

残留塩素の環境水中での挙動に関する研究レビュー

田代 喬*, 小川隆文**, 辻本哲郎*

*名古屋大学大学院, ** (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

1. はじめに

残留塩素は優れた消毒効果を有し、水系伝染病の病原菌駆除にも非常に有効であることから、これまで、上下水処理における消毒過程において多用され、人間社会における公衆衛生環境の向上に大きく寄与してきた。その一方、ごく低濃度であっても放流先水域における水生生物に対して甚大な影響を与える可能性を内包している（例えば、藤田，1988）。下水処理施設の被災時などには、衛生的な安全性を確保するために通常時よりも消毒剤使用量が増加することが想定されており（国土交通省国土技術政策総合研究所，2012）、より高濃度な残留塩素が公共用水域に排出される可能性が指摘されている。しかしながら、環境水中に排出された残留塩素が水域生態系に及ぼす影響については既往研究が少なく、適切な対策も施されていないのが現状である。

本稿は以上に鑑み、残留塩素の環境水中における挙動に着目し、それが水生生物に及ぼす影響と環境水中における低減過程という 2 つの観点から既往研究をレビューすることにより、残留塩素が水域生態系に及ぼす影響に関する理解の現状について分析することを目的とした。

2. 残留塩素が水生生物に及ぼす影響

残留塩素は水中に含まれるカルキ臭の原因物質で、水処理過程における塩素消毒により発生する。残留塩素（全残留塩素）を構成するのは、遊離残留塩素と結合残留塩素であり、前者は次亜塩素酸（ HClO ）と次亜塩素酸イオン（ ClO^- ）、後者はアンモニア態窒素、アミノ酸類、アミン類などと結合した状態で水中に存在する。水道法施行規則においては給水栓における遊離残留塩素濃度を 0.1mg/L （結合残留塩素の場合は、 0.4mg/L ）以上保持するよう義務付けられているほか、前述のように、下水処理過程においても放流水の衛生的な安全性を高める目的で多用されてきた。

残留塩素が水生生物に及ぼす影響については、これまで多数の事例が報告されている。米国では、1976 年に EPA（Environmental Protection Agency）により、水生生物を保護するための排水域の全残留塩素濃度の基準として、淡水域では 0.01 mg/L （暖水性種）および 0.002 mg/L （冷水性種）が設定された（Zeiton and Reynolds, 1978; 藤田，1988）。かつては国内の事例は少なかったが、藤田が海外における事例をレビューして塩素処理排水により水生生物が受ける影響の重大性を示して以降、調査研究が進められてきた。淡水魚を対象とした毒性試験（青井，1998；松田・信澤，2005）、下水処理排水を受容する河川における底生動物（相澤ら，1999；Fukushima and Kanada, 1999）や付着藻類（Fukushima and Kanada, 1999; 荒谷ら，2005；ゾーら，2010）への影響調査などが挙げられる。特に、アユ *Plecoglossus altivelis* の 24 時間の曝露試験時における半数致死遊離残留塩素濃度（ LC_{50} ）は、他の魚種よりも小さく（ 0.07 mg/L ）、影響が大きい（青井，1998）。国内の河川などで検出されている残留塩素濃度を見るに、上記基準値や青井が示したアユの LC_{50} 値を超過している事例も多々あることから、水生生物に深刻な影響を与えるだけでなく、内水面漁業や親水行動などの変化を通じ、人間社会にも影響を及ぼしている可能性が示唆される。

3. 残留塩素の環境水中における低減過程

観賞魚などの飼育に残留塩素を含む水道水を使用する際は、バケツなどに汲み置いて使用することなどからも明らかなように、残留塩素は揮発しやすい。以下に紹介する国内外の既往研究などを通じ、残留塩素の低減過程については、次式に示す運動学的な一次反応式によって記述されることが明らかになっている。

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (1)$$

ここで、 C_t は t 時間経過後の残留塩素濃度(mg/L)、 C_0 は初期の残留塩素濃度(mg/L)、 k は残留塩素の減少速度係数(t^{-1})、 t は経過時間である。つまり、 C_t/C_0 の変化量の比を自然対数にすると直線関係が得られ、その傾きが減少速度係数となる。

残留塩素の低減には、揮発や光の照射、攪拌による非酸化物との接触などが影響し（中西，1966; Heinemann et al. 1983; Milne et al. 1993; 佐藤，2009），これらの影響に関する減少速度係数については実験的に記述されてきた（中西，1966; Reckhow et al. 1990; Milne et al. 1993）。これらを活用することにより、欧米では処理水が流入した河川における残留塩素の濃度変化に関するシミュレーションが進展させられてきた一方で（Gowda, 1978; Heinemann et al. 1983; Reckhow et al. 1990; Milne et al. 1993; Gang et al., 2003），日本においては上水配水過程に限定した取り組みに留まっている（後藤，1982; 佐藤，2009）。以上を踏まえ、さらに環境水中の残留塩素低減機構の解明を目指していくためには、これまでに実験室内で記述されてきた各種の低減過程を参考にしながら、日射や温度、水質、地形・流動条件などの外的要因と関連付けて残留塩素の低減過程を理解することが重要と思われる。なお、著者らが実河川における現地観測に基づいて残留塩素の減少速度係数を推定したところ、昼間で $6.3 \times 10^{-2} \text{min}^{-1}$ 、夜間で $1.1 \times 10^{-2} \text{min}^{-1}$ との結果を得ている（田代ら，2013）。これらは、Milne et al. (1993) が整理した既往観測値（ $3.4 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-1} \text{min}^{-1}$ ）と合致し、昼夜における低減効果の差異を新たに明示するものであった。

4. おわりに

本稿では、残留塩素が水生生物に及ぼす影響と残留塩素の環境水中における低減過程についてレビューを行い、処理水中に含まれる残留塩素が水域生態系に及ぼす影響について考察した。その結果、下水処理水を受容する河川においては残留塩素が検出されることが多く、水域生態系は顕在・潜在的に残留塩素の影響を受けているものと推察された。また、環境水中における残留塩素の低減過程については、これまでにあまり問題視されておらず、未着手・未解明な現象が多く残されていることが確認された。

残留塩素が水生生物に及ぼす影響とそれを軽減するための対策に関しては、生息場所適性など他の影響要因や費用対効果と合わせて検討されるべきであるとの指摘がある（藤田，1988; Newbry et al. 1983）。今後、こうした検討の材料となる知見を体系化していくためにも、残留塩素の環境水中の挙動に関連する新たな知見の集積が求められている。

参考文献（本稿の性質上、多数に及ぶため主要なものに限って掲載）

青井：衛生工学シンポ論集 6: 71-76, 1998. / 藤田：用水と排水 30(6): 3-11, 1988. / 国総研：<http://www.mlit.go.jp/common/000223836.pdf>. / Milne et al.: Wat. Res. 27(6): 993-1001, 1993. / 中西：水協会雑 386: 47-60, 1966. / Newbry et al.: Water Chlorination-Environmental Impact and Health Effects 4, Chemistry and Water Treatment, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI: 1423-1436, 1983. / 田代ら：河技論 19, 2013 (印刷中).