

# 下水処理水中に存在する直鎖アルキルベンゼンスルホン酸 (LAS) の生態リスク評価と微生物担体処理による除去

金子陽輔・小森行也・岡本誠一郎・南山瑞彦

## 1. はじめに

直鎖アルキルベンゼンスルホン酸（本稿ではその塩も含め「LAS」という。）は、洗濯や食器洗いに用いられる洗剤等に含まれ、広く家庭においても使用されている物質である<sup>1)</sup>。LASは、緑藻、珪藻、ミジンコ、メダカ、ニジマス、マダイ等の水生生物への影響が指摘され<sup>2)</sup>平成25年3月27日に水生生物の保全に係る環境基準の項目に追加された（表-1参照<sup>3)</sup>。水生生物の保全に係る環境基準は、生活環境を構成する有用な水生生物及びその餌生物並びにそれらの生息又は生育環境の保全を目的として設定されるものである<sup>4)</sup>。家庭で使用されたLASの多くは、下水道を経由し、公共用水域に到達することとなることから、下水道におけるLASの挙動の解明、対策技術の開発が必要である。

表-1 LASの水質環境基準<sup>3)</sup>

項目	水域	類型	水生生物の生息状況の適応性	基準値
直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩	河川及び湖沼	生物A	イワナ、サケマス等比較的低温域を好む水生生物及びこれらの餌生物が生息する水域	30 µg/L 以下
		生物特A	生物Aの水域のうち、生物Aの欄に掲げる水生生物の産卵場(繁殖場)又は幼稚仔の生育場として特に保全が必要な水域	20 µg/L 以下
		生物B	コイ、フナ等比較的高温域を好む水生生物及びこれらの餌生物が生息する水域	50 µg/L 以下
		生物特B	生物A又は生物Bの水域のうち、生物Bの欄に掲げる水生生物の産卵場(繁殖場)又は幼稚仔の生育場として特に保全が必要な水域	40 µg/L 以下
	海域	生物A	水生生物の生息する水域	10 µg/L 以下
		生物特A	生物Aの水域のうち、水生生物の産卵場(繁殖場)又は幼稚仔の生育場として特に保全が必要な水域	6 µg/L 以下

本稿では、化学物質排出移動量届出（PRTR：Pollutant Release and Transfer Register）制度の情報に基づき、下水処理水中のLASが放流先水生生物に及ぼす影響の可能性を評価した結果<sup>5)</sup>、種々の処理方式の実下水処理場におけるLASの除去実態に関する調査結果<sup>6)</sup>、微生物担体を用いた追加処理によるLASの除去の可能性（平成27年度の調査）について、研究成果を紹介する。

## 2. LASの環境リスク初期評価<sup>5)</sup>

下水処理水中のLASが放流先水生生物に及ぼす影響の可能性を、PRTR制度の情報（平成23年度のデータ）の推計値に基づき、「化学物質の環境リスク初期評価<sup>7)</sup>」などで用いられているハザード比（HQ：Hazard Quotient）を用いて評価した。環境中の生物への影響を対象とするHQは、水生生物が生息する水環境中の化学物質濃度を、有害性の評価値で割ることにより求められる。HQの値が1を上回る場合、水生生物へのリスクの懸念があると考えられることができる。ここでは、水生生物が無希釈の下水処理水に暴露される高リスクシナリオを想定し、式(1)に従い、推定下水処理水中濃度を予測無影響濃度で除することによりHQを算出した。ここで、推定下水処理水中濃度は、「平成23年度PRTR届出外排出量の推計方法等の概要<sup>8)</sup>」における『全国の下水処理施設から公共用水域への年間排出量の推計値』を『全国の年間処理水量』で除することで算出した。また、LASの水生生物に対する毒性情報として、水生生物の保全に係る水質環境基準の基準値、水産動物の被害防止に係る農薬登録保証基準の基準値、化学物質の環境リスク初期評価<sup>9)</sup>の無影響濃度等の最小値、初期リスク評価書<sup>10)</sup>の無影響濃度等の最小値を収集し、それらの最も低い値を予測無影響濃度としてリスク評価に採用した。

$$HQ = \frac{\text{推定下水処理水中濃度}[\mu\text{g/L}]}{\text{予測無影響濃度}[\mu\text{g/L}]} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

LASの推定下水処理水中濃度は166.8µg/L、予測無影響濃度は3.7µg/Lとなり、HQは44.9と計算された。LASのHQは1を上回っていたことから、LASは水生生物へのリスクの懸念があると考えられ、下水処理場や放流先での存在実態の把握が必要であると評価された。

表-2 各処理場のLAS濃度と除去率

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	標準	標準	標準	標準	回転	回転	嫌気	嫌気	礫間	礫間	好気	好気	接触	接触	散水	散水
流入下水 (µg/L)	1,800	2,800	2,000	4,400	970	13	920	4,600	4,700	3,400	4,100	5,100	2,500	92	710	1,800
放流水 (µg/L)	1.3	3.4	5.4	6.2	16	0.51	170	860	4.7	13	36	210	5.9	9.2	78	230
除去率 (%)	99.9	99.9	99.7	99.9	98.4	96.1	81.5	81.3	99.9	99.6	99.1	95.9	99.8	90.0	89.0	87.2
現有処理能力 (m <sup>3</sup> /d)	13,000	18,750	15,258	75,400	7,200	900	1,800	2,274	1,050	450	2,200	1,400	850	240	5,200	5,000

標準：標準活性汚泥法  
 回転：回転生物接触法  
 嫌気：嫌気好気ろ床法  
 礫間：礫間接触法  
 好気：好気性ろ床法  
 接触：接触酸化法  
 散水：高速散水ろ床法

### 3. 実下水処理場におけるLASの除去の実態<sup>6)</sup>

下水処理水中のLASが放流先水生生物に及ぼす影響について、詳細な検討が必要であることが明らかとなったため、実下水処理場におけるLASの流入、除去実態を、処理方式別に調査した。調査は、我が国で最も多く採用されている標準活性汚泥法の処理場4箇所（A, B, C, D）と回転生物接触法（E, F）、嫌気好気ろ床法（G, H）、礫間接触法（I, J）、好気性ろ床法（K, L）、接触酸化法（M, N）、高速散水ろ床法（O, P）の処理場それぞれ2箇所の合計16処理場において実施した。調査処理場の処理能力は240～75,000m<sup>3</sup>/dであり、小・中規模の処理場である。調査試料は、平成25年2～3月の晴天日に各処理場の流入水と放流水をスポット採水し、LASの分析を行なった。なお、試料採取日に近い時期に各処理場で行われた定期分析結果によると、SS、BODの除去率は、いずれの処理場においてもSS 80%以上、BOD 92%以上であり、水処理系の運転管理について問題がある状況ではなかった。LASの除去実態を把握するため、流入下水と放流水のLAS濃度から式(2)に従い、LASの除去率を算出した。

$$\text{LASの除去率[\%]} = \frac{(\text{流入下水のLAS濃度} - \text{放流水のLAS濃度})}{\text{流入下水のLAS濃度}} \times 100 \quad \dots\dots\dots\text{式(2)}$$

各処理場の流入下水と放流水のLAS濃度と除去率を表-2に示す。流入下水のLAS濃度は最大値が5,100µg/L、最小値が13µg/Lであり、中央値は約2,000µg/Lであった。本調査結果は、宇都宮ら<sup>11)</sup>が実施した下水道終末処理場におけるLASの挙動調査の流入水濃度2,430µg/Lと同程度であった。16処理場のうち、2処理場（F, N）の流入下水のLAS濃度は13µg/L、92µg/Lであり他の処理場のLAS濃度（710～5,100µg/L）に比べ低い値であった。こ

の原因として、F、Nの処理場はいずれも処理能力が1,000m<sup>3</sup>/d以下の小規模の処理場であり、処理区域が比較的狭く流入水質の時間変動が大きいと考えられ、また試料採取方法がスポット採水であったことで、比較的LAS濃度の低い時間帯に採水した可能性が考えられる。

除去率に着目すると、スポット採水による結果ではあるが、我が国で広く採用されている標準活性汚泥法の処理場のLAS除去率は99%以上であり、回転生物接触法、礫間接触法、好気性ろ床法、接触酸化法、高速散水ろ床法の処理場のLAS除去率は87%以上であった。一方で、嫌気好気ろ床法の処理場のLAS除去率は2箇所とも約81%で、他の処理方法に比べて低い傾向が見られた。

放流水のLAS濃度については最大値が860µg/L、最小値が0.5µg/Lであった。下水処理場（G, H, L, O, P）では、放流水中のLAS濃度が60µg/L（最も厳しい水質環境基準値の10倍と仮定した場合の値）を超えており、比較的高濃度で検出された。Lの処理場ではLAS除去率が高かったが、流入水中のLAS濃度が高かったことから、処理能力を上回る量のLASが流入したため、放流水でLAS濃度が高くなったと考えられる。一方で、G、H、O、Pの処理場ではLAS除去率が低いことで放流水のLAS濃度が高くなったと考えられる。このような下水処理場においては、LASの除去率を向上させることにより、放流水中のLAS濃度を低減できる可能性がある。

### 4. 微生物担体処理によるLASの除去

前章の実下水処理場におけるLASの実態調査から、一部の下水処理場ではLASの除去率が低いことが明らかとなった。LASが環境基準に加わったことを踏まえ、将来、下水処理場でのLASの除去が求められることも想定される。その際、LASの除去率を上げることができない処理場については、処理方式を変えるか、既存施設での処理後にさらに

処理を行うこととなるが、LASを対象とした追加処理に関する知見がない。そこで、追加の処理として、物理化学的な処理より一般的に運転費用が安価となる生物学的な処理によるLASの除去について調査することとした。水質チームでは、処理槽に投入した担体の表面に自然発生的に付着した微生物による処理を期待する微生物担体処理により、下水処理水に残存する医薬品類4物質を対象とした好気的な処理の経験があり<sup>12)</sup>、前章の調査から好気的な分解が期待できるLASについても処理が期待できると考えられた。そこで、実下水を原水とする活性汚泥処理水にLASを人工的に添加したのち、微生物担体処理を行い、LASの除去状況を調査した。

#### 4.1 実験方法及び試料採取

図-1に実験装置の概要を示す。主に生活排水を受け入れる実下水処理場の流入下水を用い標準活性汚泥法で連続運転している活性汚泥処理実験装置の終沈出口に、LAS濃度が環境基準（類型：生物B）の約10倍となるようにLAS含有洗剤を添加し、担体無添加の処理槽（A）と担体添加の処理槽（B）へ流入させ、処理実験を行った。実験条件を表-3に示す。いずれの槽も容量：約9.4L、水理的滞留時間（HRT）：30minであり、反応槽下部より曝気を行った。処理槽（B）には担体を嵩比率50%で投入した。担体は、ポリプロピレンを基材とした中空円筒状で、1個のサイズは外径4mm×内径3mm×長さ5mmである（写真-1参照）。LASを添加してから2週間以上経過した後に処理槽（A）、（B）の流入水及び処理水を採取した。試料採取は平成27年11

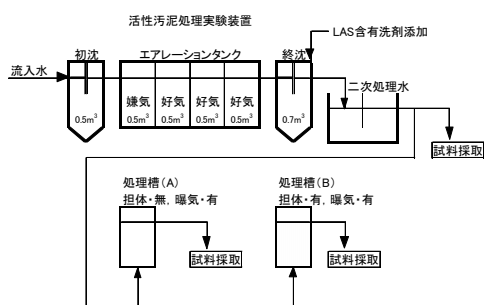


図-1 実験装置の概要

表-3 実験条件

	処理槽 (A)	処理槽 (B)
各槽の容積 (L)	9.4	9.4
各槽HRT (min)	30	30
担体嵩比率 (%)	0	50
曝気の有無	有	有



写真-1 微生物担体

月から12月にかけて4回行った。LASの分析は、「水質汚濁に係る環境基準」（平成26年11月17日環境省告示第126号）付表12に示す方法により行った。

#### 4.2 水質一般項目分析結果

試料採取箇所における一般項目分析結果を表-4に示す。採取試料の水温は、採水1回目から4回目にかけて約5℃の差であった。DOは処理槽(A)、(B)ともに処理槽の表面付近で測定し、9mg/L以上であった。また、NH<sub>4</sub>-NとNO<sub>x</sub>-Nのデータから、二次処理水の段階で硝化はほぼ終了していると考えられる。

表-4 各処理槽通過後の水質一般項目分析結果

試料採取	水温 (°C)	pH (-)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	NO <sub>x</sub> -N (mg/L)	
二次処理水 (LAS添加後)	採水1回目	22.5	6.9	(未測定)	5.9	9.6	4.8	0.04	8.5
	採水2回目	20.1	6.9	5.3	10.5	10.6	5.8	0.26	8.7
	採水3回目	17.0	6.9	5.3	8.8	9.8	5.0	0.01	8.9
	採水4回目	18.3	6.9	3.6	10.1	12.2	8.6	0.21	9.8
処理槽 (A) (担体無)	採水1回目	22.1	7.8	(未測定)	4.6	9.2	4.8	0.03	8.4
	採水2回目	18.9	7.7	9.3	7.7	9.2	5.1	0.07	8.6
	採水3回目	17.8	7.7	9.8	6.8	9.2	5.3	0.01	8.8
	採水4回目	16.7	7.8	(未測定)	6.0	9.4	6.7	0.10	9.2
処理槽 (B) (担体有)	採水1回目	22	7.7	(未測定)	5.8	7.4	4.1	0.02	8.4
	採水2回目	18.7	7.6	9.3	7.6	8.8	4.5	0.04	8.7
	採水3回目	17.8	7.7	9.8	5.8	8.8	4.8	0.00	8.8
	採水4回目	16.6	7.7	9.5	5.9	8.8	5.4	0.06	9.3

#### 4.3 LAS分析結果

活性汚泥処理実験装置の二次処理水と処理槽（A）、（B）通過後のLAS濃度分析結果を図-2に示す。二次処理水のLAS濃度が採水ごとにばらついているが、流入水の変動によるものと考えられる。担体無添加の処理槽（A）では20～39%のLAS除去率となったことから、曝気を行うのみでもLASの除去が確認できた。また、担体を添加している処理槽（B）のLAS除去率は50～86%であった。処理槽（A）よりも（B）のLAS除去率の方が高く、担体処理によるLASの除去効果が確認できた。

また、4回の調査間でLASの除去率に違いがみられた。今後は担体処理によるLASの除去率に関係

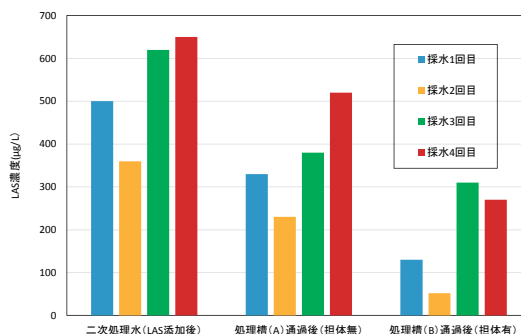


図-2 各水処理工程のLAS分析結果



する要因の解明が必要となる。加えて、今回の結果は一条件での処理結果であることから、今後は担体量や滞留時間、曝気量等、より適切な処理条件について検討する。

## 5. まとめ

本稿では、LASの生態リスク評価、種々の処理方式の実下水処理場におけるLASの除去率の調査、微生物担体を用いた実験によるLASの除去特性の調査の結果を紹介した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 生態リスク初期評価の結果、LASのHQは44.9となり、LASは優先的に詳細評価を行う候補となる化学物質であると考えられた。
- 2) 実下水処理場におけるLASの流入、除去実態を、処理方式別に調査した結果、一部の下水処理方法で除去率が80%程度であり、活性汚泥法と比べて低かった。
- 3) LASの微生物担体処理による除去特性について調査した。活性汚泥処理実験装置の終沈出口にLAS含有洗剤を添加した水を用いて、担体の有無によるLASの除去率について比較した結果、担体を用いた処理によってLASの除去率は向上することが確認できた。今後はより適切な処理条件について検討をすすめる予定である。

## 参考文献

- 1) 吉村孝一、中栄篤男：活性汚泥による直鎖アルキルベンゼンスルホン酸（LAS）の生分解性に関する研究（I）—LASの吸着機構について—、水質汚濁研究、第5巻、第1号、pp19～25、1982
- 2) 中央環境審議会水環境部会水生生物保全環境基準専門委員会：水生生物の保全に係る水質環境基準の項目追加等について（第2次報告）、pp.16～45、2012
- 3) 環境省水・大気環境局水環境課：水生生物の保全に係る水質環境基準の項目追加等に係る環境省告示について（お知らせ）、<http://www.env.go.jp/press/16494.html>、2016
- 4) 環境省：水質汚濁に係る環境基準についての一部を改正する件の施行等について（通知）、環水企発031105001・環水管発031105001、平成15年11月5日
- 5) Takeda F, Mano H., Suzuki Y., Okamoto S., Initial Environmental Risk Assessment of Japanese PRTR Substances in Treated Wastewater, Journal of water and environment technology Vol.13, No.4, 301-312, 2015
- 6) 小森行也、岡本誠一郎：実下水処理場における直鎖アルキルベンゼンスルホン酸(LAS)の除去特性、第51回下水道研究発表会講演集、pp.307～309、2014
- 7) 経済産業省製造産業局化学物質管理課：化学物質のリスク評価のためのガイドブック実践編、pp.61～67、2007
- 8) 経済産業省製造産業局化学物質管理課、環境省環境保健部環境安全課：平成23年度PRTR届出外排出量の推計方法等に係わる資料、2013
- 9) 環境省総合環境政策局環境保健部環境安全課環境リスク評価室：化学物質の環境リスク初期評価、<http://www.env.go.jp/chemi/risk/index.html>、2011
- 10) (独)製品評価技術基盤機構、(財)化学物質評価研究機構：初期リスク評価書、<http://www.safe.nite.go.jp/risk/risk/riskhykd101.html>、2009
- 11) 宇都宮暁子、内藤昭治、富田勲：直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム（LAS）に関する研究（第2報）下水道終末処理場におけるLASの挙動、衛生化学、Vol.32、No.4、pp.258～266、2004
- 12) 小森行也、岡本誠一郎：微生物担体処理における医薬品類の除去特性、第48回水環境学会講演集、p581、2014

金子陽輔



土木研究所水環境研究  
グループ水質チーム  
研究員  
Yosuke KANEKO

小森行也



土木研究所水環境研究  
グループ水質チーム  
特任研究員  
Koya KOMORI

岡本誠一郎



研究当時 土木研究所水  
環境研究グループ水質  
チーム上席研究員、現  
国土交通省国土技術政策  
総合研究所下水道研究部  
下水道研究官、博（工）  
Dr.Seiichiro OKAMOTO

南山瑞彦



土木研究所水環境研究  
グループ水質チーム  
上席研究員  
Mizuhiko MINAMIYAMA