

配水管網のバルブ最適操作に対するSCE-UA法の適用性について

Applicability of SCE-UA Method in the Optimal Valve Control of Water Distribution Network

久野 祐輔*

Yusuke Kuno

河村 明**

Akira Kawamura

神野 健二**

Kenji Jinno

ハイサム アワド*

Haytham Awad

ABSTRACT: Due to the large-scale and complication of water supply system, it's becoming difficult to keep the system in good working order. The possibility of such abnormal occurrences as a fire demand, or anti-earthquake procedures further complicates the system control task. In Fukuoka City, the water distribution network system includes lots of water pressure gages, flow meters and electric control valves. These valve openings are operated manually for keeping the necessary water pressure through the system. Therefore, the shift from the manual to automatic valve control is really desired, but that is a high demand task. In this paper, as the first step of the solution of this problem, we try to apply the Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona (SCE-UA) to the optimal valve opening for pressure regulation in water distribution network system. The results show that SCE-UA successfully searches the sub-optimal valve openings for the actual water distribution network. We also clarify the characteristics of SCE-UA method, and discuss applicability in the optimal valve control of water distribution network system.

KEYWORD: SCE-UA, Optimization, Water Distribution System, Valve Control, Fukuoka City

1 はじめに

上水道システムは、河川・湖沼などの水源から原水を取水し、これを浄化して需要者に供給する施設の総称であり、大きく浄水系統と輸送系統に分けられる。配水管網は輸送系統の一部であり、その機能は、①水質的に安全な用水を、②十分な水量と適度な水圧で、③連続的に供給することである。これらの機能は、配水管網の設計における設計目標でもあり、加えて、経済性も考えた最適設計を実現しなければならない¹⁾。

この上水道システムの中でも、配水コントロールは、「適度な水圧」を目標として、時々刻々変動する水需要変動に対して一定基準内の水圧を確保しなければならない。同時に漏水や火災、地震などの災害時においても安定した水資源供給を行うことができるものでなければならない。これらに関して、漏水時の給配水対策²⁾や、漏水の検出や測定方法³⁾、バルブ位置の最適化による漏水低減方法⁴⁾、上水道の地震リスク⁵⁾やその復旧に関する研究⁶⁾など、多くの研究がなされている。しかし近年、多くの都市では上水道の配水システムの大規模化・複雑化に伴い、配水管網の最適運用（適正水圧による漏水の低減、火災時・漏水時・災害時の流量調整等）を行うことが困難となってきた。一方で、水道普及率は、2000年度末には96.6%に達し、日本中に水道が行き渡っていると考えられるが、高度経済成長期に急速な勢いで整備が進められた配水管が耐用年数に近づいているため、21世紀は管路の更新、さらに種々の水道既存施設をいかに合理的に運用管理したら良いかといった維持管理計画の諸問題も重要となってきた^{7),8)}。

* 九州大学大学院 工学府 都市環境システム工学専攻

Department of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University

** 九州大学大学院 工学研究院 環境システム科学研究センター

Institute of Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Kyushu University

現在、福岡市の配水コントロールは、1978年に福岡市が見舞われた異常渇水をきっかけとする配水調整事業の一環として設置された水管理センターにて行われている。管網の各主要地点には、2001年3月現在、120の水圧計・68の流量計および150の電動バルブが設置されており、リアルタイムで取得される水圧と流量のオンラインデータより、水管理センターの監視員のマニュアル操作によって電動バルブが遠隔操作・制御されている。本システムは、配水ブロックに関しては新潟市の例⁹⁾を参考として市内の給水区域を21に分割し、そして水管理センターにおいてブロック毎に適正な水圧調整を一括管理することができる、世界に先駆けて導入されたシステムである。このシステムにより、①各浄水場間の流量調整、②水圧調整による漏水量の抑制、③渇水時におけるバルブ操作の省力化、④配水管異常時の早期発見と遠隔操作による早期対応、⑤情報の収集・分析による効率的な水運用が可能となり、水資源の有効利用という点で大きな効果を上げている¹⁰⁾。このシステムでは365日24時間監視のもと、オペレーターのマニュアル操作が行われており、その操作的確かな判断には、長年の経験が必要である。今後、より信頼のおける水道サービスを提供していくため、さらに的確な制御・監視を行うことが望まれており、マニュアル操作によらない圧力制御システムへの更新も考えられている。このようなシステムについて、これまで様々な研究^{11)~13)}がされているが、バルブによる自動水圧制御は未だ実用化の段階に至っていない。

バルブによる自動水圧制御における問題点は、配水管網では複数の節点を持ち多くの変数が非線形的な関係にあるため、バルブ制御量の算出が容易でないことにある¹³⁾。ほとんどの最適パラメータの探索方法には、局所的な準最適解に陥りやすい難点がある。局所的な解が複数存在するような多峰性の問題では、初期値の設定が適切でない場合、うまく探索できない¹⁴⁾。近年、このような問題に対処できる手法として大域的探索法である遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA) が注目され、様々な問題に適用されている^{3), 4)}。この他にも最適化手法として多くの手法が提案されており、管路設計等に適用されている^{15), 16)}が、バルブ開度の探索には適用されていない。

本論文で用いた最適化手法である SCE-UA 法 (Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona) は、アリゾナ大学の Duan らによって提案された大域的探索法¹⁷⁾であり、GA に指摘されている解の再現性や物理的な意味を持つ解の探索能力が不足していること等が改善されていると考えられている。著者ら^{18), 19)}もこれまでに、SCE-UA 法を用いた最適バルブ開度の探索について、非常に単純なモデル管網を対象に検討を行い、モデル管網における最適バルブ開度の探索が非常に素早く精度良く行われ、GA との比較においても、その優位性が確認された。そこで本論文では、配水管網のバルブによる自動最適水圧制御の問題解決の手始めとして、実際の複雑な管網系(具体的には21ブロックに分割された福岡市配水管網のうち、商業地区と住宅地区が混在し、多数のバルブを含む複雑な第12ブロック)を対象に SCE-UA 法を用いた最適バルブ開度の探索を行い、その特性と適用性について検討を行った。

2 SCE-UA法について

Duan らによって提案された SCE-UA 法¹⁷⁾は、シンプレックス法にランダム探索、GA に類似した競争進化、新たに開発された集団混合の概念を組み合わせた大域的探索法であり、物理的な意味を持つ解の探索領域(パラメータ値の上限・下限)を設定でき、計算過程において計算不能や発散などが発生せず、必ず解が求まる手法である。これらの特性によって画期的に計算時間が早くなり、また、優れた再現性と精度を持った探索可能となる。そのアルゴリズムを簡単に示すと、次のようである。

- ①乱数により発生させたポピュレーションを、 m 個ずつ p 個のコンプレックスに分ける。
- ②それぞれのコンプレックスから q 個のポピュレーションを選択し、サブコンプレックスを構成する。
- ③サブコンプレックスにて α 個の子孫を生成する。<CCE (Competitive Complex Evolution) アルゴリズム>
- ④生成した子孫をコンプレックスに戻し、②~④を β 回繰り返す。
- ⑤収束判定を満たすまで①~⑤を繰り返す。

このように、探索効率を左右するパラメータが多く存在する。Duan ら²⁰⁾は、数値実験の結果等に基づき推奨値を設定している一方で、求める変数などに応じて、(特にコンプレックス数 p は)注意深く設定しなければならないとしている。

3 解析に用いた管網

著者ら^{18), 19)}がこれまでに SCE-UA 法を用いて最適バルブ開度の探索を行ってきた管網は、単純かつ代表的なモデル管網であり、節点数 4 (すべての節点に需要量があり、うち外部流入出がある節点数が 2)、管路数 5 (うちバルブを持つ管路が 3 または 5) の管網である。本論文では、実際の複雑な管網系を対象として SCE-UA 法を適用し最適バルブ開度の探索を行った。福岡市配水管網は、2001 年 3 月現在、120 の水圧計・68 の流量計・150 の電動バルブの諸設備、及び 5 の浄水場(配水池)を含み、配水管総延長は 3,448[km] (1998 年)である。さらにこの管網は、系統別配水エリア・地理的高度差・河川・軌道および地域用途別などを考慮し給水区域を 21 ブロックに区分している。その中で、福岡市の中心部に位置し、商業地区と住宅地区が混在した第 12 ブロックを本論文における対象とした。しかし、膨大な数の節点・管路が存在するため、実管網を正確にモデルとすることは大変困難である。そこで節点数・管路数の調整は、まず第 12 ブロックが含有する 11 の水圧計・7 の流量計・20 の電動バルブの諸施設をすべて含むことを前提とし、管径が 400[mm]以上の配水管を中心として行った。作成した福岡市第 12 ブロック簡易管網は、節点数 57 (すべての節点に需要量があり、うち外部流入出がある節点数が 8)、管路数 83 (うちバルブを持つ管路が 20) の管網となった(図-1 参照)。表-1 および表-2 に、管径・管路長、各節点における需要量及び外部流入出量をそれぞれ示す。ここで、表-2 に示した各節点における需要量は、本論文では夜間状態を想定し、各節点まわりの人口²¹⁾と福岡市における家庭用 1 人 1 日平均使用水量²²⁾を参考にして算出した。

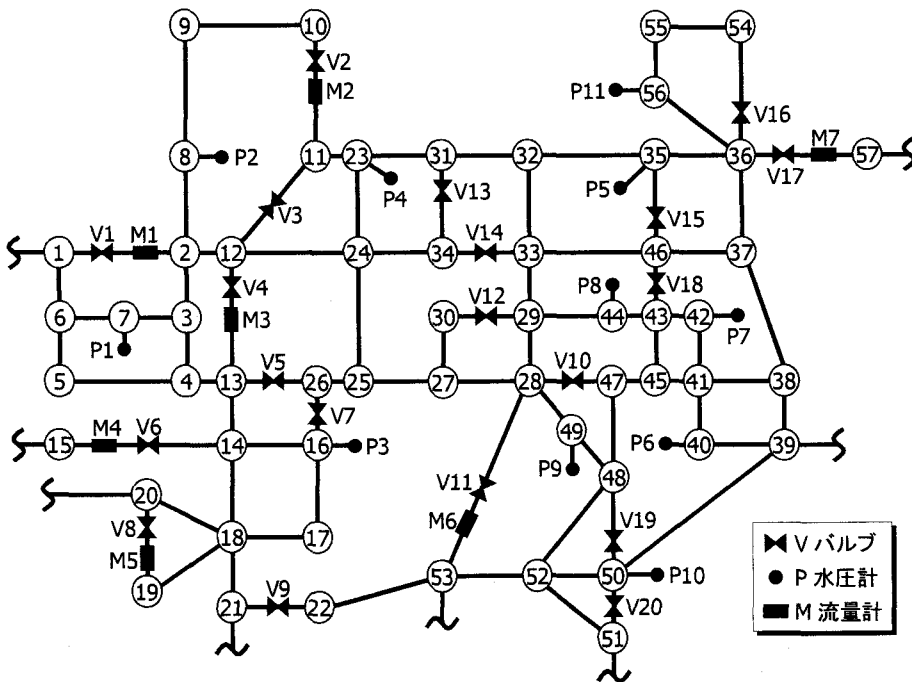


図-1 福岡市第 12 ブロック簡易管網図

表-1 福岡市第12ブロック簡易管網の管径・管路長

管路番号	始点	終点	管径 [mm]	管路長 [m]	バルブ 有無
1	1	2	800	400	✓
2	1	6	300	160	
3	2	3	200	240	
4	2	8	150	140	
5	2	12	800	260	
6	3	4	200	380	
7	3	7	350	220	
8	4	5	250	360	
9	4	13	250	120	
10	5	6	150	240	
11	6	7	350	160	
12	8	9	250	540	
13	9	10	400	1020	
14	10	11	400	760	✓
15	11	12	800	540	✓
16	11	23	800	180	
17	12	13	800	560	✓
18	12	24	350	520	
19	13	14	800	280	
20	13	26	350	180	✓
21	14	15	450	120	✓
22	14	16	450	100	
23	14	18	800	260	
24	16	17	250	300	
25	16	26	450	200	✓
26	17	18	250	240	
27	18	19	600	240	
28	18	20	250	140	
29	18	21	800	600	
30	19	20	600	240	✓
31	21	22	400	800	✓
32	22	53	600	1280	
33	23	24	250	180	
34	23	31	800	280	
35	24	25	150	620	
36	24	34	350	340	
37	25	26	450	320	
38	25	27	450	500	
39	27	28	450	300	
40	27	30	150	60	
41	28	29	600	80	
42	28	47	300	280	✓
43	28	49	300	160	
44	28	53	700	1000	✓
45	29	30	250	300	✓

管路番号	始点	終点	管径 [mm]	管路長 [m]	バルブ 有無
46	29	33	600	300	
47	29	44	250	240	
48	31	32	800	200	
49	31	34	600	140	✓
50	32	33	300	180	
51	32	35	800	320	
52	33	34	400	220	✓
53	33	46	400	340	
54	35	36	800	180	
55	35	46	400	260	✓
56	36	37	300	260	
57	36	54	300	1100	✓
58	36	56	300	820	
59	36	57	800	500	✓
60	37	38	350	420	
61	37	46	600	180	
62	38	39	600	140	
63	38	41	600	140	
64	39	40	250	160	
65	39	50	100	720	
66	40	41	150	140	
67	41	42	250	120	
68	41	45	600	120	
69	42	43	250	120	
70	43	44	150	180	
71	43	45	450	140	
72	43	46	450	240	✓
73	45	47	600	140	
74	47	48	600	320	
75	48	49	150	260	
76	48	50	300	440	✓
77	48	52	600	360	
78	50	51	300	400	✓
79	50	52	200	400	
80	51	52	200	760	
81	52	53	600	280	
82	54	55	250	260	
83	55	56	300	340	

表-2 福岡市第12ブロック簡易管網の節点需要量と外部流出量

節点番号	需要量 [m³/h]	外部流出量 [m³/h]
1	19.6	
2	15.2	✓
3	7.8	✓
4	22.7	✓
5	13.8	✓
6	16.1	✓
7	23.0	✓
8	15.0	✓
9	64.4	✓
10	16.9	✓
11	40.6	✓
12	52.0	✓
13	1.9	✓
14	10.4	✓
15	23.5	100
16	8.3	✓
17	8.8	✓
18	12.0	✓
19	18.8	✓
20	3.0	50

節点番号	需要量 [m³/h]	外部流出量 [m³/h]
21	1.1	250
22	26.3	✓
23	13.6	✓
24	15.2	✓
25	2.7	✓
26	6.2	✓
27	4.5	✓
28	14.3	✓
29	11.8	✓
30	4.5	✓
31	17.7	✓
32	8.1	✓
33	22.4	✓
34	6.0	✓
35	4.8	✓
36	0.5	✓
37	1.8	✓
38	0.7	✓
39	1.3	-200
40	9.5	✓

節点番号	需要量 [m³/h]	外部流出量 [m³/h]
41	10.5	✓
42	0.7	✓
43	10.3	✓
44	10.3	✓
45	22.7	✓
46	9.1	✓
47	5.9	✓
48	32.2	✓
49	5.9	✓
50	17.8	✓
51	21.0	-200
52	20.5	✓
53	14.9	-500
54	0.1	✓
55	0.0	✓
56	0.2	✓
57	10.5	100

4 最適バルブ開度の探索とSCE-UA法の特性

管網解析²³⁾における固定節点を節点1とし、その水頭を35[m]と設定した。その上で、水圧計が設置されている節点($N=11$)の水頭目標値 $H^*=30$ [m]とし、式(1)の評価関数 J が最小となるような20のバルブ開度(探索範囲は、各バルブとも0~100%の1%きざみ)を、SCE-UA法を用いて探索した。

まず、前述したSCE-UA法のパラメータをDuanら²⁰⁾の推奨値($p=20, m=2n+1, q=n+1, \alpha=1, \beta=m$)を用いて探索を行い、その結果を図-2の太実線に示す。なお、探索はバルブ開度の初期値を3パターンで行ったが、いずれも初期値によらず似た傾向の収束を示したため、典型例を1つずつ示している。さらに、推奨値からコンプレックス数 p のみを変えて($p=1, 5, 10, 50$)探索を行った結果を図-2に併記する。まず、世代数による比較(図-2(a))で見てみると、 $p=1$ の場合を除き、50世代までに満足いく収束が得られている。しかし、計算時間という観点から、評価回数による比較(図-2(b))を見てみると、コンプレックス数が大きくなるにつれ、その評価回数も多くなるため、探索効率を考慮した適切なコンプレックス数の設定が必要になることがわかる。本論文の探索結果からは、世代数および評価回数による比較の両者を考慮しても、コンプレックス数 $p=10$ で十分であると考えられる。

さらに、計算時間の短縮化を図るため、コンプレックス数 p だけでなく、コンプレックス中のポピュレーション数 m 、サブコンプレックス中のポピュレーション数 q の組み合わせについても検討を行った。前述の探索結果をふまえ $p=10$ として、(m, q)=(40, 20), (20, 10), (10, 5), (5, 3), (2, 2)の5つの組み合わせで探索を行った。その結果をDuanらの推奨値による探索結果と合わせて図-3に示す。まず、世代数による比較(図-3(a))から(p, m, q)=(10, 2, 2)のパターンを除いてDuan推奨値を用いた結果とほぼ同じ結果が得られており、満足いく探索が行われていることがわかる。さらにこれらの満足いく探索は、評価回数による比較(図-3(b))を見てみると、Duanらの推奨値を用いた場合の半分である40000回程度の評価回数で行われていることが確認できる。これらのことから、コンプレックス数 p だけでなく、その他のパラメータを含めた適切なパラメータ設定が、SCE-UA法による探索効率に影響があることがわかる。特に、今回の場合、コンプレックス中のポピュレーション数 m がDuanらの推

$$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - H_i^*)^2} \quad (1)$$

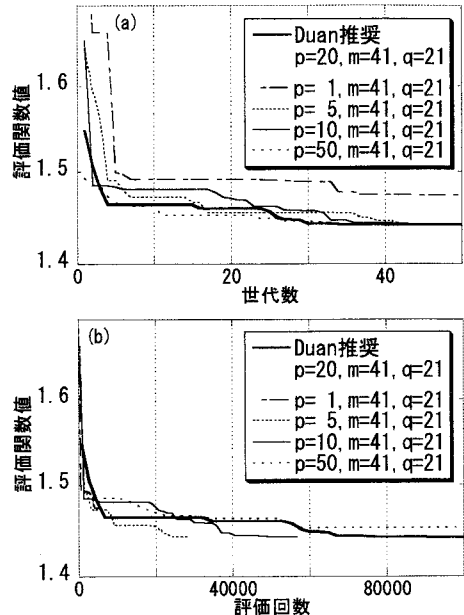


図-2 Duan らの推奨値からコンプレックス数のみ変えて探索した結果

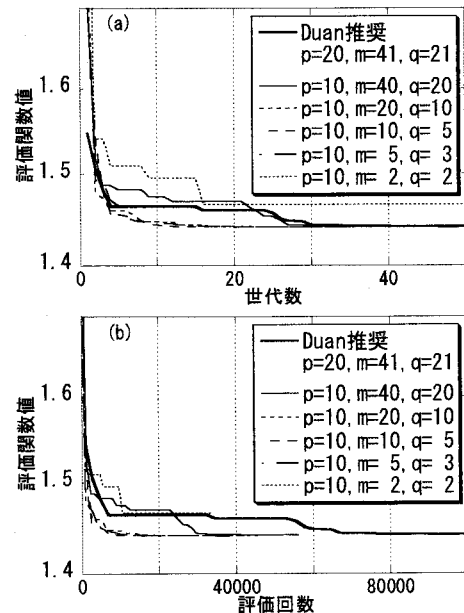


図-3 Duan らの推奨値から各パラメータを変えて探索した結果

奨値に比べて、かなり小さく設定した場合であっても、効率よい探索ができることがわかった。すでに、コンプレックス数 p の設定についての研究はなされている²⁴⁾が、本論文より、その他のパラメータを含めた適切な設定が SCE-UA 法の探索効率に影響があることが示唆された。

5 むすび

本論文ではまず、福岡市配水管網第 12 ブロックのモデル化を行い、SCE-UA 法による配水管網のバルブ最適開度の探索を行った。その結果、複雑な管網においてもバルブ開度探索が可能であることが確認できた。同時に、SCE-UA 法におけるパラメータの設定が探索効率に影響があることも明らかになった。特に Duan らの推奨値よりも小さくパラメータ設定を行っても、満足いく探索ができることがわかった。今後さらに、様々な水需要パターンにおけるバルブ開度の探索を行い、実時間で水需要予測モデルと組み合わせ、実管網における自動水圧制御の実現に向けた取り組みが必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 高桑哲男: 配水管網の解析と設計, 森北出版, 1978.
- 2) Kazuhiro Yoshikawa, Norio Okada: Systems Analysis of Operational Control of Water Supply and Use System in Drought-Time, Proc. of JSCE, No.265, pp.121-135, 1977.9.
- 3) J. P. Vitkovsky, A. R. Simpson, M. F. Lambert: Leak Detection and Calibration Using Transients and Genetic Algorithms, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol.126, No.4, pp.262-265, 2000.
- 4) L. F. R. Reis, R. M. Porto, F. H. Chaudhry: Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol.124, No.6, pp.317-326, 1998.
- 5) 星谷勝, 小池精一, 宮崎正敏: 上水道埋設管システムの震災復旧過程の予測, 土木学会論文報告集, 第 322 号, pp.25-35, 1982.6.
- 6) 市東哲也, 星谷勝: 上水道システムの地震リスクマネジメント, 土木学会論文集, No.584 / I-42, pp.201-213, 1998.1.
- 7) 室石泰弘: 水道の給配水システムの展望, 水道協会雑誌, 第 687 号, pp.2-5, 1991.12.
- 8) 高橋照章: 未来の管網管理(管網管理のあり方), 水道協会雑誌, 第 799 号, pp.66-70, 2001.4.
- 9) 安宅光之: 配水管のブロック化による管網管理とその手法—小ブロック化による配水システムについて—, 水道協会雑誌, 第 799 号, pp.21-29, 2001.4.
- 10) 小田弘登: 福岡市における「水運用と管路情報の収集」について, 水道協会雑誌, 第 799 号, pp.10-20, 2001.4.
- 11) J. H. Dillingham: Automating Distribution System Operations, Jour. AWWA, vol.71, No.3, pp.133-135, 1979.3.
- 12) 斎藤素直, 築山誠: 総合的運用支援による操作者負担軽減を重視した配水管網解析支援システム, 電気学会論文誌 C, 106 巻 12 号, pp.249-256, 1986.12.
- 13) 宮岡伸一郎, 舩橋誠壽: ネットワーク・フロー理論の応用による大規模配水システムの圧力最適化法, 電気学会論文誌 C, 102 巻 3 号, pp.59-66, 1982.3.
- 14) 田中丸治哉: タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集, No.178, pp.103-112, 1995.8.
- 15) M. M. Eusuff, K. E. Lansey: Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol.129, No.3, pp.210-225, 2003.
- 16) H. R. Maier, A. R. Simpson, A. C. Zecchin, W. K. Foong, K. Y. Phang, H. Y. Seah, C. L. Tan: Ant Colony Optimization for Design of Water Distribution Systems, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol.129, No.3, pp.200-209, 2003.
- 17) Q. Duan, S. Sorooshian, V. Gupta: Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, Water Resources Research, Vol.28, No.4, pp.1015-1031, 1992.4.
- 18) H. Awad, A. Kawamura, K. Jinno, Y. Kuno: Evolutionary Computing Techniques for Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.47, pp.865-870, 2003.2.
- 19) 久野祐輔, 河村明, 神野健二: SCE-UA 法を用いた配水管網のバルブによる最適水圧制御に関する考察, 第 54 回全国水道研究発表会, pp.334-335, 2003.5.
- 20) Q. Duan, S. Sorooshian, V. K. Gupta: Optimal Use of the SCE-UA global Optimization Method for Calibrating Watershed Models, Journal of Hydrology, Vol.158, pp.265-284, 1994.
- 21) 平成 12 年度国勢調査
- 22) 平成 13 年度版 福岡市水道事業統計年報, 福岡市水道局
- 23) R. Gupta, T. D. Prasad: Extended Use of Linear Graph Theory for Analysis of Pipe Networks, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.126, No.1, 2000.
- 24) 敖天其, 古谷純一, 深見和彦, 石平博, 竹内邦良: SCE-UA 自動最適法の水文モデル BTOPMC への適用性と算法パラメータの選択について, 水文・水資源学会 2003 年研究発表会要旨集, pp.14-15, 2003.