し、下水処理場の流入水の平均濃度が6.47mg/Lと大幅に増加していた。これは後述のように、水利用によるケイ素の付加とともに、下水の処理場への輸送過程において、下水管に地下水等（不明水）が侵入することも大きな要因と考えられる。

(4) 合併浄化槽調査

ケイ素の生活原単位を求めるために、5ヶ所の合併浄化槽（T1～T5）にて調査を行った。前述のように、下水処理によるケイ素は除去・付加は生じないものと考えられる。処理方法がほとんど変わらない合併浄化槽の水処理によってもケイ素の除去・付加されないものと考えられる。図-9は、給水された水道水と浄化槽で処理された排水のケイ素濃度の変化を示している。生活負荷により平均で1.12mg/L濃度が増加していた。平均的な家庭水使用量250L/日・人を用いれば、ケイ素の生活負荷発生原単位は、280mg/日・人と算定されるが、各浄化槽1回の試料分析結果のため、さらなるデータの蓄積が必要と考えられる。名古屋地区を対象に行われた既往の研究¹⁾では、水道水のSiO₂濃度（10.7mg/L）と下水処理水のSiO₂濃度（17.3mg/L）の差6.6mg/Lを生活排水起源のケイ素付加として報告している。この濃度の増加は、ケイ素濃度SiO₂-Siに換算すると約3.1mg/Lとなる。本研究の調査結果を基に、同様に対象域の水道水と下水処理水のケイ素

図-11 人工循環系における水・ケイ素フロー

濃度より生活排水のケイ素付加を算定したところ、ケイ素濃度の増加量は 2.5 mg/L と得られた。合併浄化槽の調査結果に比べて大きな値を示しており、ケイ素の生活負荷原単位の算定には、今後さらなる検討が必要と考えられる。

(5) 地下水調査

上水を利用せずに、各事業所で地下水を揚水し利用している事業所もある。浄水場を経ない地下水によるケイ素輸送の実態を明らかにするため、大阪府における浄水場以外で地下水を揚水している事業所を対象に調査を行った。その結果を図-10に示す。河川水に比して高濃度を示し、 40 mg/L を超えるところもあった。地下水中のケイ素濃度は帯水層の深度と弱い相関を示したが、地質等の影響も顕著に受け、高濃度地域の明瞭な分布特性は見いだせなかった。

4. ケイ素輸送量の算定

(1) 水収支

水収支の算定・評価には年間水収支法¹⁰⁾を用い、対象領域の人工循環系のフローの実態を明らかにした。水循環は自然循環系と人工循環系から成り立ち、人工循環系のフローは図-11のように表される。本研究では、晴天時の人工循環系の水収支の算定を行う。各要素の計算方法を以下に示す。

①給水量＝浄水量＋受水量

浄水量は各浄水場で河川水もしくは地下水を取水した自己取水量。

②有収水量＝給水量－無効水量

有収水量とは実質的に各家庭へ給水された水量で、給水量から漏水等により利用されなかった水量（無効水量）を引いた水量。

③下水量＝有収水量×下水道普及率（＋工業用水量）

下水量は下水処理場へ排出される汚水量であるが、有

収水量に下水道普及率を乗じたものを下水量とした。水量には浄化槽を通して排水される水などは含まれない。計算では工業用水量も考慮した。

④処理量＝晴天時日平均下水量

処理量は実際に下水処理場で処理される水量で晴天時日平均下水量を用いた。

⑤不明水＝処理量－排出汚水量

本来ならば排出汚水量と処理量は一致するはずであるが、様々な要因により誤差が発生している。その誤差水量を不明水という。不明水は有収外下水、水道漏水分が侵入する上水系侵入水、雨水侵入水、常時侵入水（地下水侵入水、海水侵入水などほぼ定常的に侵入するもの）、管外漏出水で構成されている。しかし不明水の実態を把握することは難しく、詳細は不明である。

統計資料⁸⁾⁹⁾による計算の結果、対象領域の一日当たりの下水量が $2.36 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、下水処理場の一日当たりの処理量が $2.97 \times 10^6 \text{ m}^3$ と算定され、不明水量は $0.63 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり晴天時下水処理量の21.0%を占めていた。通常、污水处理計画の立案において、生活污水量、営業汚水量、工場排出量に加えて、不明水量も算定され、最大計画汚水量の10～20%と見積もる場合が多い。また、下水道統計の計画調査に記載されている、計画地下水量max(%)の値も10～30%を示しており、今回算定された不明水量は概ね妥当な値と考えられる。

(2) ケイ素輸送

算出された水収支と、水道水質データベース等の統計資料や本研究で得られたケイ素濃度を用いて、ケイ素輸送量の算定を行った。前述のように、浄水処理や下水処理を経てもケイ素はほとんど除去されないことから、浄水場や下水処理場を通過してもケイ素フラックスは保存されるとした。また、家庭や事業所でのケイ素発生負荷量は生活系と産業系に分けて算定した。生活系負荷量は第3章(4)で算出した濃度増加量 1.12 mg/L に有収水量を乗じて算出し、産業系負荷量は、熊谷ら¹⁰⁾による実態調査で報告された業種別のケイ素付加量に各事業所の排水

量を乗じることで算出した。各事業所の排水量の算出方法については中谷ら¹¹⁾を参照されたい。また、不明水のケイ素濃度が未確定のため、家庭・事業所から下水処理場に輸送されるケイ素量と処理場から放流されるケイ素量の差を不明水によるケイ素輸送量とした。

算定結果を図-11に示す。河川水取水によって7.49ton/day、地下水揚水によって3.04ton/dayのケイ素が人工循環系に取り込まれ、漏水によって0.35ton/dayのケイ素が流出する。その後、家庭や事業所に供給され、水利用によって家庭から2.76ton/dayの負荷が発生し、事業所では0.04ton/dayのケイ素が除去されている。そして、下水処理場に家庭や事業所から11.6ton/day、不明水によって7.21ton/dayのケイ素が輸送されている。不明水の濃度は11.5mg/Lとなり、図-10より約20m以浅の地下水濃度に近い値を示していた。そして、最終的に淀川下流域全体で人工循環系から河川に19.9ton/dayのケイ素が放流されていることがわかった。なお、第3章で述べたように、現段階では生活負荷発生原単位の算定精度は低く、上記計算で得られた生活系負荷量や不明水負荷量は大きな誤差を有するものと考えられる。そのため、図中では算定された値に()を付して記した。

(3) 人工循環系の影響

人工循環系から河川に放流されるケイ素のうち、域内で付加されるケイ素は12.7ton/dayであり、それによって浄水原水としての河川水濃度2.9mg/Lが、下水処理場からの域外放流時には6.6mg/Lまで上昇している。高濃度の水が河川に放流されていることから、水域へのケイ素供給に人工循環系が大きな影響を及ぼしていることが推察される。また、域内で新たに付加されるケイ素のうち約87%が地下水起源となっており、人工循環系における水域へのケイ素供給において地下水の寄与が非常に大きいことが明らかとなった。人工循環系における窒素やリンなどの栄養塩の域内発生負荷は生活排水や事業所排水に起因するものがほとんどであるが、ケイ素輸送についてはこの傾向と異なることがわかった。

人工循環系における地下水揚水は現在、 $0.14 \times 10^6 \text{m}^3/\text{day}$ であるが、揚水規制が行われる前は多量の地下水揚水が行われていた。1963年の揚水量は2009年の総揚水量の約3.3倍であった。ここで、2009年の地下水揚水によるケイ素輸送量を用いて1963年における地下水揚水によるケイ素輸送量を推定してみると、36.5ton/dayとなった。この結果から、1963年当時の人工循環系からのケイ素供給において、今以上に地下水の影響が大きかったものと考察される。揚水規制によって、地下水による人工循環系へのケイ素輸送量は減少したが、現在、地下水の有効利用が求められており、環境用水としての利用とともに、今後もケイ素等の物質輸送においても重要な供給源となると考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- ①上流に位置する琵琶湖におけるケイ素トラップの影響により、宇治川・淀川のケイ素濃度は季節変動を示した。
- ②浄水のケイ素濃度に経年変化は認められず、また、地下水濃度に季節変化はなく、濃度は安定していた。
- ③供給される水道水のケイ素濃度は、水源の水質に大きく依存し、地下水を原水とする水道水は高いケイ素濃度を示した。
- ④上下水道施設での水処理ではケイ素は除去・付加されず、ケイ素濃度がほぼ維持されることが分かった。
- ⑤浄水場から人工循環系に供給されるケイ素量は9.69ton/dayとなり、最終的に下水処理場から河川へ19.6ton/day放出されていた。濃度に換算すると、2.9mg/Lから6.6mg/Lと約2倍に増加し、水域へのケイ素供給において人工循環系の影響は大きいと言える。
- ⑥地下水揚水によるケイ素輸送量では1963年に比べ、現在およそ3分の1となっていることがわかった。地下水の有効利用が求められていることから、今後も水域へのケイ素供給の重要な供給源となるものと考えられる。

謝辞：関係機関の方々には試料のご提供など調査にご高配を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人河川環境管理財団：河川におけるケイ酸など無機溶存物質の流出機構に関する研究，2007。
- 2) 原島省：シリカ欠損：ケイ素循環への人為影響と海洋生態系の変質，地球環境，Vol.16，No.1，pp.61-70，2011。
- 3) 守谷将史，堀田哲夫，鶴田泰士：シリカ欠損仮説の周辺，土木学会水工学委員会環境水理部会研究集会，2008。
- 4) 児玉真史，田中勝久，澤田知希，都築基，山本有司，柳澤豊重：矢作川下流におけるDSi：DIN比の変動要因，水環境学会誌，Vol.29，No.2，pp.93-99，2006。
- 5) 角皆静男：植物プランクトン組成を決定する第1因子としての溶存ケイ素，北大水産彙報，30(4)，pp.314-322，1979。
- 6) 井上直哉，赤木右：多摩川におけるケイ素収支に与えるダム，下水処理場，地下水取水の影響，地球科学，40，pp.37-145，2006。
- 7) 大阪府：地下水採取量総括表，1963～2011。
- 8) (社)日本水道協会：水道水質データベース
- 9) (社)日本下水道協会：平成21年度下水道統計
- 10) 熊谷博史，田中義人，石橋融子，松尾宏：特定施設排水水中の溶存態ケイ素の実態調査，水環境学会誌，Vol.34，No.1，pp.11-17，2011。
- 11) 中谷祐介，川住亮太，西田修三：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），Vol.67，No.2，pp.1_886-1_890，2011。

(2014. 9. 30受付)