

# 配水管網における 汚染物質拡散状態解析

窪田真和\*、黒谷憲一\*、守本正範\*\*

\* ㈱富士電機総合研究所

東京都日野市富士町1

\*\* 富士電機株式会社

東京都渋谷区代々木3丁目25番3号

## 概要

配水管網内で赤水のような汚染が発生した場合、汚染地域がどのように広がっていくか明らかになれば、有効な対策を立てることができる。そこで残留塩素濃度解析の方法を応用し、汚染拡散の時間的変動を解析する方法を開発した。

管網計算により配水管網内の管路流量の分布を求め、需要量の変動による管路滞留時間の変動を計算する。汚染の発生した地点から滞留時間により管網内を汚染物質がどのように移動し、汚染地域が広がるかを汚染物質の濃度変化を計算することにより求める。得られた結果は管網モデル図上に表示する。計算例により、その有効性を示す。

## キーワード

配水管網 赤水 水質解析 汚染拡散 管網計算 水質等高線

## 1. はじめに

最近では、上水道における水質に対する関心が高まってきており、筆者らはこれまでに配水管網における残留塩素濃度の解析方法、および塩素注入点における注入量制御の方法を開発してきた。<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>これは残留塩素の減少特性を考慮して配水管網の残留塩素濃度分布の時間変動を計算し、これを用いて塩素注入点での注入量を最適化するものである。ここでは、配水管網内の汚染物質の拡散状態の解析にこれらを応用した。

配水管網内のある地点で赤水のような汚染が発生した場合に、発生地点ならびにその汚染物質の拡散状態や汚染の拡散する地域を特定することは困難である。そもそも、発生したこと自体、需要家からの苦情によりわかるのが実体であろう。

そこで、汚染が発生した場合に汚染物質の到達時間、拡散地域がわかれば、汚染地域を最小限に抑えるための弁の操作、それによる断水地域の特定が可能となり、有効な対策をたてることができる。

汚染物質の拡散には管内の移動時間が大きく影響を及ぼすので、管網計算を基本として、需要量の時間変動を考慮した汚染物質の拡散状態を解析する方法を開発した。

2. 基礎方程式

2. 1 汚染拡散方程式

管路内の汚染拡散は1次元流れとして、一般に次のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} = K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + q - k \cdot C \quad \dots\dots\dots ①$$

ここに C : 汚染物質の濃度、v : 平均流速、t : 時間、x : 管軸方向の距離、K : 拡散係数、q : 汚染物質の発生濃度、k : 濃度に比例した減少係数である。

ただし、汚染物質は残留塩素のように管路内で減少することはないので k = 0 とする。

平均流速と管内流量 Q との関係は管内径を D として次の関係となる。

$$v(t) = 4 Q(t) / \pi D^2 \quad \dots\dots\dots ②$$

2. 2 管路内での汚染物質の移動

①式で拡散の項を無視すると (K = 0)、汚染物質の移動のみの現象解析となる。①式で K = 0 とおき、また x = x<sub>0</sub> の地点でのみ汚染が発生するものとする次のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} = q(t) \cdot \delta(x - x_0) \quad \dots\dots\dots ③$$

δ は Dirac のデルタ関数である。

③式は、

$$\frac{dx}{dt} = v \quad \text{上において、}$$

$$\frac{dC}{dt} = q(t) \cdot \delta(x - x_0) \quad \dots\dots\dots ④$$

となる。

したがって、

$$l = \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) dt \quad \dots\dots\dots ⑤$$

として x = x<sub>0</sub> + l において、

$$C(t_0 + T) = q(t_0) \quad \dots\dots\dots ⑥$$

となる (図 1)。

同様にして図 2 のような単一の管路で接続されている上下流 A、B 間の濃度の関係は次式で表される。

$$C_B(t) = C_A(t - t_s) \quad \dots\dots\dots ⑦$$

ここに、t<sub>s</sub> は A、B 間の滞留時間である。t<sub>s</sub> は区間の長さを L とすると②、⑤から次のような関係にある。

$$\int_{t_1}^{t_1+T} Q(\tau) d\tau = \pi D^2 L / 4 \quad \dots\dots\dots ⑧$$

流量 Q(t) = Q<sub>0</sub> で一定であれば、

$$t_s = \pi D^2 L / 4 Q_0 \quad \dots\dots\dots ⑨$$

となる。

2. 3 合流点での濃度計算

一般に配水管網は複雑な網目状をなしており、分岐・合流点が多くある。図 3 のように複数の流入管が接続する合流点においては完全混合するものとして次式

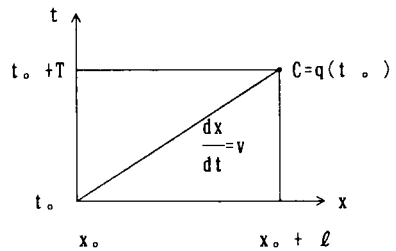


図 1 x - t 平面での拡散

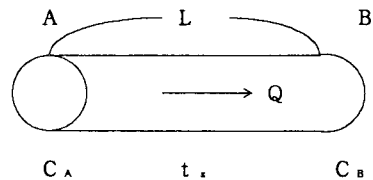


図 2 単一管路

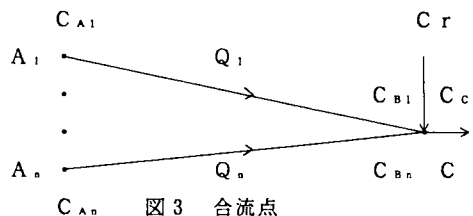


図 3 合流点

で計算する。

$$C_c(t) = \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot C_{B_i}(t)) / \sum_{i=1}^n Q_i + C_r \quad \dots\dots\dots ⑩$$

ここでn：節点Bへの流入管の本数、 $Q_i$ ：流入管iの流量、 $C_{B_i}$ ：⑦式によって計算される流入管iの下流側濃度、 $C_r$ ：節点における汚染発生濃度である。

### 3. 解析方法

#### 3. 1 管路流量の時間変動

管網計算を用いて、初期状態での各管路の流量を計算する。流量の時間経過を計算するには、計算時間間隔ごとに管網計算を行う。しかし管網計算は計算に時間を要するので、次のようにみなせる場合は初期状態での管網計算のみでよい。

配水管網の需要量変動は一般に個々の需要点の時間変動ではなく全体の変動を考え、個々の需要点の需要量は異なるが、時間的な変動は全ての需要点で同一の変化を示すものとする。このように考えれば初期状態で計算された各管路の流量に時間変動の係数を乗じれば各管路の流量の時間変動は計算できる。

#### 3. 2 汚染物質濃度の時間変動

管網内の各節点での濃度の計算は流向に沿って上流から下流に順次計算する必要がある。しかし、流向が変わる場合には、計算時間間隔ごとに管経路の探索が必要となり、計算に時間がかかる。そこで次のような手順で計算する。

(1)管網計算により得られた流量から各管路の滞留時間t<sub>0</sub>を計算する。流向と管の接続状態から節点の直上流の管・節点はわかる。

(2)計算の初期値として汚染発生点では、その時間の濃度を設定する。その他の節点の濃度はゼロとする。

(3)管路ごとに管の上流側節点の滞留時間前の濃度を管路の下流側の濃度とする。計算の時間間隔と滞留時間は一般に一致しないので、滞留時間前より過去の直前の計算時間の濃度を用いる。

(4)節点ごとに⑩式により、流入管下流側の濃度、流量から流出管上流側濃度を計算する。

この方法では管の上流側の濃度が決定されないと管の下流側の濃度は決定できないが、(3)(4)を繰り返し計算すれば汚染発生点に近い節点から順に全節点の濃度は決定される。繰り返し計算の回数は経路の深さの最大値以下となる。

このようにしてある時間における全節点の

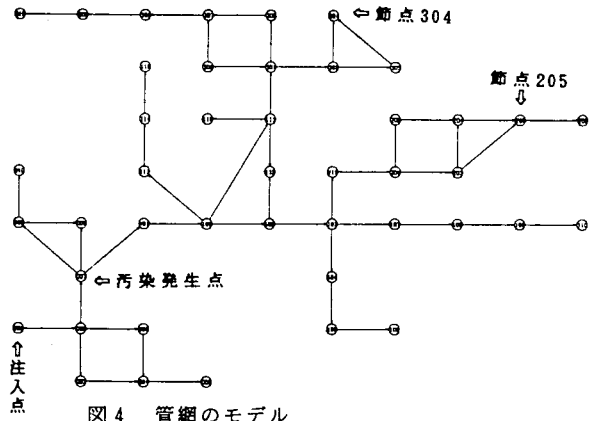


図4 管網のモデル

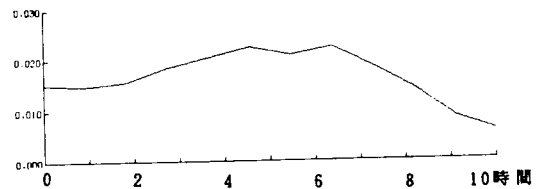


図5 需要量の時間変動

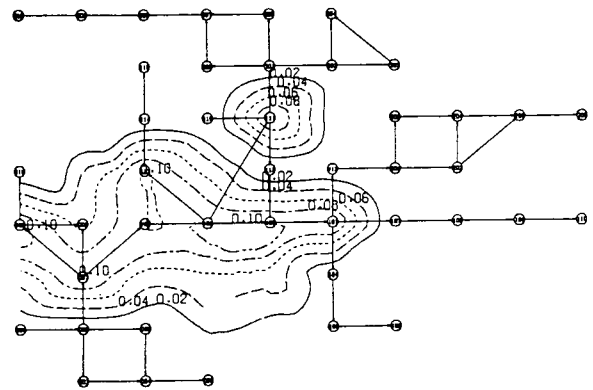


図6 1時間後の濃度等高線

濃度が計算できる。これを、計算時間間隔ごとに計算終了の時間まで繰り返す。

複数の点において汚染が発生したような場合にも、上記の計算方法で対応できる。

#### 4. 計算例

図4の管網で、赤水が発生した場合について計算した。節点007に2時間0.1PPMの汚染が発生したものとす。管網の需要量は図5のように時間変動し、各々の需要点での需要量はこれに比例するものとする。計算開始からの時間経過を図6に1時間後、図7に2時間後、図8に3時間後の汚染物質の濃度等高線を示す。図から管網内で汚染物質の移動していく様子が明らかになる。ただし、各節点下流側の濃度をもとに等高線を描いているので節点下流側以外の管路上のポイントの濃度を正確に表してはいない。

図9に節点205と304の濃度の時間変化を示す。この図から管網内の節点における汚染発生からの到達時間がわかる。節点205、304へは3つの経路があり、それぞれの経路の滞留時間が異なるために汚染の継続時間が発生地点の2時間よりも長くなる。また濃度も滞留時間の違いにより異なる濃度の水が混合しているために発生地点の濃度よりも低くなる時間があることがわかる。

#### 5. おわりに

配水管網内での赤水等の汚染物質の拡散状態を解析する方法を開発した。今後はこれを解析システムとしてブラッシュアップすると共に、実プラントでの有効性を検証したい。さらに、汚染発生時の有効な対策、制御方法の開発を図ってきたい。

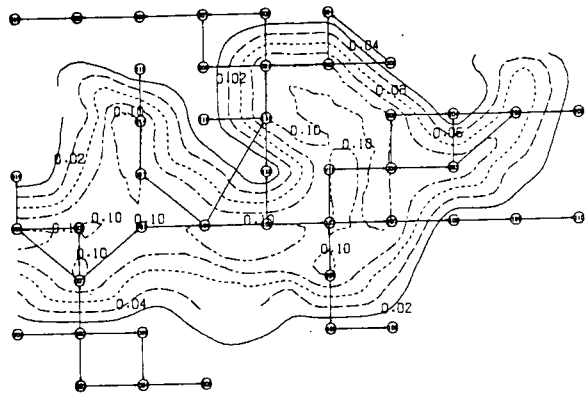


図7 2時間後の濃度等高線

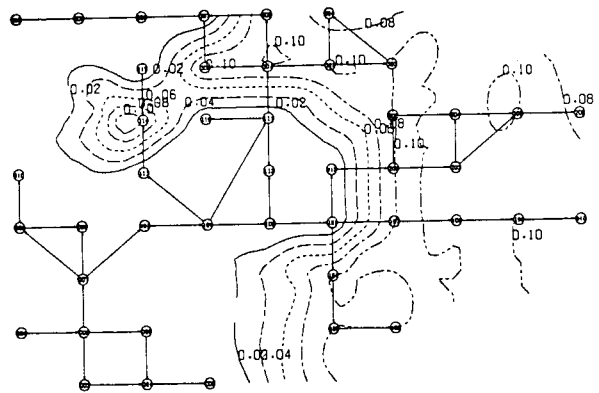


図8 3時間後の濃度等高線

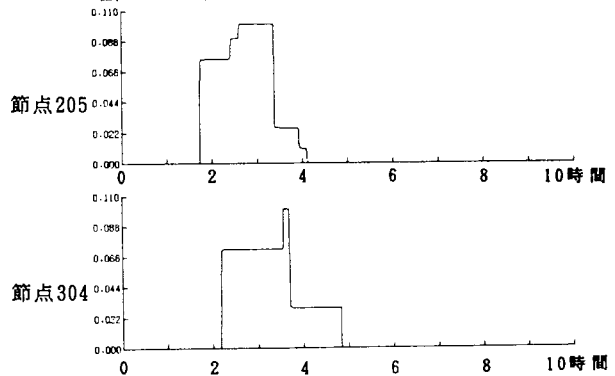


図9 汚染濃度の時間変動

#### 参考文献

- (1) 黒谷、窪田他(1989)：配水管網の動的な水質解析と塩素注入量制御、第3回水システム自動計測制御国内ワークショップ論文集、PP 119-122
- (2) 黒谷、窪田他(1990)：DYNAMIC ANALYSIS CONCERNING WATER QUALITY IN DISTRIBUTION NETWORKS AND ADVANCED CONTROL FOR CHLORINE INJECTION、Proceeding of the 5th IAWPRC Workshop、pp601-608
- (3) 黒谷、窪田他(1990)：配水管網における水質変化特性を考慮した塩素注入制御の最適化、第41回全国水道研究発表会、PP 423-425
- (4) 黒谷、窪田他(1991)：配水管網の残留塩素濃度解析システム、第42回全国水道研究発表会、PP 414-416