

配水システムの残留塩素濃度に関する GA 最適制御モデル

東京都立大学工学研究科 フェロー 小泉 明
 東京都立大学工学研究科 正会員 稲員 とよの
 東京都立大学工学研究科 学生員 ○吉井 恭一郎
 東京都立大学工学研究科 学生員 工藤 大

1. はじめに

水道普及率が 96.7%となった今日の上水道には、安定した水量を確保するだけでなく、「安全でおいしい水」といった水質の向上が求められている。その中でも、残留塩素濃度（以下、残塩濃度と呼ぶ）については、消毒能力を維持するために配水系末端の給水栓で 0.1mg/L を維持する一方、塩素臭や消毒副生成物の発生抑制などのために、できるだけ残塩濃度を低く抑えることが求められている。このため本稿では、水質管理の適正化を行うために、注入塩素濃度の設定など水道施設の運転制御をどのように行うべきかを見出す手法として遺伝的アルゴリズム（GA）の適用を試みるものとする。

2. モデル地域の設定と最適化問題の定式化

対象とするモデル地域は、図 1 に示すように 2ヶ所の配水池から 4地区に配水されている。各地区は管網を形成しており、配水池 No. 1 から 6割、配水池 No. 2 から 4割が配水されている。そして、各地区の残塩濃度は各配水池の注入塩素濃度と配水量によって制御管理されている。

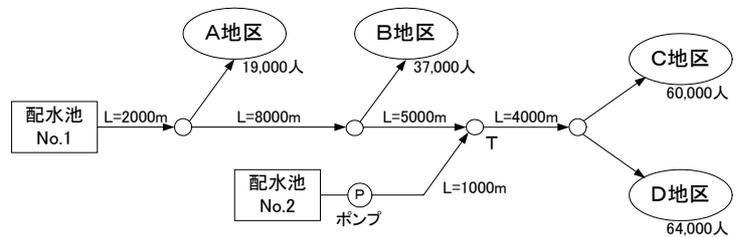


図 1 モデル地域

このモデルの最適化を考えたときに、制御変数は各時刻の各配水池の注入塩素濃度 (x, y [mg/L]) および配水池 No. 2 の配水量 (Q [L/s]) とした。ただし、各配水池の注入塩素濃度は 6 時間毎に変更し、配水池 No. 2 の配水量については大小 2 台のポンプのオン・オフ制御によって配水量を調節する。以上 3 つの制御変数から、各地区 ($n=1, \dots, 4$) 入口の残塩濃度 C_n [mg/L] は到達時間 d_n [hrs] の関数として (1) 式のように表される。

$$C_n = C_0 \cdot \exp(-k \cdot d_n) \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 C_0 : 注入塩素濃度 x, y [mg/L], k : 残塩濃度減少係数 [hrs⁻¹] である。

Q については、これによって合流点 T における各配水池からの混合割合が決まるため C, D 地区の残塩濃度に影響を与える。また注入塩素濃度と各地区の残塩濃度の間には、到達時間分の時間遅れを考慮する必要があるため、本稿では 48 時間分の残塩濃度の計算を行い、後半の 24 時間の結果で評価を行った。

目的関数 Z ((2) 式) および制約条件 ((3) 式) は、各地区末端の節点で残塩濃度を 0.3mg/L 以上維持しつつ、0.4mg/L を目標とするという考え方で定式化を行った。その際、米国環境保護局 (EPA) の EPANET を用いて各時刻 ($t=1, \dots, 24$) の各地区内残塩消費量を計算し、各地区入口における目標値 ($CS_n(t)$ [mg/L]) と下限値 ($C_n^*(t)$ [mg/L]) を設定した。

$$Z = \sum_n \sum_t W_n (CS_n(t) - C_n(t))^2 \Rightarrow \min \quad \dots\dots(2)$$

$$C_n(t) \geq C_n^*(t) \quad n=1, \dots, 4 \quad t=1, \dots, 24 \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 W_n は各地区の人口であり、これを乗ずることで地区ごとの重み付けをしている。

キーワード 配水システム, 残留塩素濃度, 遺伝的アルゴリズム, 最適制御, 水質管理
 連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 Tel. 0426-77-2788

3. GAの適用と解析結果

ここでは、1 個体 35 ビットの遺伝子で 1 組の制御変数の組合せを表現し、これを 1000 個体生成して 1 世代とする。図 2 のフローチャートにそって 500 世代の繰り返し計算を行い最適化する。

GAにおける一般的な最適化手法の目的関数にあたるものを適応度関数という。適応度関数は最大化することしかできないため、目的関数の逆数を適応度関数 ($f_v = 1/Z$) とした。また、(3)式を侵した個体は、ペナルティ関数によって適応度を 1/10 にすることで制約条件を表現した。ここでは、選択方法はルーレット選択を適用し、適応度の上位 2 個体にエリート戦略を導入して、適応度が最大となる個体を探索した。

GAによる解析によって、最適な運転方法として図 3 に示す結果が得られた。この有用性を評価するために標準ケースと比較した。標準ケースは、各配水池ともに注入塩素濃度は 0.7mg/L で一定で、配水池 No. 2 の配水量は需要水量の多い昼間のみ配水し、24 時間の総配水量はGAの場合と等しい。

標準ケースとGA解の各地区末端の残塩濃度の平均値及び最大値とそれぞれの低減化効果を表 1 に示す。すべての項目で低減化の効果がみられ、配水地域全体の平均残塩濃度を 0.1mg/L 程度抑えることができた。一方で、低減化の傾向は合流点Tよりも上流側にあるA, B地区と下流側にあるC, D地区で異なっている。A, B地区

では配水池 No. 1 のみから配水されているのに対して、C, D地区では両配水池から配水されており、注入塩素濃度選択の自由度が高い。そのため、C, D地区では残塩濃度の最大値が低減化され、時間変動が平準化された(図 4 を参照)。また、標準ケースで平均濃度が高かったA, B地区で、その低減化効果が大きくなっており、結果として地区間の平準化もなされている。

4. おわりに

本稿では、残留塩素濃度の適正管理を行うための、水道施設の運転方法の最適化を目的に、GAの適用を試みた。そのために、時刻別の各配水池の注入塩素濃度と配水量を制御変数とし、各地区末端節点の残塩濃度を下限濃度とする制約の下で、目標濃度に近づけるという形でGA最適制御モデルを定式化した。この結果、提案したGAモデルは、配水地域全体の残塩濃度の低減化・平準化に効果をもたらすことが明らかとなった。

【参考文献】

- 1) 稲員とよの・小泉明：配水管網における残留塩素濃度推定に関するニューラルネットワークの応用，水道協会雑誌，第 71 巻 第 8 号，2002
- 2) 工藤大・稲員とよの・荒井康裕・小泉明：遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた配水管網漏水防止制御のための最適化モデル，第 54 回全国水道研究発表会講演集，2003

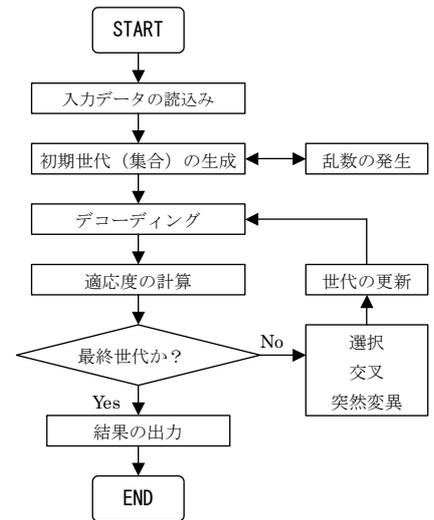


図 2 GAの適用フロー

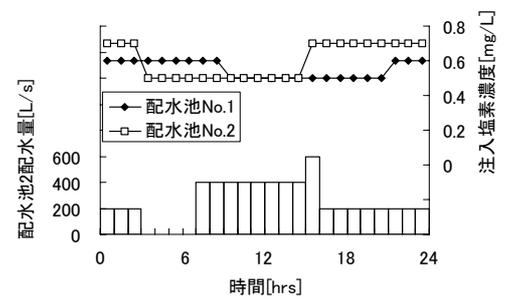


図 3 GAの結果

表 1 各地区末端節点の残塩濃度

地区名 (人口[千人])	A地区(19)		B地区(34)		C地区(60)		D地区(64)		人口加重平均	
	標準ケース	GAの結果	標準ケース	GAの結果	標準ケース	GAの結果	標準ケース	GAの結果	標準ケース	GAの結果
平均[mg/L] (低減化)	0.556	0.412	0.504	0.375	0.486	0.396	0.472	0.383	0.492	0.389
最大[mg/L] (低減化)	0.592	0.491	0.565	0.471	0.552	0.428	0.540	0.414		
	0.144		0.129		0.090		0.090		0.104	
	0.101		0.094		0.123		0.127			

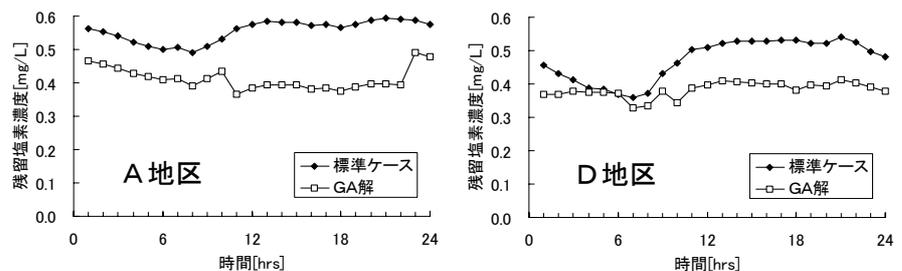


図 4 A, D地区末端節点の残塩濃度変化