

分散して存在する小規模水道施設に対する 巡回作業の効率化

細井由彦¹・増田貴則²・Dagnachew Aklog³・佐々木秀和⁴・石津昌彦⁵

1正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目)

2正会員 博士(工学) 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

3正会員 修士(工学) 鳥取大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻

4 (株) 新菱冷熱

5 (株) イズミ

小規模な自治体では水道事業においても給水区域が分散しており、小さな無人の施設が分散して存在している場合が多い。市町村合併や、水道の統合などが進むとさらにこのような水道施設が増加することが考えられる。無人の施設に対しては、定期的に巡回して点検、維持管理が行われているが、施設数が増加するほど、その効率化が求められるようになる。本研究では、多数存在する無人の水道施設を効率的に巡回作業を行う方法の計画法について検討する。まず最も効率的な巡回経路の決定方法を検討し、さらに巡回作業を軽減するために自動監視装置を設置する場合の設置場所や設置個数の決定方法を検討する。解法として遺伝的アルゴリズムを適用することを検討し、効率的な巡回作業を行う方法を示すことができた。

Key Words : Cost effectiveness, genetic algorithm, system inspection, system maintenance, water supply system

1. 緒言

小規模な自治体においては、集落が分散しており多くの簡易水道を有しているところも多い。このようなところでは水道施設も小規模で無人であるものが多数存在しており、施設の維持管理は定期的な巡回により行われている。例えば給水人口が5万人以下の事業体におけるアンケートによると、84%の事業体で日常的に施設の巡回をしており、移動距離は平均30km、巡回力所は平均6.5カ所という結果も得られている¹⁾。自治体の行政の効率化が求められており、限られた職員でいかに業務を行っていくか、それぞれの立場での工夫が求められている。町村合併や小規模水道の統合などが進むと、このような傾向はさらに進むものと予想される。

本研究では小規模な水道施設が分散して存在している場合に、これを巡回して点検、維持管理を行う作業を効率的に実施するための手法を検討する。施設の巡回問題としては巡回セールスマン問題が有名であるが、本研究の場合、巡回作業員の1日当たりの勤務時間が決まっており、巡回拠点から施設までの往復も含めて決められた勤務時間内に実施しなが

ら、合計の作業時間を最小化するような巡回経路を探索する。さらに作業の効率化を進めるために、無人施設における水質や機器の状況などを計測してデータを搬送する自動計器を設置して巡回作業を軽減化することが考えられる。装置の設置に当たっては、巡回作業が最も軽減化されるところを選んで設置することが必要である。また装置の設置箇所数については、装置の費用と削減される人件費を考慮することが必要である。このような点を考慮して、自動化装置を設置する施設と施設数を決定する方法についても検討を行う。

2. 最適な施設巡回経路の決定法

(1)モデルの定式化

無人施設の点検は管理事務所のような拠点から出発して施設を1カ所ずつ巡ることで実施される。全ての施設を1回ずつ回り点検することで一巡が終了する。各施設においてはそれぞれ所定の点検時間が必要とされる。また施設間の移動にも時間を要する。作業は勤務時間内に行われ、勤務時間内に一巡が終了しない場合は、いったん拠点に戻り翌日新た

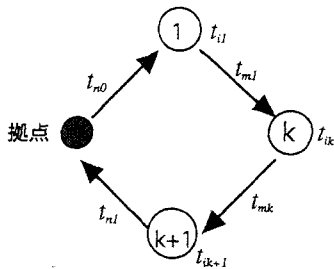


図1 作業時間の計算

に作業が行われる。

そこで、決められた1日の勤務時間内に作業を行いながら、全施設の点検作業にかかる時間を最小化するような順路が最適な巡回経路であると考えことにする。本節の目的はそのような経路を決定することにある。これは以下のように定式化される。

$$\sum_n T_n \rightarrow \min. \quad (1)$$

ただし T_n は第 n 日目の1日当たりの作業時間で、つぎのように表される。

$$T_n = t_{n0} + t_{n1} + \sum_{k \in f_n} (t_{ik} + t_{mk}) \quad (2)$$

本式の概要は図1に示す通りである。ここで f_n は第 n 日目に点検される施設の集合を表している。 t_{ik} は施設 k の点検時間、 t_{mk} は施設 k から次の施設までの移動時間である。 t_{n0} 、 t_{n1} はそれぞれ n 日目に点検する最初の施設までの拠点からの移動時間と、最後の施設から拠点に帰るのに必要な移動時間である。ただし t_{ml} (最後の拠点から次施設への移動時間) は t_{n1} としてカウントされるのでゼロとする。

制約条件は以下ようになる。

$$T_n \leq T. \quad (3)$$

ただし T は1日当たりの作業可能時間であり、決められた勤務時間内であることが求められる。

最適化手法の問題としてしばしば取り上げられる巡回セールスマン問題は、各点を1回ずつ巡る最短経路を見つける問題である。ここで解く問題は1日当たりの作業時間に制約があり、1日ごとに拠点から出発して拠点に戻ってくる必要がある。したがって全巡回点をいっぺんに巡回する最短距離が必ずしも最適であるとは言えない。また各点において種々の作業時間が発生することなどの制約が存在する。

(2) 遺伝的アルゴリズムによる解法

前節で定式化された問題を遺伝的アルゴリズムを適用して解く方法を考える。遺伝的アルゴリズムは最適解を探索する一つの手法である。生物の遺伝情報が遺伝子配列で構成される染色体によって示されるように、一つの解を一本の染色体として表現する。各染色体が表す解としての評価を適応度とよ



図2 表現型遺伝子配列 (PTYPE)

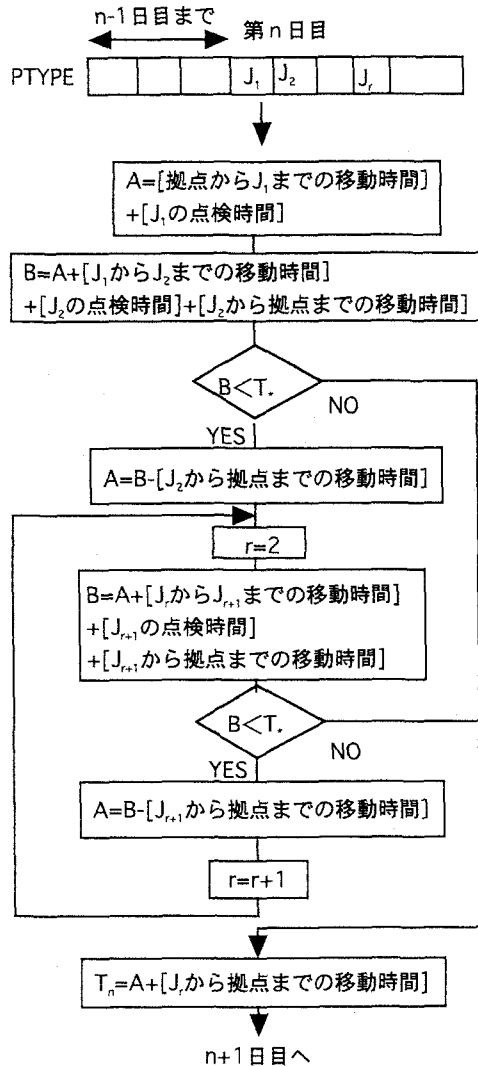


図3 適応度の計算方法

び、良い解になるほど高い適応度が得られるような評価関数を設定する。解くべき問題に対する解を遺伝子配列としてどのように表現するか、評価関数をどのようなものにするかは、それぞれの問題に応じた工夫が必要になる。最適解を求めるために、適応度の高い染色体を親として選択し、それらを2本ずつ組み合わせて交叉を行い、新しい子孫の染色体

を作り出して、適応度の高いものを選びながら次々と新しい世代の子孫をつくっていくことによって、最適解に近づけていく。

図2に遺伝子配列を表現型 (PTYPE) で示した。本研究では一つの遺伝子が一つの施設を表しており、巡回は左側から遺伝子配列の順に沿って行われるものとする。巡回する総施設数が m カ所の場合、染色体長は m となる。

全施設を順に回る最短経路を求める通常の巡回セールスマン問題であれば、長さを固定した染色体で遺伝操作を行うことにより解を求めていくことができる²⁾。しかし本問題の場合、1日当たりの巡回時間に制約があるために、経路により巡回する施設数が異なり、1日当たりの巡回施設数を固定し染色体長を一定にして遺伝操作を行うことができない。1日ごとの巡回経路を1本の染色体で表現して最適経路を求めることは不可能である。そこで全施設の巡回経路を1本の染色体で表現し、制約条件については適応度の計算方法を工夫することで対応することにした。

各染色体の適応度の計算方法を図3に示す。図では第 n 日目の総巡回作業時間の計算方法を示している。まず拠点から最初の施設までの移動時間と、その施設における点検時間の合計を計算する。施設点検を終えたならば次の施設へ移動するか、拠点へ戻るかを決定する。そのために次の施設までの移動時間と点検時間及び次の施設から拠点へ戻る時間を計算してこれまでの時間に加え合わせる。その値が1日の決められた労働時間 T 以内であれば次の施設へ移動することにし、そうでない場合は拠点へもどる。このような計算を順次行っていく、ある施設において、その施設から次の施設まで行って点検を行い、拠点に帰るまでの時間を累積したものが T を超える場合にはつぎの施設に行かずに帰還するものとして作業時間を計算する。翌日また同じことを繰り返し、全ての施設の点検が終わったところで総時間を計算する。各染色体に対してこの総時間を計算し、これをその染色体の適応度の値とする。

実際の遺伝的操作を行う場合には図2に示されるような具体的な施設順路を示す表現型から遺伝子型に変換する。本問題の場合、表現型の2本の染色体を交叉して新しい染色体をつくった場合、染色体上に同じ施設番号が2回現れる意味のない解が出てくる可能性がある。これを致死遺伝子とよぶ。そこで致死遺伝子が現れないように染色体の遺伝子型表現には順序表現とよばれる方法を用いた。

遺伝的操作を行う親染色体の選択には、適応度の大きさに比例して選択される確率を決めるルーレット方式と、ランダムに抽出した染色体群の中から適応度の高いものを選択するトーナメント方式を用い

た。交叉には染色体上の1カ所で切断する一点交叉と、2カ所で切断する二点交叉、及びランダムに行う一様交叉を用いるとともに、突然変異を起こさせ、染色体上の遺伝子を確率的に変化させた。

3. 自動化装置の設置方策の決定法

(1) 所定の数の自動化装置の設置場所の決定方法

無人の施設に自動計測装置を設置し、管理拠点にデータを自動搬送できるようにすることで、日々の巡回対象からその施設を除くことができれば、巡回にかかる時間を短縮することができる。その場合、数が限られたどの施設に設置すれば最も効率を上げることができるかが問題となる。必ずしも管理拠点から遠い施設に設置することが適切であるとはいえない。もしその施設の近くに他の施設もあり、その近くまで巡回する必要があるのならば、それほど大きな時間の短縮化にはつながらない可能性もある。

設置する施設数が k カ所の場合、総施設数 m から k カ所を除いた $m-k$ カ所について最適な巡回経路すなわち最小の総巡回時間を求め、これが最小になるような k を決定すればよい。

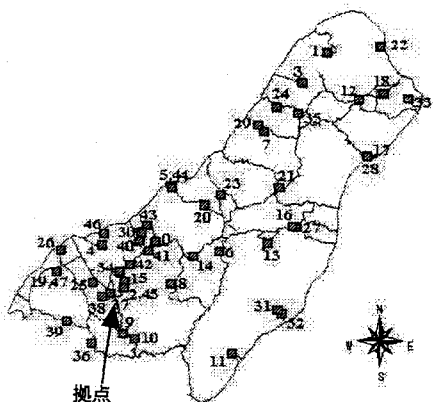
このような問題を解くために、前節で行ったのと同じ方法で遺伝的アルゴリズムを利用した。自動計測装置は設置せずに巡回で点検を行う施設をあらかじめ決めることはできない。そこで各染色体の適応度を計算するにあたり、遺伝子配列の先頭から $m-k$ 番目までを巡回対象とした。すなわち2(2)で述べたように染色体上の遺伝子配列の順に施設を巡回するが、ここでは遺伝子配列の先頭から $m-k$ 番目までは巡回の順序を表し、残りの k 個の遺伝子は自動計測装置を設置する施設を表しているとする。

(2) 自動化装置の設置施設数と設置場所の決定法

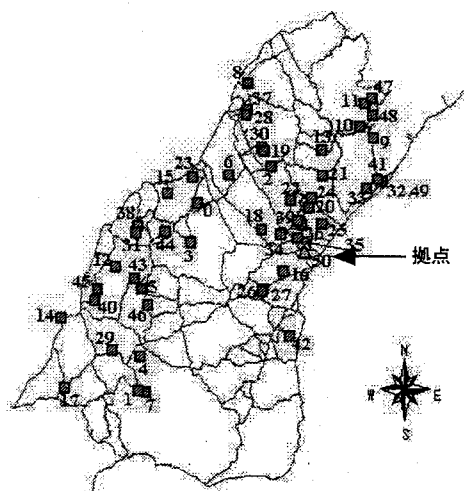
自動計測装置の最適な設置数は、装置を導入して削減される巡回のための人件費の削減額と、装置を導入して維持するために必要となる費用との関係で決まる。 k カ所に自動計測装置を設置した場合の総費用 $TC(k)$ は次式で与えられる。

$$TC(k) = \sum_{s=1}^N CI(m-k) I(N) \frac{1}{(1+r)^s} + CAi(k) + \sum_{s=1}^N CAM(k) \frac{1}{(1+r)^s} \quad (4)$$

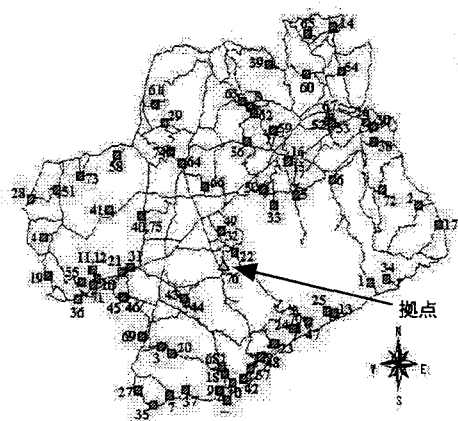
ここで $CI(m-k)$ は $m-k$ カ所を巡回するのに必要な費用で、前節で述べたように $m-k$ カ所を最適な経路で巡回する場合の時間に対応する人件費で求められる。 s は計算基準年度からの経過年数を示し、 N は自動計測装置の耐用期間で、 $I(N)$ はその期間内の1年当たりの巡回回数である。 $CAi(k)$ は k カ所に装置を導入する場合の初期費用、 $CAM(k)$ は1年当



(a) A地区 (管理拠点 No.37)



(b) B地区 (管理拠点 No.50)



(c) C地区 (管理拠点 No.76)

図4 事例研究の対象とした3地区の施設と道路の配置

たりのそれらの維持管理費用である。 r は割引率である。

式(4)の $TC(k)$ を最小にするような k の値と、そのときの設置個所を求めることが目的となる。

4. 事例による検討

(1) 設定条件

a) 対象領域

図4に示す3つの地域を対象として事例研究を行った。図中の番号は巡回する施設を示しており、線は道路を示している。

A地区は総面積89km²、巡回の対象として48カ所の配水施設がある。施設は比較的南西部に多く、図中のNo.37で示される管理拠点も施設の集中している地域にある。

B地区は総面積154km²、巡回の対象として51カ所の配水施設がある。施設は地区の東部と西部に集まる傾向にあり、管理拠点は図中のNo.50で東部の施設集中地区にある。

C地区は353km²、巡回の対象となる77カ所の配水施設がある。施設は地区の周辺部に点在する傾向にあり、管理拠点は図中のNo.76で中央部に位置している。

b) 巡回条件

1日の労働時間を8時間とし、8時間以内に拠点を出発して帰還するものとする。各施設で点検に要する時間は一律に15分とする。移動速度は30km/hとする。

なおこれらの値は施設や道路ごとに任意に設定することは可能である。ここで取り上げているのは全て配水施設であり、計測データのチェックを行うことを主な作業内容と考えて点検時間を15分とした。移動速度に関しては、小規模施設の分散する地域であり、とくに交通渋滞が発生するような道路もないこと、対象エリア内の実績として平均移動速度約37km/hという報告も得ていることから、安全を考慮して一律30km/hとした。

c) 基本操作

遺伝操作を行う基本的なパラメータはつぎのように設定した。

染色体数は120~150とした。親となる染色体の選択方法にはルーレット方式及びトーナメント方式を用いた。

交叉法はまず一様交叉(交叉確率0.7)によってできるだけ局地解に陥らないようにし、その後一点交叉(交叉確率0.8)、二点交叉(交叉確率0.75)を行った。

突然変異確率は0.001~0.015の間の値を用いた。

計算は250~300世代目まで行い、これを異なっ

表1 最適巡回経路の計算結果

(a) A地区

総巡回距離		135.9km									
総巡回時間		16.5時間									
巡回経路	1日目	37	25	34	42	41	0	43	30		
		40	46	4	26	47	19	39	36		
		10	9	2	45	15	14	8	6		
	2日目	20	5	44	23	21	7	29	35		
		24	3	1	22	18	12	33	17		
		28	13	27	16	32					
	3日目	31	11	38							

(b) B地区

総巡回距離		167.5km									
総巡回時間		18.3時間									
巡回経路	1日目	50	35	36	34	39	24	20	22		
		18	6	2	19	30	37	28	8		
		23	15	44	3	0	38				
	2日目	31	43	5	46	4	29	7	1		
		17	14	40	45	12	42	27	26		
		16	25	33	41	32					
	3日目	49	9	10	47	11	48	13	21		

(c) C地区

総巡回距離		305.9km									
総巡回時間		29.4時間									
巡回経路	1日目	76	32	49	22	44	43	31	21		
		10	71	12	11	36	55	45	46		
		69	3	20	68	18	0	9			
	2日目	37	7	35	27	42	57	48	23		
		24	70	47	13	25	1	34	17		
		2	72	38							
	3日目	30	26	53	52	67	54	14	65		
		60	39	16	15	59	56	62	8		
		63	64	74	29	61					
	4日目	58	73	51	28	19	4	41	40		
		75	66	50	33	5	6				

た初期条件で50回繰り返した。

なお詳細は省略するが、以上の諸数値は予備実験を繰り返して決定した。

d)費用

自動計測装置の設置の検討に当たっては費用が必要となる。

巡回のための費用として、燃費は1kmあたり5円、人件費は1時間当たり2500円とした。巡回のための自動車の費用は考慮していない。

自動計測装置の費用は実際の現場における聞き取り調査よりつぎのようにした。

初期費用 $CAi(k) = 3000 + 3720k$ (千円)

維持費用 $CAm(k) = 200 + 56k$ (千円/年)

ここでは水質測定項目は濁度、色度、残留塩素の3項目とし、初期費用としてはソフトウェアと伝送装置及び測定計器の費用、維持費用としては通信費と点検整備費が計上されている。

耐用年数については10年から15年の間で変化させて種々検討を行った。

なお本事例計算においては割引率は0として考慮しなかった。

(2)最適巡回経路の探索結果

最適巡回経路を求めた結果を表1に示す。

A地区の場合には、拠点近くの施設集中地区を回り、北部のやや低密度地区をそれぞれまとめてほぼ1日ずつをかけてまわり、最後に東部のまばらなところに回るという結果になった。北部地区についてはまず西側から回って、東側の縁を南下し東部の1カ所までを巡回する。また拠点近くのNo.38は東部を終了した帰りに立ち寄ることになった。

B地区の場合は拠点のある東部の集中地区から北西部、中西部へと移動する1日と、南西部を回ってから南東部に移動し東縁側を北に向かう1日、北東部を回る1日の組み合わせとなった。

C地区においては、中央の拠点付近から西部をひとかたまりとする1日、南部から東沿いに北上する1日、北部を回る1日、西部から東に向かう1日の組み合わせとなった。この地区の場合は拠点が中央付近にあり、施設の分布も比較的一様なので地区が明確に分かれた順路となっている。

ここで取り上げた事例はいずれも複数の市町が合併した後の水道の統合を念頭に置いたものである。統合前の現状では、例えば11箇所を1人で8時間かけて点検、30箇所を3班で8時間かけて点検などが各町の実績である。このことから本手法によればかなりの効率化が図れると推定される。

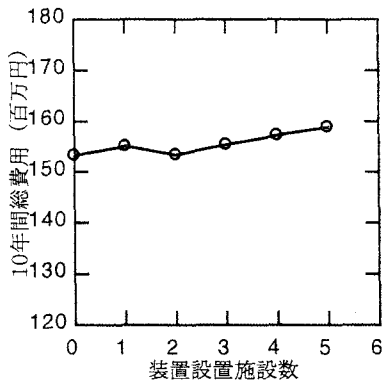
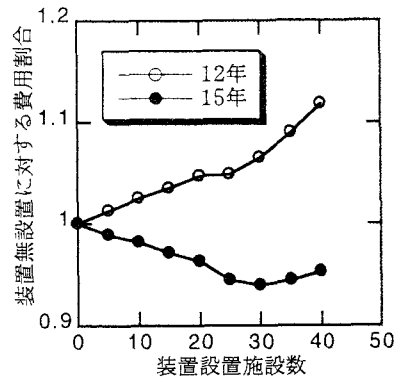


図5 A地区における装置設置施設数と総費用



(a) A地区

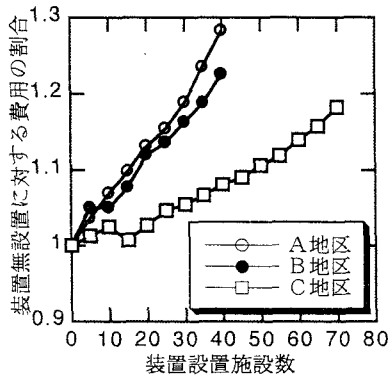
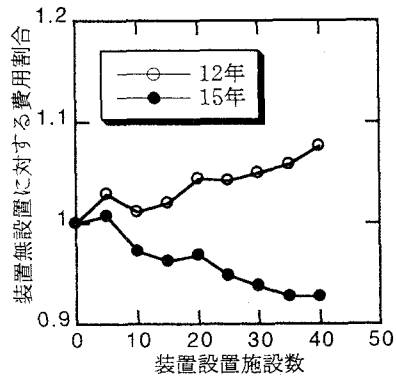


図6 装置設置数と費用の変化



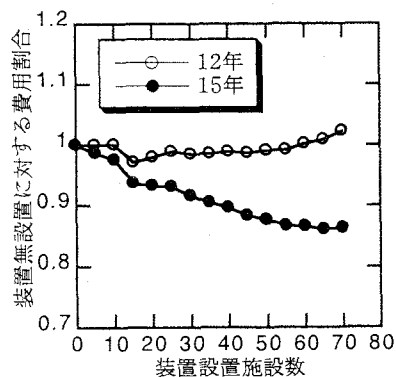
(b) B地区

(3)自動計測装置の設置に関する考察

a)費用最小化からみた自動化に関する考察

自動監視装置は毎日データを送ってくるので、巡回による点検も毎日実施するものとして費用の比較を行う。装置の耐用年数を10年として装置の設置数と10年間の総費用の関係を示したものが図5である。

A地区に装置を1カ所設置する場合、巡回距離を最短にして費用を最小にできる設置施設はNo.8であるという結果を得た。もし装置を設置しない場合にはNo.14からいったんNo.8に行き、再度戻ってNo.6に移動するという経路をとるが、No.8に設置することでこの往復が不要となる。2カ所設置の場合はNo.8に加えてNo.4に設置するという結果になった。これも袋小路状の施設に設置して、そこへの往復を省くことにより距離の短縮化を図っている。これに対し3カ所に設置の場合はNo.1, No.3, No.22と最北部の3施設に設置してそれら施



(c) C地区

図7 装置の耐用年数が異なる場合の設置施設数と1年当たり総費用の関係

設の存在するエリア全体への巡回を省くことになっている。

このように自動化装置の設置は必ずしも拠点から遠いところに設置するのが最善の策ではなく、袋小路状の施設に設置するか、固まって存在しているエリアに一括して設置するかを選択を、設置する施設数に応じて検討することになる。

図5を見るとA地区においては2カ所に設置する場合が最も費用が少ない。しかし設置しない場合より小さくなることはなかった。

装置の設置施設数を5カ所ずつ変化させた場合に、10年間の総費用が装置を設置しない場合に対してどのように変化するかを各地区について示したものが図6である。いずれの地区においても装置の耐用年数を10年とした本図の場合には、装置を設置する方が費用が高くなるという結果になった。しかしC地区のように管理拠点が地区の中央部にあり施設が全域に分散しているような場合の方が自動化施設を設置する場合の総費用の増加は少ないと考えられる。

b)装置の耐用年数の影響

装置の耐用年数が10年の場合、設置をしない方が費用が少ないという結果になった。そこで耐用年数が異なる場合について検討した。図7は耐用年数が12、15年の場合について設置箇所数を5カ所ずつ変化させた場合の1年当たりの費用を設置しない場合と比較したものである。耐用年数が12年の場合、A、B地区では装置の導入による費用削減効果は現れないが、C地区においては10カ所を超えると(11カ所で費用割合が1未満となる)装置を設置することにより、設置しない場合よりも年当たり費用が安くなるという結果になった。ちなみに15カ所に設置する場合の施設番号は、61、29、58、73、51、28、4、19、41、75、66、50、33、5、6であり、西部から東に向かう移動行程が無くなっている。

c)管理拠点の位置の影響

A地区を対象に管理拠点の位置が異なった場合について検討を行う。管理拠点を図4(a)のNo.8にいた場合とNo.21にいた場合についてNo.37の場合と比較してみる。No.8は管理拠点がNo.37の場合において1カ所装置を設置する場合の対象施設であり、No.21は地区の中央に位置しており比較的孤立している。

施設設置箇所を6カ所まで変化させた場合の費用の変化を図8に示す。拠点がNo.8の場合はNo.37の場合と位置的にも近いので、費用もよく似た傾向を示している。

これに対し拠点がNo.21の場合は設置数が0か少ない場合は費用削減効果は他の場合に比べて小さい。これは他の2拠点の場合に比べて拠点の周辺に

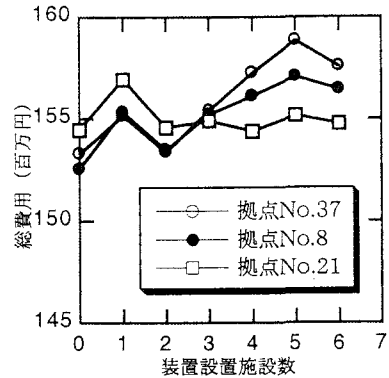


図8 A地区における拠点が異なった場合の装置設置数と費用

施設が少ないためであると考えられる。しかし設置数が増えるにつれて費用削減効果が顕著になる。4カ所に設置する場合には費用が最小となり、全く設置しない場合よりもわずかではあるが小さくなる。この場合の設置施設はNo.11、31、32、22であり南東部への巡回を無くするとともに、北部のまばらなところの袋小路を1カ所省く経路となっている。No.21を拠点にする場合には、装置設置施設数が3カ所以上の場合には、まず南東部に設置し、続いて北部に1カ所ずつ設置していくという結果になっている。

5. 結言

本論文では、分散して存在する水道施設の巡回作業を効率化するために、巡回経路の設定方法と、自動監視装置の設置方法について検討したものである。とくに巡回点検が限られた勤務時間内に実施されるものとして、拠点施設との往復も考慮した最も有利な経路を導く方法を検討した。解法として遺伝的アルゴリズムを適用する方法について検討し、適応度の計算を工夫することで有効な解法を得ることができた。提案した手法を事業統合により施設数が多くなる3つの地域に適用し、本手法の実用性を示すとともに、施設配置の差異が結果に及ぼす影響を検討した。

最初に触れた著者らが実施した小規模事業体に対するアンケート調査結果を見ると、小さな施設を20カ所以上有していると回答した事業体は、取水施設では回答のあったうちの4.1%、浄水施設で2.6%、配水施設で10.9%であった。1日当たりの施設巡回距離は10%の事業体が60km以上であった。市町村合併により水道事業の統合が進むと、本研究のケー

スタディで扱ったような規模の施設管理が必要となる状況も増えてくものと考えられる。さらにここでは扱わなかったが個別の施設の事情や道路混雑状況の制約条件を組み込んでいく必要性も考えられる。今後、提案した手法をさらに発展させ、合理的な施設の監視計画を立案し、効率的事業経営に寄与しうるようにしたい。

謝辞：本研究は（財）水道技術研究センターe-Water及びEpochプロジェクトの基礎研究の一部と

して行われた。

参考文献

- 1) 細井由彦：中小規模水道における水質、維持管理に関する問題、（財）水道技術研究センター「水資源の有効利用に資するシステムの構築に関する研究」平成15年度基礎研究報告書、2004.
- 2) たとえば、石田良平、村瀬治比古、小山修平：遺伝的アルゴリズムの基礎と応用、森北出版、1997.
- 3) 細井由彦、増田貴則、Dagnachew Aklog・佐々木秀和：小規模地域の水道事業統合に伴う施設巡回作業の効率化、鳥取大学工学部研究報告、2003.

PLANNING METHODOLOGY OF EFFECTIVE PATROL OF SPARSELY ALLOCATED WATER SUPPLY FACILITIES

Yoshihiko HOSOI, Takanori MASUDA, Dagnachew AKLOG,
Hidekazu SASAKI and Masahiko ISHIZU

Water supply areas of small water undertakings are generally small and diffused. Therefore, there are lots of water supply facilities and they are sparsely allocated. Those facilities have to be inspected periodically. The method to plan the route which can patrol those facilities effectively was considered in this paper. The patrol is carried out within working time every day. Therefore, the minimum total patrol time with the constraint of daily working time was considered. The way to induce automatic analyzer which make patrol unnecessary was also considered. The proposed method was applied to real undertakings which had lots of facilities by unification of waterworks.