

B-4 トリハロメタン (THM) 生成に及ぼす配水管網構造の影響

大阪大学基礎工学部

○ 大塚健太郎

大阪大学大学院基礎工学研究科

芝 定孝

大阪大学大学院基礎工学研究科

平田 雄志

大阪大学大学院基礎工学研究科

喜多 知浩

摂南大学工学部

八木 俊策

1. はじめに

近年、河川、湖など水の汚染問題は勿論ではあるが、特に上水道供給システム内での水質の悪化が問題視されている。なかでもトリハロメタン (THM) は発ガン性を有し、濃度規制を必要とする物質に指定されている。トリハロメタンは水道水の浄水処理過程において投入される塩素と水中の有機物とが反応して生成される。ところが、配水中において規定の残留塩素を確保する必要があり、配水管網中での生成は避けられない。一方、配水管網構造は配水管中の水理的条件を支配し、THM 濃度、生成量に影響を与える。そこで、本研究では上水道供給システム内の配水管の管網の単位ユニットを取り上げ THM を水質保全の指標とし、各引き出し点における THM 濃度予測のモデルを組み立てた。そして、THM 濃度のモデルシミュレーションにより流量解析及び反応解析を行うことにより、配水管網構造が THM 生成に及ぼす影響について検討した。本研究は、THM の制御、地域差による水質格差の解消を第一の目標として水質保全に重点を置いた管路設計の指針へアプローチするものである。

2 シミュレーションモデル

2-1. 管網計算

管網は一般に、区域をカバーする流体輸送施設として、安全性、経済性を考慮し網目状に構成されている。網目状管網における流量・圧力計算にはコンピュータを用いた近似計算法である、Hardy-Cross 法を用いた³⁾。

2-2. 管内 THM 濃度の計算

管網中の 1 本の配水管に関して、管内での物質移動及び反応の支配方程式は (1) 式に示す拡散方程式で表すことができる。上水道配水管中では拡散方程式に表される拡散の効果は移流の効果に関して非常に微小であり、管流れを (2) 式の様に栓流と仮定した濃度予測が可能となる²⁾。また、管路の流れの定常状態での THM 濃度を求めることから、時間変化項を削除し (3) 式で表せる。(3) 式は配水管流れの方向の長さの一次の常微分方程式であり、滞留時間 (4) 式を導入すると (5) 式で表せる。管出口での THM 濃度予測計算には常微分方程式の数値解法である Runge-Kutta-Gill 法を用いた。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C_i}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + R_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C_i}{\partial x} = R_i \quad (2) \quad \bar{u} \frac{dC_i}{dx} = R_i \quad (3)$$

$$\theta = x/\bar{u} \quad (4) \quad \frac{dC_i}{d\theta} = R_i \quad (5)$$

$$C_{out} = \frac{\sum Q_n C_n}{\sum Q_{out}} \quad (6)$$

2-3. 節点 (node) 濃度の計算

管網内での節点 (node) では瞬間的に完全な混合が行われるとすると、物質収支式を用いて節点の出口濃度は (6) 式で与えられる。但し、 C_n は管内の前段階位置における濃度 (管出口濃度) であり、 C_{out} は次段階の管内の初期濃度 (管入口濃度) を示す。

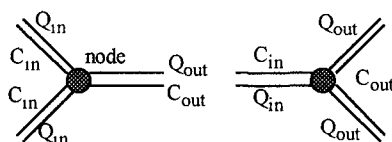


Fig 1 節点における混合

2-4 トリハロメタン生成モデル

トリハロメタンは原水中に存在する有機物である腐食物質フミン酸、フルボ酸と塩素が反応し生成される。トリハロメタン生成は塩素の多段階反応である。しかし、その反応過程の複雑さ故、解明されていない点が多い。近年、トリハロメタン反応生成モデルは多く研究がなされ発表されている。本研究では以下に示す拡散方程式の反応項に適応可能な Adin の THM 生成モデルを使用した¹⁾。

Adin の THM 生成モデルを Fig.2 に示す。フミン化合物 S と塩素が即座に反応して有機塩素体 A になる。反応過程 S→A は他の反応過程に比べ速いためフミン化合物 S の濃度と有機塩素体 A の濃度は等しいとする。有機塩素体 A は有機塩素体 B と副生成物 D に分解する。さらに、有機塩素体 B はトリハロメタンと副生成物 E に分解する。反応は不可逆的に進行するとした。各々の反応は塩素が関与して Table 1 に示す様に進行する。各反応定数は Table.1 に示した。

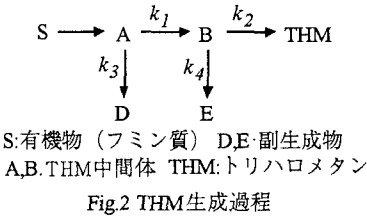


Table.1 各反応過程と反応定数

$A + Cl_2 \rightarrow B$ (k_1)	$k_1 \cdot 4.38 \times 10^{-8} (\mu g L^{-1})^{-1} min^{-1}$
$B + Cl_2 \rightarrow THM$ (k_2)	$k_2 \cdot 11.36 \times 10^{-7} (\mu g L^{-1})^{-1} min^{-1}$
$A + 2 Cl_2 \rightarrow D$ (k_3)	$k_3 \cdot 7.14 \times 10^{-13} (\mu g L^{-1})^2 min^{-1}$
$B \rightarrow E$ (k_4)	$k_4 \cdot 0.19 min^{-1}$

2-5. 対象となる管路モデルと操作変数

Fig.3 に示すような網目状管網の基本的となる閉管路モデルをシミュレーションの基本モデルに使用する。シミュレーションモデルは供給点を1ヶ所、水の引き出し点A,B,Cを3ヶ所持つ管長200m、管径0.4mの4本の管路で構成された閉管路である。また、Fig.4に示した基本モデルに補助管を組み込んだモデルal-e2についてシミュレーションの対象モデルとした。

また、操作変数を管路形状（モデル）、補助管の管径、引き出し点での流量（引き出し流量）として各引き出し点A,B,CにおけるTHM濃度を予測計算することで管路網の配置構成の水質に対する影響、効果を考察した。

本研究では、各成分の初期濃度はフミン酸を150μg/L、塩素を150μg/Lとた。また、供給点をTHM生成反応開始時間とした。

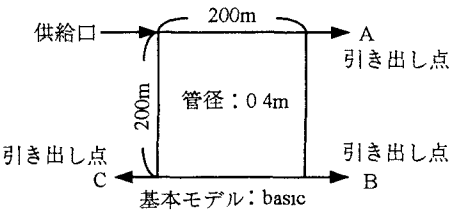


Fig.3 シミュレーションの基本モデル

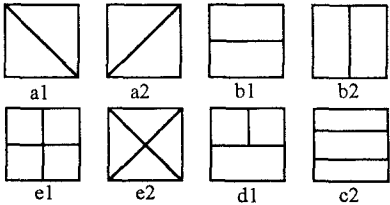


Fig.4 補助管を組み込んだシミュレーションモデル

3.結果と考察

前述の操作変数を以下に示す3通りの操作基準にもとづいて、各引き出し点における濃度を予測した。

1) 引き出し流量を一定とし、管径を同一としたとき管路形状（モデル）の違いによるそれぞれの引き出し点におけるTHM濃度の検討。

THM濃度、生成量は反応開始時間を供給点とした場合、引き出し点までの水の管内での滞留時間に依存する。すなわち、管内流速をできるだけ大きく保つ管路構造がTHMの生成を抑制する。管内流速は引き出し点における供給流量と管径に依存している。つまり、管路を長くしたり、管の本数を増加させることで流量を細分化し水の管内滞留時間を増加させることはTHM濃度、生成量の増加につながるといえる。シミュレーション結果においても管長の大きいモデル、管の本数の多いモデルにおいてすべての引き出し点においてTHM濃度の増加を確認することが出来た。

2) 引き出し流量を一定とし、それぞれのモデルについて補助管径を変化させたときの管路構造全体の生成する THM 量の比較

供給量を $0.6\text{ m}^3/\text{s}$ 、引き出し量を各点 $0.2\text{ m}^3/\text{s}$ として、それぞれ補助管の管路長、本数の異なるモデル a1, b1, c1, e1, e2 について補助管の管径を変化させた。その際、閉管路構造全体で一定時間に発生する THM の生成量を Fig.5 に示す。いずれのモデルについても管径を小さくすることで THM 生成量が抑制されることが分かる。また、モデルの違いによる水質の格差 (THM 生成量の違い) を小さくすることが出来た。幹線管径 0.4 m に対して補助管路 $0.1\sim 0.3\text{ m}$ 間ではモデルによる THM 生成量の大小関係は一定に保たれているが、補助管径が 0.4 m 以上となるとモデルにより THM 生成量の大小関係に変化が見られる。その理由として、補助管径を変化させたことにより管路構造内で水理的な流れの変化が起きたためと考えられる。つまり、補助管径を幹線管路以上にすることで、一定方向で流れていた管路内の水流にその方向と流量が変化する事がモデル a1, e1 において確認された。補助管径を変化させる事で管路内の水の滞留時間を変えるだけでなく、管を流れる水の方角をも変化させ、引き出し点での水質をコントロール出来ることが分かった。

3) それぞれのモデルについて管径を同一にし、各引き出し点における流量を変化させたときの水質に対する影響を検討

各モデル basic, a1, a2, b1, b2, e1, e2 について幹線管径 0.4 m 、補助管径 0.2 m として引き出し点 B の流量を $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ とし引き出し点 A, C の流量を $0.1\sim 0.4\text{ m}^3/\text{s}$ を変化させる。その流量変動に対する引き出し点 B での THM 濃度を Fig.6 に示した。引き出し点 A, C での流量の変動が引き出し点 B の水質に変化を来している。引き出し点 A の流量と引き出し点 B の流量の比 Q_A/Q_C を一定時間に $0\sim 1$ まで変動させたとすると、その一定時間に引き出し点 B において生成した THM 量は Fig.6 の変動曲線の積分値で示すことが出来る。Fig.7 では変化時間を 1 h として引き出し点 B において生成した THM 量を示した。ここで補助管無しとしたモデル (basic) よりも THM 生成量が小さいモデルが存在する。中でもモデル b1 が最小値を示した。つまり、引き出し点 B の流量変動に対する水質の保身に重点を置いた場合、モデル b1 の様に補助管を組み込むことで引き出し点 B の水質の安定性が増大し、すなわち THM 生成が抑制されたことが分かる。

【参考文献】

- 1) A. Adin, J. Katzhendler, D. Alkaslassy and Ch. rav-Acha "Trihalomethane formation in chlorinated drinking water: A kinetic model", *WATER RESEARCH*, 25(7), July, 1991, pp.797-805
- 2) 喜多知浩, "拡散モデルに基づく送水管内のトリハロメタン生成量の予測", 大阪大学大学院基礎工学研究科, 修士論文, (1997)
- 3) 日本機械学会編, "管路ダクトの流体抵抗", 日本機械学会, (1979)

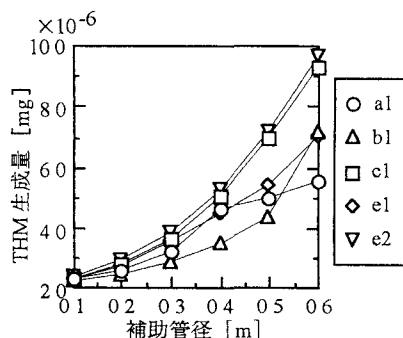


Fig.5 補助管径のTHM生成に対する影響

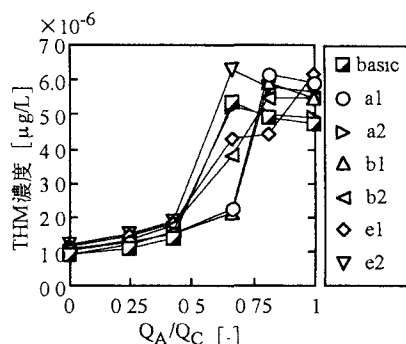


Fig.6 引き出し点BにおけるTHM濃度

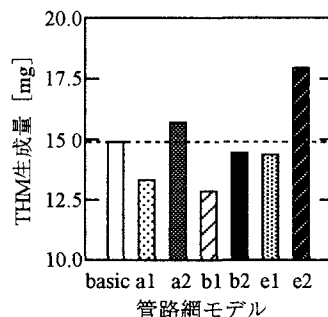


Fig.7 引き出し点BでのTHM生成量 (1h)