

高度浄水処理・オゾン注入量制御方式に関する一考察

陰山晃治*、渡辺昭二*、馬場研二*、原直樹**、小松直人***

*（株）日立製作所日立研究所
日立市大みか町7丁目1番1号

**（株）日立製作所大みか工場
日立市大みか町5丁目2番1号

***（株）日立製作所国分工場
日立市国分町1丁目1番1号

概要

高度浄水処理のオゾン注入量制御方式としては、注入率や、排オゾン濃度、あるいは溶存オゾン濃度を一定にする定値制御が一般的に使用されている。しかし、流出臭気物濃度を目標値に維持する運転を採用した場合、これらの定値制御方式のみでは流入水量の変動に対して安定した処理水質が得られないことをシミュレーションにより見出した。そこで、この理由について考察し、流入水量の変動を考慮したオゾン注入量制御方式を提案した。

キーワード

高度浄水処理、オゾン注入制御、流入水量変動、完全混合槽列モデル、シミュレーション

1. はじめに

水源の水質悪化に伴い、「おいしく、安全な水道水」を供給するために浄水場で高度浄水処理施設が導入され始めている。高度浄水処理はオゾンの強力な酸化力と、活性炭の吸着現象および付着微生物による有機物分解を利用して、異臭味の主成分であるジェオスミンや2-MIBなどを除去する。オゾン処理は電力消費量が大きく、注入するオゾン量を最適に制御することが運転コストの削減に有効である。最適オゾン量は、流入水量、水温、pH、溶存臭気物の種類および濃度、処理後の臭気物濃度目標値などによって変化する。現在は溶存臭気物の種類あるいは濃度をオンラインで測定するセンサが無いため、制御方式としては注入率や排オゾン濃度、あるいは溶存オゾン濃度を一定に制御する方式が一般的である。

本報告では、¹⁾流出臭気物濃度を常に目標値に維持することを最終的な目標として、流入水量変動に対する各制御方式の効果についてシミュレーションを行った。さらに、この結果について考察を加え、新しい制御方式を提案する。

2. オゾン接触池モデル

シミュレーションのためのオゾン接触池モデルとして、完全混合槽列モデルを用いた。典型的なオゾン接触池モデルとしては、完全混合モデルと押し出し流れモデルとが考えられるが、実際のオゾン接触池ではそれらの中間状態にあると考えられるため、その状態を表現可能な完全混合槽列モデルを採用した。この概念図を図1に示す。接触池は気液向流方式とし、概念上仮想槽数N個の完全混合槽から構成されていると考える。

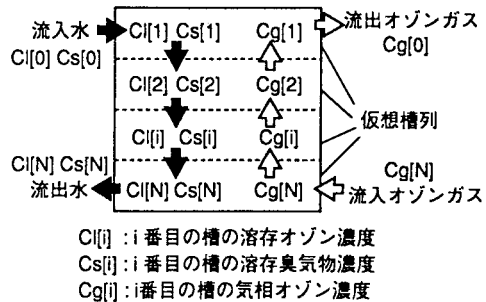


図1 完全混合槽列モデルの概念図

完全混合槽列モデル式を表1に示す。これは、溶存オゾン濃度：式(1)、気相オゾン濃度：式(2)、溶存臭気物濃度：式(3)についての連立常微分方程式から成る。このモデル式では、オゾンの溶解反応、溶存オゾンの自己分解反応、溶存臭気物の酸化分解反応を考慮した。

式中でClは溶存オゾン濃度、Cgは気相オゾン濃度、Csは溶存臭気物濃度であり、[]内数値iは各槽の番号を表わす。また、Viは各槽中液体体積、Vgは各槽中気体体積、Qiは流入水量、Qgは流入ガス量を表わす。

各反応係数の値を表2に示す。これらの値は、各文献中の式に基づいて算出した。特に、KLおよびSは村木の式⁴⁾、Kdeは清水の式³⁾を用いた。また、単位2-MIB消費オゾン量Krは、1モルの2-MIBを分解するためにオゾン1モルが消費されると仮定し、オゾン分子量48を2-MIB分子量168で割った値を用いた。

表1 完全混合槽列モデル式

$V_i \frac{dCl[i]}{dt} = Qi \cdot (Cl[i-1] - Cl[i]) + K La \cdot (S - Cg[i] - Cl[i]) - Kde \cdot Cl[i] - Kox \cdot Kr \cdot Cl[i] - Cs[i]$	(1)
$V_g \frac{dCg[i-1]}{dt} = Qg \cdot (Cg[i] - Cg[i-1]) - Vi \cdot K La \cdot (S - Cg[i] - Cl[i])$	(2)
$V_i \frac{dCs[i]}{dt} = Qi \cdot (Cs[i-1] - Cs[i]) - Kox \cdot Cl[i] \cdot Cs[i]$	(3)

表2 各反応係数の設定

総括物質移動係数	KL : 0.0126(m/min) ⁴⁾
分配係数	S : 0.2674(-) ⁴⁾
自己分解反応係数	Kde : 0.0250(1/min) ³⁾
2-MIB酸化分解反応係数	Kox : 0.4813(1/min) ³⁾
ガスホールドアップ	ϕ : 0.00068(-) ²⁾
単位2-MIB消費オゾン量	Kr : 0.1791(-)

3. 流入水量変動に対する各オゾン注入量制御方式の効果

一般的なオゾン注入量制御方式について、流入水量が変動した場合の流出臭気物濃度の変化をシミュレーションによって求めた。検討した制御方式は、注入率一定制御、排オゾン濃度一定制御、溶存オゾン濃度一定制御の3種類である。なお、注入率一定制御とは設定注入率と処理水量との積でオゾン注入量を制御するもの、排オゾン濃度一定制御とは設定した排オゾン濃度を制御目標としてオゾン注入量を制御するもの、溶存オゾン濃度一定制御とは、設定した溶存オゾン濃度を制御目標としてオゾン注入量を制御するものである。

本報告ではオゾン接触時間が5(min)となる流入水量0.06(m³/min)、オゾン注入率2(g/m³)の場合を基準とした。各制御方式の制御目標がこの基準時におけるオゾン注入率、排オゾン濃度、溶存オゾン濃度と等しくなるように設定値を決定した。すなわち、制御目標がオゾン注入率ならば2(g/m³)、排オゾン濃度なら4.58(g/Nm³)、溶存オゾン濃度なら1.41(g/m³)を設定値とした。

表3に示したシミュレーション条件において、Runge-Kutta法を用いて式(1)(2)(3)の数値解を算出した。

シミュレーション結果を図2に示す。これは、定常状態に到達後の流入水量と流出臭気物濃度との関係である。いずれの制御方式を適用しても、流入水量が増加するに従って、流出臭気物濃度もほぼ比例して増加することが分かる。

流出臭気物濃度が外乱の影響を受けず、常に目標値を維持することを最終的な目標とすると、これらの制御方式だけでは流入水量に対して流出臭気物濃度が変動してしまい、目標を達成できないという問題が示された。

表3 シミュレーション条件

流入臭気物質	2-MIB
流入臭気物濃度	100(ng/L)
流出臭気物濃度	約25(ng/L)
水温	23(°C)
pH	7.3(-)
オゾン接触池	0.3x0.3x3.3(m ³)
流入オゾンガス流量	0.006(m ³ /min)
気泡径	3(mm), 球状
流入水量	0.02~0.12(m ³ /min)
仮想槽数	5(槽)

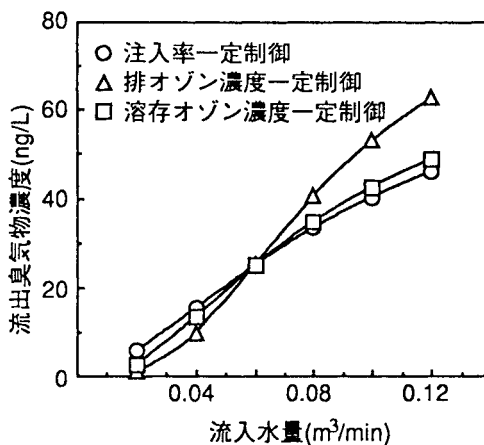


図2 各制御方式シミュレーション結果

4. 流入水量と必要オゾン注入量の関係

4.1 流入水量と必要オゾン量

流入水量が変動した場合に、流出臭気物濃度が目標値を維持するための最適なオゾン注入量をシミュレーションによって求めた。シミュレーション条件は表3に準じた。

図3にシミュレーション結果を示す。この図より、流出臭気物濃度の目標値を維持するために必要な注入オゾン量は、流入水量に関して指数関数的に増加することが分かった。

これは、流入水量が増加すると、単位時間あたりに流入する臭気物の量が増加し、それに加えて接触池内での滞留時間が減少するためと考えられる。

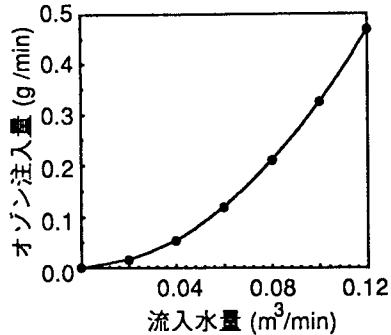


図3 シミュレーション結果

4.2 流入水量の影響解析

単純化したモデルを用いて、図3の結果を数式で考察した。オゾン接触池が仮想槽数1の完全混合槽であると仮定し、定常時におけるモデル式を変形することで流入水量とオゾン注入量との相関関係を検討した。

表4の式(4)は、モデル式(1)、(3)を左辺=0とした定常状態のもとで、注入オゾン濃度に関して解いた結果である。このように注入オゾン濃度は、流入水量に関して二次関数の関係であることが明らかになり、図3に示された結果の妥当性が得られた。

なお、(4)式より、流出臭気物濃度 $Cs[1]$ が流入臭気物濃度 $Cs[0]$ と比較して無視できる程度であれば、必要な注入オゾン濃度すなわち注入オゾン量は、流入臭気物濃度にほぼ比例することが分かる。

同様に、複数の仮想槽列から構成される完全混合槽列モデルについても、各槽において式(4)の関係が成り立つものと予測する。

表4 注入オゾン濃度に関する式

$$Cg = (Cs[0] - Cs[1]) \cdot (A_1 \cdot QI^2 + A_2 \cdot QI) \quad (4)$$

ただし、

$$A_1 = \frac{1}{KLa \cdot S \cdot Kox \cdot Cs[1] \cdot V^2} \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{V \cdot (KLa + Kde + Kox \cdot Kr \cdot Cs[1])}{KLa \cdot S \cdot Kox \cdot Cs[1] \cdot V^2} \quad (6)$$

5. 流入水量補正を付加したオゾン注入量制御方式

5.1 補正を加えた制御方式

流入水量の変動を考慮し、補正を加えるオゾン注入量制御方式を図4に示す。これは、前記した各制御方式の制御目標である注入率、排オゾン濃度や溶存オゾン濃度の設定値を流入水量によって補正し、その補正した設定値を用いる制御方式である。この補正値を算出する一例を式(7)に示す。式(4)の結果を用いて正確さを追求することも考えられるが、今回は単純な式(7)によって補正の有効性について検討した。

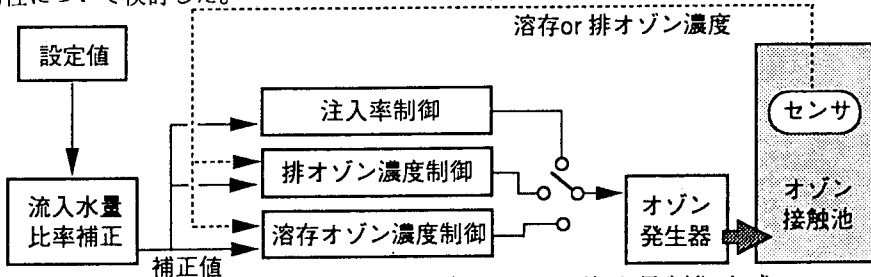


図4 補正を加えたオゾン注入量制御方式

$$\text{(補正值)} = \text{(設定値)} \cdot \frac{\text{(現在の流入水量)}}{\text{(基準流入水量)}} \quad (7)$$

5.2 流入水量変動補正の効果

図4および式(7)で示した制御方式を用い、3章と同様にして接触時間5(min)、流入水量0.06 (m³/min)の場合を基準としてシミュレーションを行った。なお、シミュレーション条件は表3に準じた。

式(7)の補正值でシミュレーションした結果を図5に示す。図2と比較すると、いずれの制御方式においても流入水量の変動に対して流出臭気物濃度の変動が小さくなっていることが分かる。3種類の制御方式の中では、溶存オゾン濃度一定制御と流入水量補正とを組み合わせたものが安定性の面で最も良好な結果を示している。これは、溶存オゾン濃度一定制御方式と式(7)の補正式とが整合した結果と考えられる。

この結果より、図4で提案した制御方式は、流出臭気物濃度を目標値に維持するのに有効な制御であるといえる。

今回の補正值は式(7)のように非常に単純な式で算出したが、この式を各制御方式ごとに整合、発展させることで制御精度の向上が期待できる。

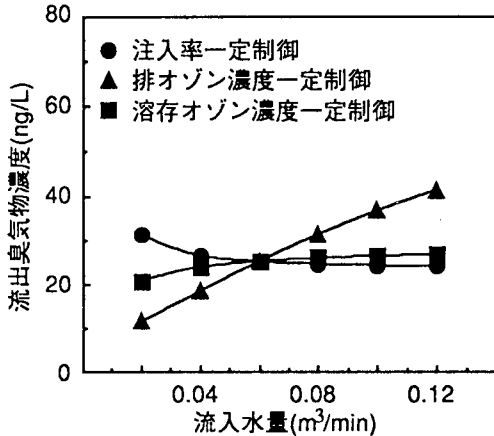


図5 流入水量補正方式のシミュレーション結果

6. 結論

(1) 従来の注入率一定制御、排オゾン濃度一定制御、溶存オゾン濃度一定制御をシミュレーションにより再現した結果、いずれの制御方式においても流出臭気物濃度は流入水量にほぼ比例して増加する(一定に制御できない)ことが分かった。

(2) 単純化した完全混合モデルを用いて考察した結果、流入水量と必要なオゾン注入量との関係は二次関数で表わされることを明らかにした。

(3) 流入水量を考慮して設定値を補正するオゾン注入量制御方式を提案し、流出臭気物濃度の安定化に寄与することをシミュレーションで確認した。

7. 今後の展開

今後、実験によって流入水量と必要なオゾン注入量との関係を求め、本モデルおよびシミュレーションを検証していく。また、制御方式についても各制御方式と今回提案した制御方式との効果の差異を実験によって実証していく。

8. 参考文献

- 1) 酒井、高橋ら(1994): 上下水道における高度処理、電気学会研究会資料、公共施設研究会
- 2) 宗宮(1989): オゾン利用水処理技術、公害対策技術同友会
- 3) 星川、森岡ら(1993): 新版オゾン利用の新技术、サンユー書房
- 4) 村木(1980): オゾンの水への吸収、水道協会雑誌、No.434