

# 配水管網の赤水の発生に関する解析と 拡散シミュレータの開発

The Analysis of Occurance of the Red Water  
and Development of Simulator for Diffusion  
at Water Distribution Pipe Network

窪田 真和、黒谷 憲一、秋山 浩秀、守本 正範  
Masakazu KUBOTA Ken-ichi KUROTANI Hirchide AKIYAMA Masanori MORIMOTO

富士電機株式会社  
東京都日野市富士町1  
Fuji Electric Co., Ltd.  
Fuji-machi 1, Hino-city TOKYO 191 JAPAN

## Abstract

Effective counter measures can be taken if it is known how the pollution region evolves when pollution such as red water is generated in a distributing pipe network. Therefore, we have developed a system that simulates temporal changes, in contaminant dispersion. Through dynamic pipe network calculations, made by considering changes in demand and the opening and closing operation of valves, the flow-rate dynamics within the pipes can be established, thus allowing the time changes in the water remaining stagnant in the pipes to also be calculated. The area the contaminant spreads to (the path water moves within the pipe network from the source of contamination) is established by measuring changes in the concentration of contaminant particles in the water. The information gained is displayed on a pipe network diagram in a color graphic display. We also discuss the conditions for generation of red water and perform the pipe network calculation using actual contamination data caused by fire fighting.

**Key words :** red water, contamination diffusion, simulator, graphical user interface

## 1. はじめに

水道水質をとりまく環境は厳しさを増しており、水質基準の改訂や水道水源保全法の成立など水質新時代を迎えている。そこでは、水質のモニタリングと高度な水質コントロールが必要となる。水質コントロールを行う上で、水質の挙動、とりわけ複雑な管網内での挙動の把握が重要であり、シミュレーション技術が有効となる。

配水管網内で赤水のような汚染が発生した場合には、

この汚染を取り除くために水道関係者の多大な労力を必要とし、さらに排水することにより浄水が無駄に消費されることになる。ここで、配水管網内で汚染が発生した場合に汚染水の到達時間や、汚染地域がどのように広がっていくかが明らかになれば、有効な対策を立てることができ、汚染水の排除の敏速な対応、水道事業者の労力の軽減、捨水の減少につながる。

汚染水の拡散には管内の水の移動が中心的役割を果たす。そこで、管網計算をもとに、需要量の時間変動によ

る管路流量の変動を計算し、汚染の発生した地点から汚染地域が時間的にどのように広がるかを汚染水の移動を追うことにより求めるシミュレータを開発した。シミュレーション結果はカラーグラフィックディスプレイの画面にわかりやすい形で表示する。管網を汚染が拡散していく様子をアニメーション的に確認できる動画モードと、シミュレーションで弁の開閉などの対策を対話的に行ってその結果を確認できる対話処理モードを設けている。

一方、汚染の拡散を計算するための元になる汚染発生地点の特定は一般的に困難である。そこで、過去の消火活動に伴う赤水発生時の事例について管網計算を行い、消火時と平常時の管路内での流速の変化をシミュレーションにより解析した。

## 2. 赤水拡散の基礎方程式

### 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。

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

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、汚染物質は管路内で減少することはないので  $k=0$  とする。さらに、水の移動速度vに対し、拡散の速度は十分に小さいと考えられるので拡散係数Kを無視し、 $K=0$  とすると 式のように汚染物質の移動のみの式となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + q \dots\dots\dots(2)$$

ここで、Q：管路流量、A：管断面積である。節点の汚染濃度だけでなく各管路上の汚染濃度を計算するために管路を等間隔に分割し、分割した各管路の濃度を計算する。(2)式の流れの方向を考慮して差分化して表すと(3)、(4)式となる。これを図1に示す。

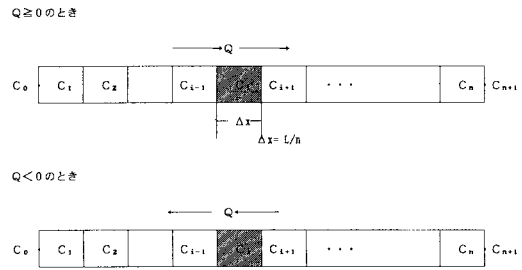


Fig. 1 The method of calculation for concentration in divided segments

$$Q \geq 0 \text{ のとき} \\ \frac{\Delta C_i}{\Delta t} = -\frac{Q}{A \cdot \Delta x} (C_i' - C_{i-1}') + q_i \dots\dots\dots(3)$$

$$Q < 0 \text{ のとき} \\ \frac{\Delta C_i}{\Delta t} = -\frac{Q}{A \cdot \Delta x} (C_{i+1}' - C_i') + q_i \dots\dots\dots(4)$$

$\Delta x$  : n 等分した区間の長さ、 $\Delta t$  : 計算時間間隔、  
 $C_i$  : i 区間の濃度、 $C_i = C_i(t) - C_i(t - \Delta t)$ 、  
 $C_i' = C_i(t - \Delta t)$

### 2.2 合流点での濃度計算

図2に示すような管路の合流点では完全混合するものとする。(5)式に示すように上流側の各管路の最下流点の汚染濃度を各管路の流量で加重平均して、合流後の汚染濃度を計算する。

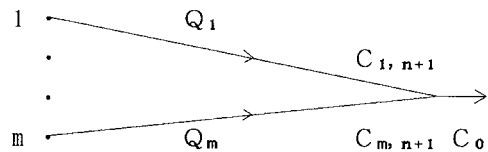


Fig. 2 The confluence point

$$C_0 = \frac{\sum_{k=1}^m Q_k \cdot C_{k, n+1}}{\sum_{k=1}^m Q_k} \dots\dots\dots(5)$$

### 2.3 管路分割数の決め方

計算の安定条件から管路分割数 n は次の条件を満たす必要がある。

$$n < T / \Delta t \dots\dots\dots(6)$$

ここで、T：汚染が管内に滞留している時間である。そこで、管路分割数 n を(7)式を満たす最大の整数にとる。

$$n \leq \frac{T_{\min}}{\Delta t} \dots\dots\dots(7)$$

$T_{min}$  はその管路の最小滞留時間で、(8)式のように計算する。

$$T_{min} = \frac{\pi}{4} D^2 L / Q_{max} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $Q_{max}$  : 管路最大流量、 $D$  : 管口径、 $L$  : 管路長さである。

$$\frac{T_{min}}{\Delta t} \leq 1 \text{ のとき}$$

$$n = 0 \quad C_0 = C_1$$

(7)式に示すように、管路分割数  $n$  は最小滞留時間  $T_{min}$  ひいては(8)式の最大流量  $Q_{max}$  に依存する。弁の開閉の操作を行う時は、操作後の各管路の流量を改めて計算し直す。よって、操作後の最大流量が操作前の最大流量より大きくなってしまふ場合がある。この時、弁操作前の分割数で計算すると  $n$  は(7)式を満たす整数にとっているため、(6)式の安定条件を満たさない。よって、計算が不安定になってしまうおそれがある。これを防ぐには、(6)式の安定条件を満たすように分割数  $n$  を小さくするか、もしくは計算時間間隔  $\Delta t$  を小さくすればよい。管路分割数  $n$  を小さくした場合には計算結果を間引くことになるので(つまり管路内の分割が粗くなる)、ここでは計算時間間隔  $\Delta t$  を短くする。そこで、このように弁操作後の最大流量が操作前の最大流量よりも大きくなるような管路に限って弁操作後は計算時間間隔  $\Delta t$  を短くして(3)式または(4)式により汚染濃度の計算を繰り返す。

例えば、弁操作によってその管路での最小滞留時間が  $T_{min}$  から  $T_{min}'$  に変わったとする。  
 $(T_{min}' = a \cdot T_{min} \ (0 < a < 1))$  これにより(7)式の  $T_{min}$  が  $T_{min}'$  に置き変わるので、(9)式を満たすことが計算安定の条件となる。

$$n \leq \frac{T_{min}'}{\Delta t} = \frac{a \cdot T_{min}}{\Delta t} \dots\dots\dots(9)$$

$0 < a < 1$  であるから、分割数  $n$  を弁の操作前後で変えることなく(9)式を満たすには、計算時間間隔  $\Delta t$  を(10)式にて  $\Delta t'$  に変更して(3)式または(4)式を計算する。

なお、(10)式において、 $m$  は(11)式を満たす最小の整数とする。

$$\Delta t' = (1/m) \cdot \Delta t \dots\dots\dots(10)$$

$$m \geq 1/a = T_{min}/T_{min}' \dots\dots\dots(11)$$

### 3. シミュレータの概要

管網系統(管長、管径、接続関係)、需要量(実績・予測需要量)の時間的な変動、汚染の発生状況(発生節点、時間、濃度)の3種類の情報から、配水管網内の各節点・各管路の汚染濃度の時間的な変動を、管路の流向・流量変化を考慮して計算する。需要量の時間変動による管路流量の変動は管網計算をもとに計算する(この計算を動的管網計算と呼ぶ)。この管路流量で(3)、また(4)式を計算し、各区間の汚染濃度を求める。

また、その汚染濃度は時間の経過にしたがってカラーディスプレイ画面に表示された管網図上の管路に汚染濃度を色分けして表示する。何の対策も取らない場合にとのように汚染が管網内を拡散していくかをアニメーション的に確認できる動画モード(弁の開閉動作を行わない時)と、シミュレーションで弁の開閉操作を対話的に行い、その効果を確認しながらさらに次の対策を行い、対策の効果を検証できる対話処理モードを設けている。対話処理モードで弁操作を行う場合、弁操作を行う毎に管網計算を再度起動して操作後の管路流量を計算する。そしてその流量を(3)、(4)式に反映させている。

図3に、本シミュレータのソフトウェアの構成及び、処理の流れを示す。

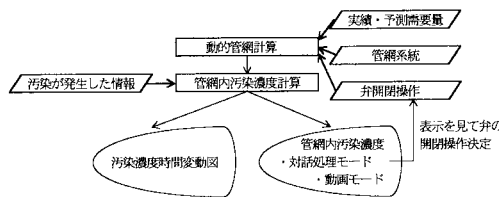


Fig. 3 The structure of software

#### 3.1 動的管網計算

管網計算は、配水管の口径、管路長さ、接続状態、各需要点での需要量の与条件から各管路・点での圧力と管路流量を計算する。ここでは、需要量の時間変動を考慮しての動的管網計算を行う。この動的管網計算は、通常の管網計算の与条件と、各時刻の需要量を与えて、その時刻毎に管網計算を行い、管路・点での圧力および、管路流量の時間変動を計算する。よって時間的に変動している需要量によって時々刻々と変動する圧力及び流量が分かる。

このシミュレータでは汚染濃度の計算を行う前に自動的にこの動的管網計算を起動して、各時刻の管路流量を

書き出したファイルを作成する。汚染濃度の計算はそのファイルから流量を読み込み、(3)式(4)式を計算する。また、対話処理モードの弁の開閉操作後の管路流量を再計算する為にも動的管網計算を起動する。このシミュレータでは弁の開度を変更した時点で、動的管網計算を再計算して、流量を書き出したファイルを更新する。

### 3.2 解析の手順

対話モードでは、弁の開閉動作により管路流量・方向が変化するので、また汚染の状態を見ながら弁の開閉操作を行うので、管網計算・汚染濃度の計算・計算結果表示を逐次行う。その手順の詳細を以下に示す。

- ① まず、各時刻の実績・予測需要量に基づき節点の需要量を設定し、動的管網計算を行い各時刻の管路流量のファイルを作成する。
- ② そのファイルから各時刻の管路流量を読み込み、すべての管路について最大流量から最小滞留時間を計算し、管路分割数を決定する。
- ③ カラーディスプレイに表示された管網図から汚染発生条件（汚染発生地点、時間、濃度）を設定し、これに基づいて各管路、節点、合流点の汚染濃度を計算する。
- ④ 演算した各管路、節点、合流点の汚染濃度に応じた色をカラーディスプレイの管網図上に表示する。弁操作を施さない場合は、所定の時間間隔 $\Delta t$ で③、④を繰り返す。
- ⑤ 操作員が表示画面の時間的経過を見て検討した結果、弁操作の必要が生じた場合には、対話的に弁操作量（弁開度操作量）の情報を管網システムに加え（カラーディスプレイの管網図内の弁を示すマークを指定して情報を加える。指定方法の詳細は3.4に後述する。）、変更後の管網システムに基づいて管路流量計算を再度行い、操作後の各時刻の管路流量ファイルを更新する。
- ⑥ 弁操作を施した場合のみ管路流量ファイルを再度読み込み、各時刻の管路流量のもとで、④以下の計算を所定の時間間隔で繰り返す。この際、弁操作後の最大流量が弁操作前の最大流量よりも大きくなる管路については、前述の2.3により求めた計算時間間隔 $\Delta t'$ で汚染濃度の計算を行う。

一方、動画モードでは、弁の開閉動作がないため管路流方向は一定である。よって、管網計算、汚染濃度計算を先に行い、拡散状態の表示画面では汚染が拡散する状態を表示する。その手順の詳細を以下に示す。

- ① まず、各時刻の実績・予測需要量に基づき節点の需

要量を設定し、動的管網計算を行い各時刻の管路流量のファイルを作成する。

- ② そのファイルから各時刻の管路流量を読み込み、すべての管路について最大流量から最小滞留時間を計算し、管路分割数を決定する。
- ③ カラーディスプレイに表示した管網図から汚染発生条件（汚染発生地点、時間、濃度）を設定し、これに基づいて各管路、節点、合流点の汚染濃度を計算する。これらの計算は所定の時間間隔 $\Delta t$ により繰り返し実行される。
- ④ 汚染濃度を全時間にわたって演算しておいてから、その演算結果の濃度に応じた色を管網図内の管路に付すことにより管網図に汚染濃度を表示する。そして、タイマーにより予め設定した表示時間間隔毎に次表示時間の汚染濃度の色に移行させ、これを時刻の経過にしたがって連続的に繰り返す。従って、管網内の各部の汚染濃度が変化していく様子が色の連続的な変化として表示されることになる。尚、この動的表示の時間スケールは実時間に対して任意に設定可能となっている。

これらの処理の手順を図4のフローチャートに示す。

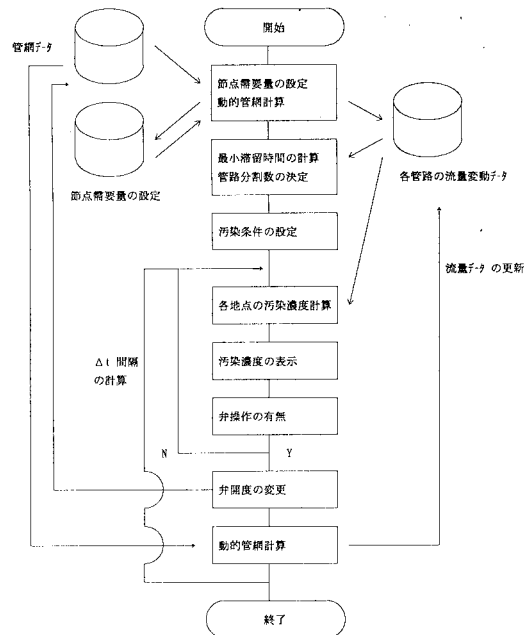


Fig. 4 Flowchart of calculation sequence

### 3.3 汚染発生点の設定

汚染発生点の設定は、カラーディスプレイに表示された管網図内の節点をマウスでクリックすると縦軸に汚染濃度、横軸に時間を示す入力画面が現れる(図5)。この画面に汚染が発生する濃度の時系列グラフをマウスで描くことによって、クリックした節点が汚染発生地点で、そこから何時間汚染が発生しているかを設定することができる。

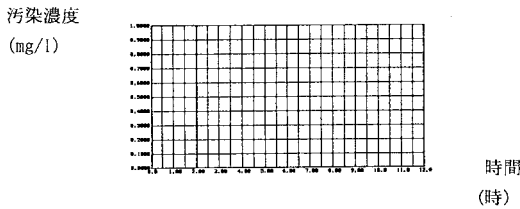


Fig. 5 Setting of the polluted point

### 3.4 弁操作

シミュレータの弁操作は、現場の弁の開度操作を模擬した入力画面で操作を行うことができる。この入力画面はカラーディスプレイ上の管網図の弁を示すマークをマウスでクリックすれば現れる。操作したい弁のマークをクリックして操作する。ここでの操作方法は実際の弁操作と同様に弁を開く方に指示する場合は開ボタンを押し続けて操作する。弁を閉じる方に指示する場合は閉ボタンを押し続けて操作する。

## 4. シミュレーション例

ここでは対話処理モードでシミュレーションした場合

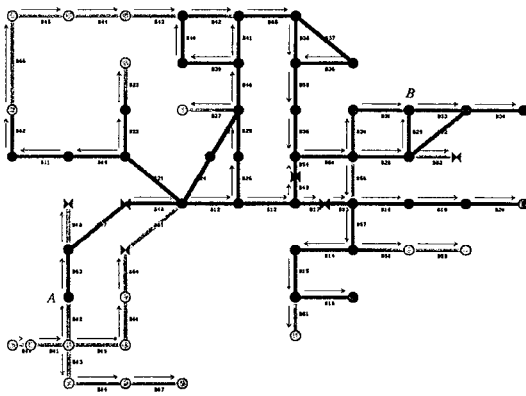


Fig. 6 Condition of pollution in two hours

を示す。図6は赤水がA地点で1.0mg/lの濃度で2時間継続して発生した場合の2時間後の汚染の様子(色の濃い部分が汚染)を表す。図7は発生から3時間後の汚染の様子を表す。これらの図から管網内で汚染水の移動していく様子がみてとれる。(矢印の方向に水が流れている)図8にはB地点における汚染濃度の時間変化を示す。この図からB地点では汚染が汚染発生から約1時間30分で到達し、汚染発生終了後3時間まで継続することが分かる。汚染発生点からB地点へは複数の到達経路があり、それぞれの経路の到達時間が異なるために汚染の継続時間が発生地点の2時間より長くなっている。また、汚染水と非汚染水の混合により、汚染濃度も時間的に変動することが分かる。このように管網内の各地点での汚染の到達時間を計算しており、各地点における汚染発生からの到達時間・継続時間がわかる。

更に、汚染が拡散するのを防ぐ為の弁の開閉操作をシミュレーションした例を示す。汚染発生から0.5時間で(弁Cまで汚染が進行する前に)、弁Cを全開から全閉にして汚染の進行を食い止める。この時、弁Cより下流側の需要端(節点)に非汚染水を配水する為に、弁Cを経由する経路と並行している弁Dを全開から全閉にする。また、弁Eを全閉から全開にして管路F付近の汚染水を排水する。図9に汚染水を弁Eから排水中の様子を示す。弁E閉鎖時は管路Gの流量が0 m<sup>3</sup>/sなので汚染は弁E地点には進行していなかったが全開後には管路Fから管路Gに汚染が流入してきた様子がわかる。このように、汚染拡散についての対策を一連の動きとして、シミュレーションできるわけである。

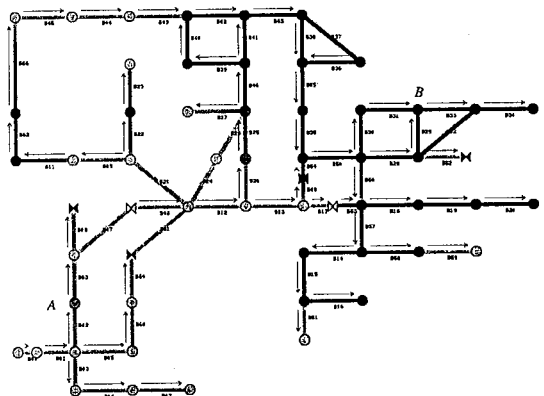


Fig. 7 Condition of pollution in three hours

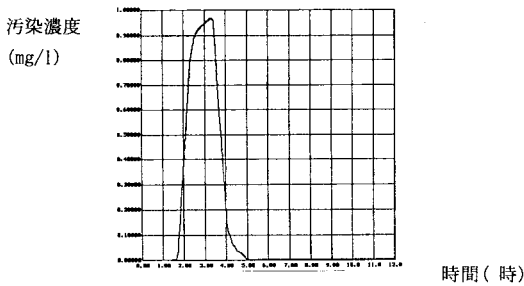


Fig. 8 Changes of concentration of pollution at point B

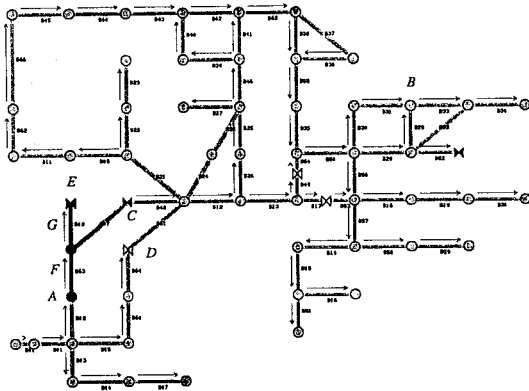


Fig. 9 Condition of pollution in three hours with drain

## 5. 赤水発生条件

一般に赤水は管路内の流速が急激に変化することにより、管路内部に発生した錆や水中に含まれるマンガン等が析出、蓄積したものが水中に現れる。赤水の拡散状況を計算する以前に、そもそも赤水が発生する条件が明確ではない。そこで、過去に火災発生時の消火活動に伴う赤水が発生した地点のデータを基に管網計算を行い、赤水が発生した管路での流速の変化を解析した。

管網計算は、消火活動前の水量として火災が発生した時期、時間帯の需要量を用い計算を行い、消火活動時の水量として、この水量に消防車で消費した水量を上乗せした。また実際の赤水が発生した管路は赤水の発生が通報された地域と排水を行った地域から推定した。

管網計算の結果、消火栓の近傍の管路では、通常時、つまり消火水量が使われる前に比べ流方向が逆になり、流速が0.1m/s ~1.1m/sの変化が起こっている。このな

かでも特に、布設後30年以上経過した铸铁管で赤水が発生しているものと推定される。表1に消火栓使用前後の赤水発生管路での管網計算による流速の変化を示す。この結果から、赤水の発生には流速の変化が0.1m/s以上の変化で発生しているが、管路の布設年度も大きく影響を与えることが分かった。

Table 1 The change of flow speed

入口節 点番号	出口節 点番号	消火前流速 (m/s)	消火時流速 (m/s)	流速変化量 (m/s)
865	1017	-0.035	-0.035	
200	719	-0.059	-0.059	
298	486	-0.079	0.176	0.2550
958	959	-0.007	-1.174	-1.1670
421	958	-0.15	0.126	0.2760
421	422	0.037	-1.056	-1.0930
56	421	-0.024	-0.840	-0.8160
423	959	-0.122	-0.643	-0.5210
422	489	0.051	-0.521	-0.5720
479	485	0.284	0.631	0.3470
290	481	0.194	0.436	0.2420
481	482	0.112	0.349	0.2370
482	483	0.028	0.271	0.2430
484	486	0.110	0.176	0.0660
484	485	-0.117	-0.095	0.0220
486	856	0.054	0.411	0.3570
483	484	-0.001	0.242	0.2430
80	489	-0.021	-0.021	

## 6. おわりに

配水管網内での赤水等の汚染水の拡散状態を解析するシミュレータを開発した。

管網における水質センサーは普及しつつあるが、まだ十分ではなく、特に赤水などは蛇口から出てくるまでわからない状況にある。したがって、実際のデータは少なく、今後実プラントで検証していく必要があると考えている。また、赤水発生時のデータを検討し赤水が発生する条件の検討、さらに赤水の発生しそうな管路の推定を行えるシミュレータへと発展させていきたい。

また、最近のマルチメディアや仮想現実の技術に代表されるように、シミュレーション結果を単に数値やグラフ化するだけでなく、いかにその利用者に分かりやすく表現し、楽しく使えるかがこれからは重要である。今後共、環境システムの計画、設計、運用に役立つシミュレーション技術の研究開発に努めたい。

## (参考文献)

- 1) 秋山、窪田、黒谷、守本：配水管網における汚染拡散シミュレータ：第37回自動制御連合会：p329～p330(1994)
- 2) 黒谷、窪田、秋山、守本：Simulator for Contamination Diffusion in a Water Distribution Network: IECON'95 p792～797(1995)
- 3) 窪田、黒谷、秋山、守本：水道管網のシミュレーション：平成8年電気学会産業応用部門全国大会：S.44～S.47(1996)

(受付 1997.6.3)

(受理 1997.8.28)

