

活性炭吸着池におけるトリハロメタン前駆物質破過のシミュレーション

Numerical Simulation of Breakthrough Curves for Trihalomethane Precursors from Granular Activated Carbon(GAC) Filter

亀井 翼¹⁾・坂本 尚史¹⁾・山本 崇行²⁾Tasuku KAMEI¹⁾, Takabumi SAKAMOTO¹⁾ and Takayuki YAMAMOTO²⁾

Rosen の近似解式を用いた計算値が、北見市広郷浄水場吸着池における紫外線 260nm 吸光度(E260)発現成分の吸着破過実測値に一致するよう、カーブフィティング(curve fitting)によりパラメータを求めた。得られたパラメータを用いて当別浄水場と新潟市における高度処理実験結果の数値シミュレーションを行い、固定層下降流吸着処理における生物処理機能が主体的に機能する(E260 処理水濃度)/(E260 流入水濃度)が 0.7(除去率 30%)程度に到達するまでは、シミュレーションにより E260 吸着破過の概要を記述することが可能であることを明らかにした。さらに(E260 処理水濃度)/(E260 流入水濃度)が 0.7(除去率 30%)程度に到達以降も継続する E260 除去率 30~20%程度の除去率は、粒状活性炭池における生物除去機構が主体であることを試料水の生物分解試験により明らかにした。以上の諸知見を基礎として浄水場流入水のトリハロメタン前駆物質(E260 発現成分)の 75%程度は凝集処理により除去可能なことから、E260 吸着除去率 30~20%の固定層吸着処理で目標トリハロメタン生成能 0.035(mg/L)を達成可能な浄水場流入水の E260 発現成分の上限値は 0.184 (1/cm)[有機炭素 DOC 換算値; 9.2 mg/L]~0.16 0(1/cm)[有機炭素 DOC 換算値; 8.0 mg/L]となることを明らかにした。

1. はじめに

固定層における吸着破過を予測する方法は大別すると、①固定層における物質収支式、活性炭粒子内部への溶存有機成分の粒内拡散速度式、水中の溶存有機成分濃度と活性炭への吸着量を記述する吸着等温式などを連立させて数値計算により求める方法、②吸着帯の定形分布が成立する場合、総括物質移動係数を用いて吸着破過を予測する方法③3本の吸着筒

を直列に連結し、連続通水実験を行い、各吸着筒出口の溶質の破過時間を求めて破過時間と吸着層高との関係式に代入することにより関係式のパラメータを求める方法、④吸着速度が活性炭粒内拡散抵抗に支配され、吸着平衡が直線近似可能な場合、固定層内の物質収支を表す偏微分方程式を解析的に解いた Rosen の近似解法¹⁾、などがある。①の数値計算法は大型計算機を用いても 1.5m の吸着層高の 1 年にわたる吸着破過を計算するには多大の時間を要し、かつ必要な粒内拡散係数などのパラメータはあらかじめ実験的に求めておく必要がある。②の方法も水中の E260 発現成分は粒内拡散も遅く、固定層における吸着帯の定形分布が成立しないことが知られている。③3本の吸着筒を直列に連結し、連続通水実験を行う方法も多大の実験時間を要する。④の Rosen の近似解法は析解であるので、計算時間も短時間(1 分間以内)で、E260 発現成分は粒内拡散係数も知られている。凝集沈殿後の残存

連絡先：亀井翼 tkamei@cis.ac.jp

1) 千葉科学大学危機管理学部 動物・環境システム学科
Department of Animal and Environmental System Science, Faculty
of Risk and Crisis Management, Chiba Institute of Science

2) 株式会社荏原エンジニアリングサービス
Ebara Engineering Service CO., LTD.

(2009年9月18日受付, 2009年11月30日受理)

有機成分はE260 発現の中分子量成分が主体であるので、1成分系の吸着係数により吸着破過を計算し、共存するかも知れない微量の臭気成分などの吸着破過は E260 の吸着破過と関連づけて予測することが可能である。本研究では下記の諸事項を明らかにすることを目的とした。

- (1) Rosen の近似解法を用いてどの程度、固定層における吸着破過を普遍的に予測できるか？
- (2) Rosen の近似解法を用いた場合、吸着原水濃度の違いにより、どの程度、トリハロメタン前駆物質(E260 発現成分)の破過時間が異なるのか？
- (3) 物理化学的機構のみに基づく固定層吸着シミュレーション結果と実際の運転結果を対比することにより、固定層吸着層における E260 発現成分の除去機構が時間的にどのように変遷するのか？

2. Rosen の近似解を用いた吸着破過シミュレーション

固定層吸着シミュレーションは下記の式(1)～式(3)を用いて富士通 GS8500/10S 計算機により行った。式(1)～式(3)は固定層内の物質収支式、吸着平衡式(直線平衡式)、吸着速度式(粒内拡散律速を仮定)を連立させて解いた Rosen の近似式で、式(1)により活性炭吸着塔の任意の位置における処理水質の t 時間後の濃度を計算することができる。Rosen の近似式は本来、吸着等温線が直線の場合に適用されるものであるため、非線形の吸着等温線を多分割して直線近似させた安武、小林の方法²⁾をシミュレーションに用いた。

$$\frac{C(\eta, \xi)}{C_0} = \frac{\exp\{(\sigma \xi \lambda^2 / 2) - v\eta (A - 1)\}}{[2\pi \{1 + \frac{v\eta}{4}(A + B) - 2AB\}]^{1/2}} \quad (1)$$

$$\lambda^2 = \left(\frac{15}{4v\eta}\right) \left[-\left(\frac{3\delta\xi}{2} - v\eta\right) + \left\{\left(\frac{3\delta\xi}{2} - v\eta\right)^2 + \frac{8v\eta}{5}\right\}^{1/2}\right] (\lambda \leq 1 \text{ のとき}) \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{v\eta}{2\sigma\xi} + \left\{\left(\frac{v\eta}{2\sigma\xi}\right)^2 + \frac{2}{\sigma\xi}\right\}^{1/2} (\lambda > 1 \text{ のとき}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= 2Di/t^2 \\ \xi &= t - \epsilon_b Z/U \\ v &= 3DiH/t^2 \\ \eta &= \gamma Z/U \\ A &= \lambda \coth \lambda \\ B &= (\lambda \operatorname{cosech} \lambda)^2 \end{aligned}$$

C_0 : 原水濃度(g/cm³)

C : 処理水濃度(g/cm³)

Di : 吸着量基準の粒子内拡散係数(cm²/s)

m : 活性炭粒子半径(cm)

t : 時間(s)

ϵ_b : 固定層空隙率(-)

Z : 吸着層高(cm)

U : 空塔線速度(cm/s)

H : Henry の定数(cm³/g-活性炭)

Γ : 充填密度(g/cm³)

Coth : 双曲線余接函数

Cosech : 双曲線余割函数

3. 吸着実験の概要

3. 1. 大型吸着筒を用いた連続吸着実験

当別元町浄水場に設置した図1に示すような3筒の固定層吸着実験筒に高速凝集沈殿池越流水を通水し、様々な空間速度(Space Velocity; SV)で運転を行った。固定層吸着層を通過する1時間当たりの吸着処理水量を吸着層の容量で除したものが SV で、接触時間の逆数である。換言すれば1時間に活性炭層容量の何倍の処理水量が得られるかを示す。浄水処理においては3(1/h)程度から7(1/h)程度が一般的な SV 値として用いられている。SV と空塔線速度(U) との関係は次式で示される。

$$SV(1/h) = U/Z \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

Z : 吸着層高(m)

U : 空塔線速度(m/h)

用いた活性炭、当別元町浄水場流入水(未凝集沈殿)、分析機器、吸着装置の概要をそれぞれ、表1～表3、図1に示す。吸着破過の有機物指標、及びトリハロメタン前駆物質の指標³⁾としてE260を用いる利点は次のようにまとめられる。

(1) 河川、湖沼水などの環境水中の大部分の有機成分は E260 発現成分である。

(2) E260 は溶解性有機炭素測定機(DOC メータ)よりもはるかに低価格の分光光度計を用いて、精度良く、迅速に計測可能である。

表1. 活性炭の概要

活性炭のタイプ	石炭系(LG20S)
活性炭の有効径タイプ	1.2mm
活性炭の均等係数	1.3

表2. 活性炭吸着筒流入原水の代表的な水質

E260(1/5cm)	DOC(mg/L)	濁度	色度
0.063	0.65	0.25	1.7

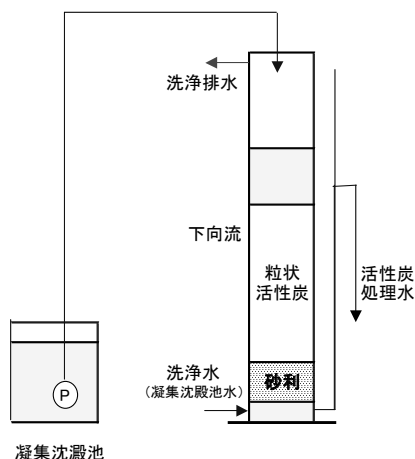


図1. 固定層吸着筒(内径; 0.1m, 吸着層高; 1.5m)の概要(上記のような吸着筒を3本、並列に設置)

3. 2. 小型吸着筒を用いたリサイクル吸着試験

上述の大型連続吸着試験の結果をさらに、確認するため、所定量の活性炭(最大径0.85、最小径0.6mmの活性炭)を充填した内径0.7cm、層厚1cmの小型吸着筒を0.4Lの試料水を貯留した貯留槽に連結し平均空塔線速度5cm/minでろ過を行った。ろ過水はE260を測定後、再度、貯留槽に戻し、ろ過水のE260が擬似平衡に達するまで、繰り返し吸着試験を行った。

3. 3. E260発現成分の生物分解性試験方法

E260発現成分の生物分解を促進するためには曝気が必要であるが、大気洗浄槽を前置しない曝気は同時に大気中のE260発現成分を水中に持ち込むため、時々攪拌のみを3ヶ月にわたり継続した。

3. 4. 水質分析方法

一般的な水質分析は上水試験法により行った。溶解性有機炭素(DOC)、総トリハロメタン生成能(THMs)は予め作成しておいたE260との相関図から求めた⁴⁾。

4. 結果と考察

4. 1. 吸着運転のシミュレーション

北見市広郷浄水場で稼働している吸着池におけるE260除去率は通水開始8ヶ月に30%に低下したことが報告⁵⁾されているので、Rosenの近似解式を用いた計算値が実測値に一致するようにパラメータの一つである吸着等温式の係数をカーブフィティング(curve fitting)により求めた(図2)。北見市広郷浄水場吸着池のE260除去率は上述のように通水開

表3. 水質分析機器

項目	分析機器
E260	Hitach U-1800 分光光度計
濁度、色度	Water Analyzer 2000

始8ヶ月に30%に低下したが、以降のE260除去率の低下は緩やかで(3年後でも20%)ある。すなわちE260除去率が30%~20%に低下した後も生物的作用によりE260発現成分のうち、生物分解可能なE260発現成分が長期にわたり分解除去されるものと考えられる。Rosenの近似式は生物学的な除去を考慮していないので、E260除去率が30%(吸着池出口濃度/吸着池入り口濃度 = 0.7)程度に低下後は実測値をシミュレートすることは原理的に不可能である。シミュレーションに用いた諸条件を表4に示す。北見市広郷浄水場吸着池のカーブフィティングに用いた同じ諸数値(吸着原水濃度、SVは異なる)を用いて当別浄水場及び新潟浄水場で稼働している吸着池におけるE260の破過^{6,7)}をシミュレートした結果を図3、図4に示す。異なる浄水場の吸着池におけるE260の破過を吸着原水濃度、SV以外は同じ諸数値(表4)を用いてシミュレート可能ということは、ほぼ同様な吸着係数、指数を有する石炭系の活性炭であることに加えて、自然由来のE260発現成分が同様な化学構造を有するという報告を吸着破過のパターンからも再確認したものと考えられる^{8,10)}。

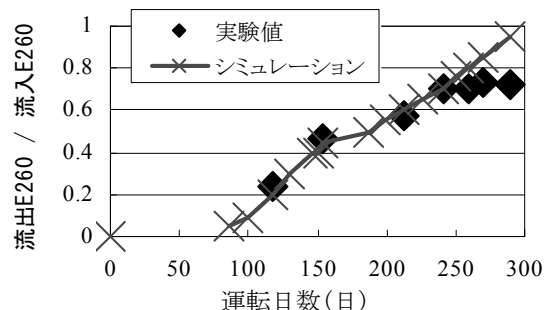


図2. 北見広郷浄水場における固定層吸着運転結果⁵⁾のシミュレーション(吸着池流入E260: 0.017[1/cm])

表4. カーブフィティングに用いた諸数値

項目	数値
活性炭粒径(mm)	1.2
活性炭充填密度(g/cm ³)	0.443
フロイントリッヒの吸着係数	0.043
フロイントリッヒの吸着指数	0.8
粒内拡散係数(cm ² /s)	1.11 × 10 ⁻¹⁰
吸着原水濃度(DOC:mg/L)	1.0
SV(1/h)	4

4. 2. SVの違いが吸着破過時間に与える影響

図2～図4に示すようにE260除去率が30%(吸着池出口濃度/吸着池入り口濃度 = 0.7)程度に低下するまでは数値シミュレーションが可能であることが明らかとなったので、SVが吸着破過時間に与える影響(SV 以外は同一条件)をシミュレーションにより検討した。得られた結果は図5に示すようにSV(1/h)7.5とSV(1/h)11との間では、(流出濃度)/(流入濃度)0.7に到達する時間差は34日程度であり、さらにSV(1/h)7.5とSV(1/h)9との間では、(流出濃度)/(流入濃度) = 0.7に到達する時間差は17日程度であり、(流出濃度)/(流入濃度) = 0.7に到達後も数年にわたり吸着運転を継続するのであれば、除去率に関するかぎり問題となる時間差とは考えられない。

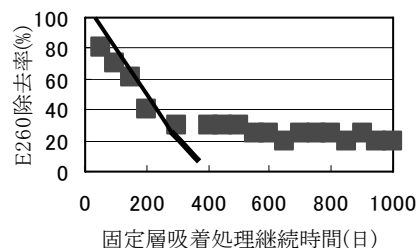


図3. 当別浄水場における固定層吸着運転結果⁷⁾のシミュレーション(SV=5/h、吸着池流入E260;0.018[1/cm])

4. 3. トリハロメタン前駆物質濃度の違いが吸着破過時間に与える影響

吸着池流入E260濃度が吸着破過時間に与える影響(E260濃度以外は同一条件)のシミュレーション結果を図6に示す。図に示すように吸着池流入E260濃度が0.02から0.04と2倍に増加する(DOC換算ではDOC1mg/Lから2mg/Lと2倍に増加することにより(E260流出濃度)/(E260流入濃度)=0.7に到達する時間はE260濃度が0.02mg/Lの場合の201日からE260濃度が0.04の場合の179日と22日早くなる。すなわち、(E260流出濃度)/(E260流入濃度)=0.7に到達する時間の比率は179日/201日=0.89となる。一方、表5に示すように凝集処理した泥炭地水の吸着処理(活性炭層高1cm)の場合は流入DOC濃度が4.5mg/Lから9mg/Lと2倍に増加することにより(DOC流出濃度)/(DOC流入濃度)=0.7に到達する時間は10時間から8時間と短くなり、(E260流出濃度)/(E260流入濃度)=0.7に到達する時間の比率は8/10=0.80とほぼ同程度の比率となる。シミュレーションの場合の吸着池流入DOC濃度が1mg/Lから2mg/Lと2倍の増加であるのに比し実験の場合のDOC濃度増加が4.5mg/Lから9mg/Lと2倍の増加であることを考えればシミュレーションと実験はほぼ同様な結果を示しているといえる。想定する浄水場原水のTOCは9mg/Lであり、凝集処理によりTOCの75%は除去可能であるので吸着池流入DOC(懸濁成分を含まないTOC)濃度は2mg/L程度となる。DOC1mg/L程度から3mg/Lと3倍に増加しても(DOC流出濃度)/(DOC流入濃度)=0.7に到達する時間はDOC1mg/Lの場合で201日、DOC3mg/Lの場合で136日と65日早くなる程度である。上述のように3年の長きにわたり同一の吸着池を(DOC流出濃度)/(DOC流入濃度)=0.7(除去率30%)程度のレベルで用いる場合には問題となるような時間差とは考えられない。

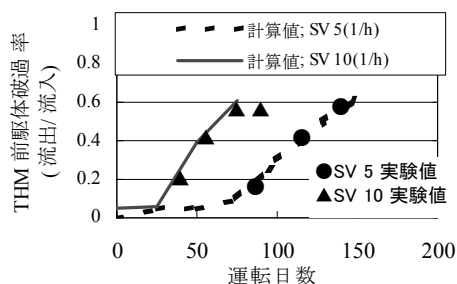


図4. 新潟浄水場における固定層吸着運転結果⁷⁾のシミュレーション(吸着池流入E260;0.018[1/cm])

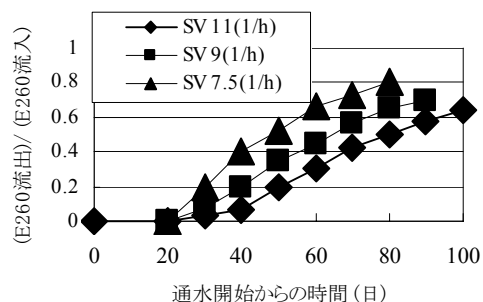


図5. SVの大小が吸着破過(流出濃度/流入濃度;0.7)に及ぼす影響(シミュレーションに用いたパラメータは表4に記載)

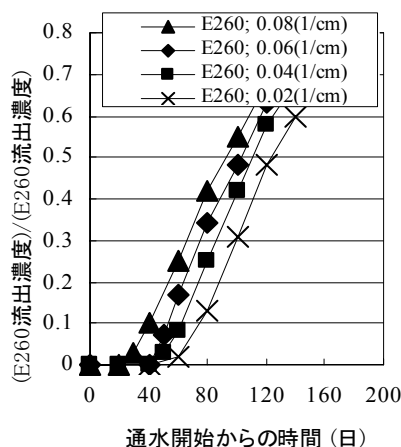


図 6. 吸着原水濃度の大小が吸着破過(流出濃度/流入濃度;0.7)に及ぼす影響(シミュレーションに用いたパラメータは当別元町浄水場の高度処理の実測値に適合する数値である ;SV = 5 (1/h))

表 5. 吸着原水濃度の大小が吸着破過(活性炭層高; 1 cm)に及ぼす影響

除去対象成分	凝集沈殿処理泥炭地水	
吸着原水濃度(mg/L)	9 (DOC mg/L)	4.5 (DOC mg/L)
70%破過(除去率 30%)に要する時間(h)	10	8
吸着原水濃度が2倍に増加した場合の活性炭寿命比率	8/10 = 0.80	

4. 4. 活性炭の種類の違い (PICABIOL;生物活性炭処理用に開発された活性炭と F300;有機物吸着用の活性炭)が運転日数に与える影響¹¹⁾

過去の実験例によれば、吸着容量の高い活性炭を用いても、高々、13ヶ月程度で除去率30%程度に低下している。生物処理機能を高めるために開発された活性炭(PICABIOL;生物活性炭処理用に開発された活性炭)と通常有機成分除去用の活性炭(F300;有機物吸着用の活性炭)がTOCの除去率と運転日数に及ぼす影響を検討した結果¹¹⁾を図7に示す。通常有機成分除去用の活性炭(F300)も活性炭細孔内の吸着座席が全て吸着飽和されたと考えられる後(250日程度以降)も、活性炭表面に付着している微生物により20%程度のTOCの除去が250日以降、長期にわたり継続している。しかしながら、

生物処理機能を高めるために開発された活性炭(PICABIOL)のTOC除去率も50日程度以降、450日に至るまでF300と同様なTOCの除去率を示し、なんら生物処理活性炭という特性を発揮していない。換言すれば通常の有機成分除去用の活性炭(F300)はTOCのC/C₀が0.8(除去率20%)に到達するまでは生物処理活性炭(PICABIOL)よりも有機物の除去率は高く(最も浄水のトリハロメタン濃度を基準値内に制御するためには、有機物の除去率を高くする必要もなく、除去率20~30%で十分な場合も多い)、かつ物理化学的機構による吸着が飽和に達したと考えられる運転日数以降の生物に由来する除去の程度も生物処理活性炭(PICABIOL)による除去の程度と比べて遜色はない。結局、原料が石炭系の一般的な活性炭であればトリハロメタン前駆物質の除去率が30%程度に到達する日数はいずれの活性炭も1年程度以内である。

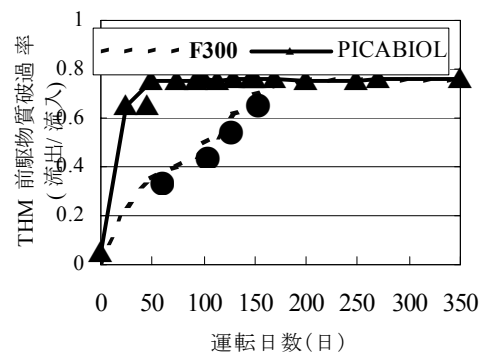


図 7. 活性炭(PICABIOL;生物活性炭処理用に開発された活性炭,F300;有機物吸着用の活性炭)の吸着容量の違いがTOCの除去率と運転日数に及ぼす影響:F300のSV;4.9(1/h),PICABIOLのSV4.2(1/h),F300の活性炭層高;1.7m,PICABIOLの活性炭層高;2m¹¹⁾)

5. E260 発現成分の生物分解性試験結果と考察

前述のように北見市広郷浄水場で稼働している吸着池におけるE260除去率は通水開始8ヶ月に30%に低下したが、以降のE260除去率の低下は緩やかで(3年後でも20%)ある⁹⁾。すなわちE260除去率が30%~20%に低下した後も生物的作用によりE260発現成分のうち、生物分解可能なE260発現成分が長期にわたり分解除去されるものと考えられる。生物活性炭処理前後の試料水を用いてE260発現成分の生物分解を促進するために時々攪拌のみを長期間継続した結果を図8に示す。図8に示すように、生物活性炭処理後の試料水のE260除去率は56日後も数パーセント以下である。一方、生物活性炭処理前の凝集沈殿水のE260除去率は25%程度に達し、実際の大型吸着筒における運転結果と、ほぼ一致している。北海道空知郡北村の浅井戸水を用いてE260発現成分の

生物分解を促進するために時々の攪拌のみを長期間継続した結果の1部を図9に示す。図に示すように初期 E260 の 30%程度が除去されている。したがって、固定層活性炭吸着において物理化学的作用に基づく吸着が飽和に達しても、原水 E260 の 30%程度は生物分解などの作用により除去されると考えられ、実際のプラント運転の結果と一致する。

6. 浄水場の平均原水設定 TOC が 8mg/L[E260(1/cm)=0.160]の場合、目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L を達成するために必要な吸着除去率

より経済的な吸着池の設計、維持管理のためには、目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L を達成するために必要な吸着除去率を明らかにしておくことが必要である。浄水場流入原水の E260(1/cm)を x, 凝集による除去率を a, 凝集後の E260(1/cm)を y, 吸着による除去率を b, 吸着後の E260(1/cm)を z とすれば次式が成り立つ。

$$x - a \times x = y \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$y - b \times y = z \quad \dots \dots \dots (6)$$

浄水場の平均原水 TOC の設定値は 9mg/L[E260(1/cm)=0.180]であれば、式(5),(6)より凝集と吸着により除去される E260(1/cm)量はそれぞれ 0.135, 0.013 となり浄水の目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L を達成することになる。すなわち、図 10 に示すような手順により、に凝集除去率が 75%、吸着除去率が 30%であれば浄水の E260(1/cm)は 0.035 となり、図 11 に示すような E260 とトリハロメタン生成能との相関図より目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L の達成が可能である。凝集除去率が 70~65%の場合は図 12 に示すように 40~25%の吸着除去率が目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L の達成のために必要である。一般的には凝集沈澱除去率は図 13 に示すようなパターンであるが、当別浄水場の場合は流入原水の E260 が変動してもほぼ 75%以上の凝集沈澱除去率を維持している。したがって、吸着除去率が 20%程度以下に低下しても浄水の目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L の達成が可能であると予想される。今後、E260 の由来によらず図 12 に示すような関係を求めておけば、将来、例えば当別川水の E260 がダム貯水により変質しても浄水の目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L を可能にするための凝集除去率と吸着除去率を迅速に求められる。

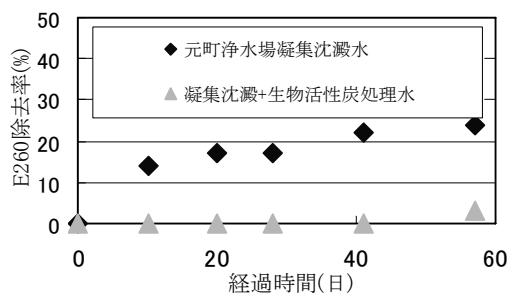


図 8. 北海道空知郡北村浅井戸水の貯留中における E260 変化

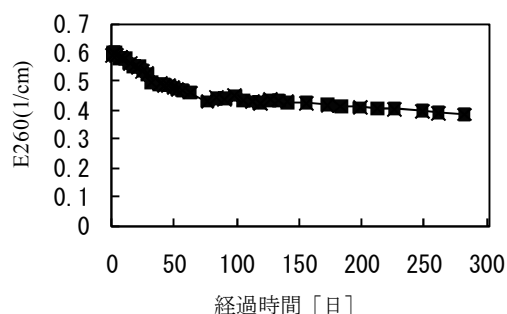


図 9. 貯留泥炭地水の E260 変化

1. 原水 E260 < 0.2(1/cm)
原水 TOC < 10 (mg/L)
- ↓
2. 凝集除去率が 75%であれば凝集処理水
E260 < 0.05(1/cm)に到達可能である
- ↓
3. 吸着除去率が 30%であれば吸着処理水
E260 < 0.035(1/cm)に到達可能である
- ↓
4. 吸着処理水の E260 < 0.035(1/cm)
であればトリハロメタン生成能 < 0.035(mg)
の達成が可能である

図 10. 浄水場流入設定平均 TOC = 9mg/L[原水 E260= 0.180(1/cm)]の場合、目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L を達成するために必要な限界吸着処理水質

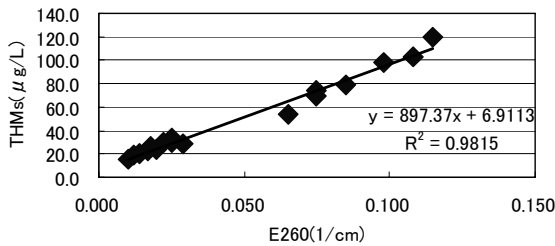


図 11. トリハロメタン生成能と E260 の関係

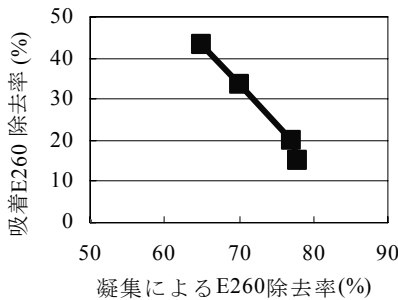


図 12. 浄水場流入最大設定 TOC = 9.4mg/L[原水 E260= 0.188(1/cm)]の場合、目標トリハロメタン生成能 0.035mg/L を達成するために必要な凝集除去率と吸着除去率の関係

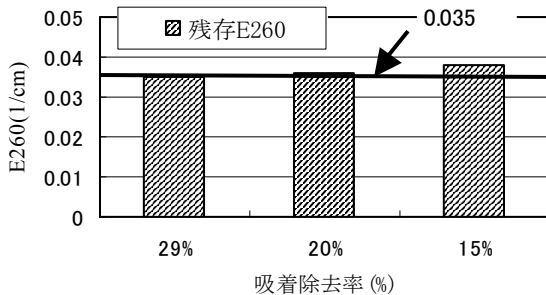


図 13. 凝集除去率 75%におけるトリハロメタン生成能 0.035mg/L (E260(1/cm)=0.035)を達成するために必要な限界吸着除去率

7. 結果の要約と結論

- (1) Rosen の近似解式を用いた計算値と北見市広郷浄水場で移動している吸着池における実測値とのカーブフィティング(curve fitting)により得られたパラメータは異なる地域の吸着運転のシミュレーションにも有効であることを明らかにした。
- (2) 凝集処理を前段におく通常の吸着原水の場合はシミュレーションの結果、(E260 処理水濃度)/(E260 流入水濃度)が 0.7(除去率 30%)程度に到達する時間

は長くても 12 ヶ月程度である。最も物理化学的機構による吸着容量の低い活性炭は運転開始後、1 ヶ月程度で除去率 30%程度に低下するので、吸着容量の大きい活性炭が吸着容量の小さい活性炭に対して優位を保てるのは最長 7 ヶ月程度で、運転開始 7 ヶ月程度以降の THM 前駆物質の除去は初期吸着容量(物理化学的機構による吸着容量)の大小の違いに依存しない。

- (3) (E260 処理水濃度)/(E260 流入水濃度)が 0.7(除去率 30%)程度に到達以降も継続する除去率 30-20%程度の除去率は生物処理などによるものと考えられる。
- (4) 浄水場流入水のトリハロメタン前駆物質(E260 発現成分)の 75%程度は凝集処理により除去できるので、E260 吸着除去率 30%、および 20%程度の固定層吸着処理で目標トリハロメタン生成能 0.035(mg/L)を達成可能な浄水場流入水の E260 発現成分の上限値はそれぞれ、0.184(1/cm)[DOC 9.2mg/L]、0.16(1/cm)[DOC 8.0 mg/L]となる。

謝辞：本研究を実施するに際し、当別町および石狩西部広域水道企業団の協力を頂いた。シミュレーションのためのコンピュータプログラムの運用については、荏原エンジニアリングサービス(株)、榎田則夫 薬品技術部長、柳澤浩次郎 主任の協力を得た。記して謝す。

参考文献：

1. J.B.Rosen: J.Chem.Physics, Vol.20, No.3 (1952)
2. 安武重雄,小林康正：水処理における活性炭固定層吸着破過曲線のシミュレーション,荏原インフィルコ時報第 99 号 (1994)
3. Tambo, N and Kamei, T., Evaluation of Extent of Humic-Substance Removal by Coagulation. In Influence on Fate and Treatment of Pollutants; Ed.; Suffet. I.H and M. Patrick: American Chemical Society (1989)
4. Kamei, T., Matsui, Y., Wang, Y., Osako, N., Tambo, N. Simple, quick, and accurate surrogate water quality parameters for universal water quality management. Proceedings of Asia-Pacific Conference on Sustainable Energy and Technology, 17-24, Singapore, (1996)
5. 北見広郷浄水場見学会資料 (2006)
6. 石狩西部広域水道企業団「高度処理実験経過報告」(2005)
7. 佐藤, 他：新潟市における高度浄水処理実験,第 51 回全国水道研究発表会, pp.192- 193 (2000)
- 8.Tambo.N and Kamei, T. Water quality conversion matrix of aerobic biological processes Journal of the Water Pollution Control Federation, 52(5), (1980)
- 9.Tambo, N., Kamei, T., The Behaviors of Refractory Metabolites from Aerobic Biological Processes The 2nd World Congress of Chemical Engineering(Montreal), p.1-8, (1981)

90. 丹保憲仁, 亀井翼, 高橋正宏. 好気性生物化学プロセスからの代謝産物の挙動と性質 (IV) —代謝産物が基質除去速度に及ぼす影響—下水道協会誌, 19(213), (1982)
11. Mark A. Carlson, et al., Comparing two GACs for Adsorption and Biostabilization, Jour. of AWWA, Vol.86, No.3, pp.91- 102 (1994)