

(22) GAによる最適管路更新モデルを用いた投資水準の感度分析に関する研究

A Study on Sensitivity Analysis of Pipe Renewal Investment Using Genetic Algorithm

小棚木修*, 小泉明**, 稲員とよの**, 古川唯一***, 渡辺晴彦*

Osamu ODANAGI*, Akira KOIZUMI**, Toyono INAKAZU**, Tadaichi FURUKAWA***, Haruhiko WATANABE*

ABSTRACT ; In order to update planning process of appropriate renewal scheduling in water supply distribution networks, it is necessary to expand the simulation model for non-linear problems, and to clarify validity of investment. In this paper, we propose a methodology applying Genetic Algorithm (GA) model that is said to have flexible correspondence in the multiple peak solution space. Next, we present indices that show levels of water supply service, and propose the sensitivity analysis methodology using the GA model how the level varies from investment cost restriction.

KEYWORDS ; renewal, Genetic Algorithm, investment, water supply, distribution networks

1. はじめに

わが国の水道施設の多くは1960年代の高度成長期に集中的に整備され、普及率及び給水人口、施設能力もこの時期に大幅に向上した。水道供給の根幹を成す管路は全国で約58万km(平成15年度)布設されており、水道の総資産の約2/3を占めている。水道管路のうち約4割に相当する22万kmの管路が布設後20年以上を経過した状態にあり、このような経年管の比率は年々増加している¹⁾。最近では管路の老朽化に伴う大規模な事故による断水もいくつか生じており、管路機能の低下に伴う市民生活、都市活動への影響も生じてきている。このような状況にあって、日本の水道の将来像の形成を目指した水道ビジョン^{2,3)}においても、計画的な施設の更新が大きな課題として提示されている。

これまで、更新の必要性が叫ばれた中で更新事業が進まなかった理由として、次の3点を挙げる事ができよう。

- ①施設の稼働状況や設置環境、施工条件により機能低下の程度が異なり、さらに事故・故障等のデータが蓄積されていないため、物理的な寿命を定量化することが困難であり、更新期を定め難い。
- ②更新時期の目安として、減価償却の観点から設定された法定耐用年数をもとに更新事業を計画している水道事業が多いが、この基準では一時に多くの施設が更新対象となり、事業の優先順位付けが難しい。
- ③更新事業は給水量の増加並びに給水収益の増加に結びつかない事業であり、水需要が停滞から減少傾向に移ってきた最近では、財源の確保に対する誘因が働かない。

著者らは管路更新における上記問題点の①及び②に対しては、管路の重要性を考慮した管路更新による効果を定量化するとともに、費用制約条件下で更新により得られる効果を最大化する問題として定義し、最適な管路更新順序の決定方法を提案してきた^{4,5)}。すなわち、管路更新により軽減される管路破損による被害額

* (株) 日水コン 環境事業部 (Environmental Eng. Dep., Nihon Suido Consultants Co., Ltd.)

** 首都大学東京大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University)

*** 東京都立大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University)

を便益としてとらえ、計画期間内の総便益を最大化する問題として定式化している。さらに、整数計画法による解法⁶⁾及び整数計画法が適用できない大規模管網に対してはモンテカルロシミュレーションを用いた導出方法⁷⁾を提案してきた。しかし、これらのモデルにおいては目的関数を線形化してとらえているという限界があり、より長期間の複雑な管網に適用するためには非線形問題に対応できるよう拡張する必要がある。

③の問題点に対しては、更新事業の目標を明確に設定することが重要と考える。すなわち、老朽化に伴う管路の破損により生じる断・減水の被害を現状維持もしくは改善することを目標とし、そのために必要となる管路更新事業費の妥当性を明らかにすべきと考える。

そこで本研究では、まず、更新対象管路とその更新時期の組合せから管路更新順序を決定する計画モデルにおいて、多峰性を有する解空間において柔軟な対応が可能と言われている遺伝的アルゴリズム^{8,9)} (Genetic Algorithms; 以下 GA と呼ぶ) の適用を提案する。つづいて、管路の状態に基づいた水道供給のレベル(管路の破損による断・減水の被害の大きさ)を表す指標を提示し、同モデルを用いて更新事業の費用制約により水道供給のレベルがどのように変化するか感度分析を行い、妥当な投資情報を得る計画手法を提案する。

以下では、まず2.で GA による管路更新計画モデルを示し、3.で水道供給のレベル指標を提示する。そして、4.ではケーススタディを通じていくつかの費用制約条件下での更新順序解探索及び水道供給レベルの感度分析を行う。

2. GAによる管路更新計画モデル

老朽化等に伴う管路の破損により生じる断・減水の被害は、需要者の断・減水の回避行動及び水使用の代替行動による経済損失、水道事業者の破損管路の修繕費として定量化することができる⁵⁾。 t 期に管路 i を更新するかどうかを表す 0-1 変数 x_i^t を操作変数として i 管路破損による被害額期待値を定式化すると(1)式となる。なお、(1)式における生活被害額 LD_i^t 、都市活動被害額 LU_i^t は、口径及び管網のネットワーク特性を考慮した管路 i 破損時の節点ごとの供給水量の不足率(以下不足率と呼ぶ)に応じた被害額原単位をもとに算定する⁵⁾。

$$L_i^t(\mathbf{x}_i^t) = (LD_i^t + LU_i^t + LR_i) \cdot d_i^t(\mathbf{x}_i^t) \cdot l_i \quad \dots\dots\dots (1) \text{式}$$

ここに、

t : 期間番号を表す添え字 ($t=1,2,\dots,T$) T : 総期間数

i : 管路番号を表す添え字 ($i=1,2,\dots,m$) m : 総管路数

$\mathbf{x}_i^t$: t 期までの管路 i の更新履歴ベクトル $\mathbf{x}_i^t = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^t)$

$L_i^t(\mathbf{x}_i^t)$: t 期までの管路 i の更新履歴 $\mathbf{x}_i^t$ に基づく t 期の管路 i 破損時の被害額期待値【千円/年】

LD_i^t : t 期の管路 i 破損時の生活被害額【千円/年】

LU_i^t : t 期の管路 i 破損時の都市活動被害額【千円/年】

LR_i : 管路 i 破損時の管路修繕費*(各期共通)【千円/年】

* 破損部分(単位管路長、例えばφ300mmでは5m)のみを布設替えるのに要する費用

$d_i^t(\mathbf{x}_i^t)$: 更新履歴 $\mathbf{x}_i^t$ に基づく更新後の経過年数と管種により定まる t 期の管路 i の破損率の関数【件/km/年】

l_i : 管路 i の長さ【km】

管路更新による効果は、管路更新を全く行わなかった場合と行った場合の被害額期待値の差（被害軽減額）を便益としてとらえることができ、図-1 のように表すことができる。そして、最適更新モデルは費用制約下での計画期間内の総便益 B を最大化する問題として、(2)式～(4)式で定式化できる。

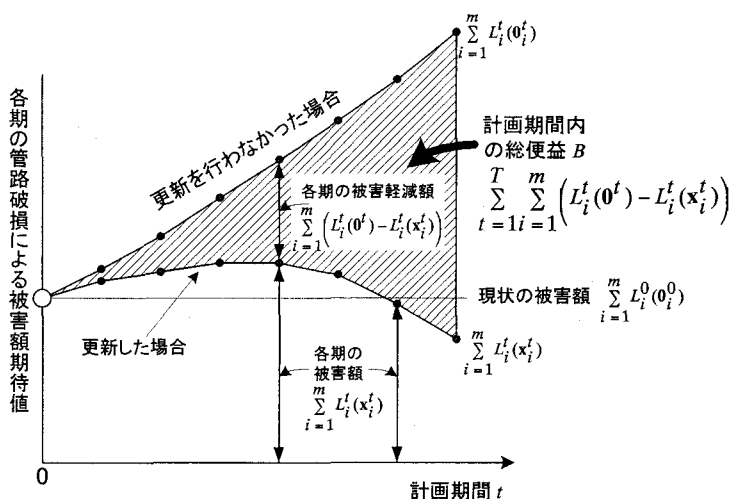


図-1 管路更新による被害額軽減効果と便益のイメージ

目的関数

$$B = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m (L_i^t(0^t) - L_i^t(x_i^t)) \Rightarrow \max \quad \dots\dots\dots (2) \text{式}$$

制約条件

$$x_i^t = 0 \text{ or } 1 \quad (t = 1 \dots T, i = 1 \dots m) \quad \dots\dots\dots (3) \text{式}$$

$$\sum_{i=1}^m C_i \cdot x_i^t \leq \tilde{C}^t \quad (t = 1 \dots T) \quad \dots\dots\dots (4) \text{式}$$

ここに、

C_i : 管路 i の更新費

$\tilde{C}^t$: t 期における管路更新費用の制約値

$0^t = (0, 0, \dots, 0)$: t 期まで更新しないことを示す 0 ベクトル

(2)式は管路更新履歴 x_i^t による各期の管種、布設後の経過年数を内包しており、これらにより表される破損率が非線形となることから非線形整数計画問題となり、大規模な配水管網への適用及び長期的な計画への適用は現実的ではない。そこで、本研究では、長さが計画期間×管路数の 0-1 ベクトル $((x_i^t, t=1, 2, \dots, T), i=1, 2, \dots, m)$ を個体として、総便益が最大となる更新順序を探索する GA モデルの適用を提案する。すなわち、総便益 B にペナルティとして予算超過額 p を考慮した適応度 f を(6)式で定義し、これを最大化する問題として表す¹⁰⁾。ただし、更新費用が費用制約以内の場合は総便益 B をそのまま適応度 f として用いている。

$$p = \sum_{i=1}^T \left(\sum_{i=1}^m C_i \cdot x_i^t - \tilde{C}^t \right) \dots\dots\dots (5)式$$

$$f = \begin{cases} \frac{B}{p} & (p > 0) \\ B & (p \leq 0) \end{cases} \dots\dots\dots (6)式$$

さらに、超長期更新計画への適用において同一管路が複数回更新される場合を想定し、耐用年数を考慮した最小更新間隔期数 k を導入し、以下のようなGAによる計算プロセス¹¹⁾を提案する。

Step1: 初期世代の生成

まず、各管路について、更新するかどうかを確率 $1/2$ の乱数により決定し、更新するとした管路では確率 $1/T$ の乱数により更新する時期を決定する。なお、これを繰り返すことにより、同一管路における複数回更新も許容する遺伝子を設定する。全個体を生成後、例えば更新回数 2 回となった個体については、更新間隔期数が k より小さい場合には確率 $1/2$ で更新期をどちらか一方の期に再設定する。

Step2: 費用便益比による管路の削減

対象管路数が多く遺伝子が長い場合には、解探索を効率的に行うため、各管路の更新便益とその管路の更新費用との比、すなわち費用便益比により、各期の費用便益比の最大値が 0.1 を下回る管路については個体生成の時点で非常に小さい確率（通常の更新確率の $1/1000$ ）で更新を行うこととする。

Step3: 新世代の生成

まず、新世代に残る個体を、適応度に比例した割合で選り出すルーレット戦略¹²⁾を用いて選択した後、管路単位で遺伝子を交換する一点交叉をある確率（交叉確率）で行う。つぎに、あるビットの $0-1$ を反転させる突然変異をある確率（突然変異確率）で行い、新世代を生成する。さらに、Step1と同様な方法により、新世代の各個体について更新間隔のチェックを行い、更新間隔が短すぎる個体が発生しないようにした。

Step4: 適応度の計算と新世代の決定

新世代における各個体の遺伝情報（更新履歴）から、(6)式により適応度を計算する。ここで、新世代の適応度が旧世代の適応度と比べある値以下となった場合には、旧世代の遺伝情報をそのまま新世代に継承する適応度継承戦略を導入した。また、旧世代において最大適応度の個体を、新世代の最小適応度の個体と交換することにより、常に最大適応度が維持されるようにした（エリート戦略）。

Step5: 個体集団の再配置

適応度の上昇が見込まれなくなる2000世代以降において、少数のエリート解を残してそれ以外の個体を全て初期化する“再配置”を一定の確率（ 0.01 ）で行うこととした。この再配置により、解空間における局所的な探索と大域的な探索とをバランス良く切替えることが可能となる。

Step6: 終了判定

あらかじめ指定した世代に達するまではStep2に戻る。

以上の計算プロセスを1配水池、9需要点、12管路から成るモデル管網（図-2を参照）に、個体数100、交叉確率0.8、突然変異確率0.01とし、世代数2000を上限として適用した。また、Step1の初期世代生成に用いる乱数の種（乱数発生ルーチン用出発値）を0.1から1.0まで0.1刻みで変化させた。計算結果は図-3のとおりであり、乱数の種10パターンのうち6パターンにおいて(2)式の非線形整数計画（以下IP；Integer Programmingと呼ぶ）モデルと同じ解を出力した。また、最適解に達していない4パターンにおいても98%以上の収束率（＝GA解/IP解）となっており、十分に実用的な解が得られたと考えられる。これにより、提案した管路更新計画最適化のためのGAは、整数計画法と同程度の解空間探索能力があると判断された。

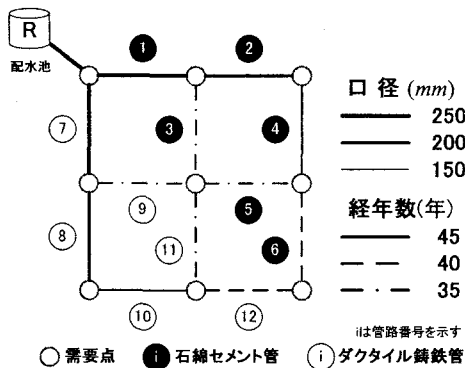


図-2 GA 適用性検討のための田型モデル管網図

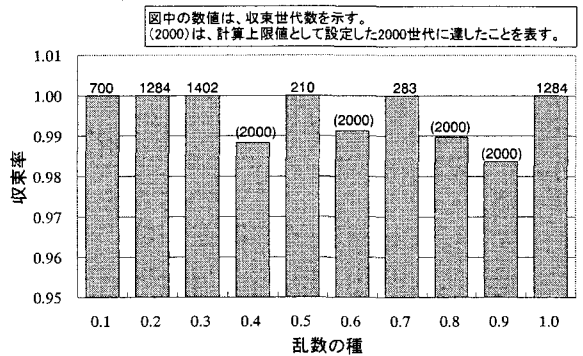


図-3 更新期を決定する乱数の種による収束率の変化

3. 更新による水供給レベル評価指標

2. で提示したGAによる管路更新計画モデルは、ある費用制約下で管路破損に伴う被害を最小化する管路更新順序を決定するモデルである。管路更新事業費の妥当性の判断は、更新費用により得られた解における被害の大きさがどのように変化するかの感度分析を行い、評価する必要がある。

著者らは、これまで更新事業の実行の妥当性を、更新費用と更新により軽減される被害額期待値（便益）とを比較し、これを費用便益比により提示してきた⁵⁾。費用便益比による評価により、管路更新に要した投資以上に更新により軽減される被害の方が大きいことは評価できるものの、各期の断・減水被害額の大きさ

（図-1 における $\sum_{i=1}^m L_i^t(x_i^t)$ ）は評価できない。例えば、事業全体の費用便益比が最大であるケースは費用便益

比が最大の一路のみを更新する場合であるが、他の管路は更新対象とならないため、経年化に伴い管網全体の管路破損件数並びに断・減水被害額は大きくなる。このため、費用便益比は各管路について2. のStep2で示したように更新による効果が高いかどうかの判断を行う指標として用いることが好ましい指標である。

(2)式で示した最適更新モデルは、更新により老朽化に起因する管路破損の危険性を改善し、それにより管路破損に伴う断・減水による被害額軽減値を最大化することを目的としている。そこで、更新後の水供給のレベルを各期の被害額期待値 $\sum_{i=1}^m L_i^t(x_i^t)$ そのもので表すことが考えられる。しかし、今後人口の減少に伴い需

要者一人当たりの被害額が大きくなることも想定されるため、(7)式のように各期の給水人口一人当たりの被害額の期待値として基準化して表すこととする。さらに、更新事業の効果は現況の水供給のレベルとの比較により示すことができるため、(8)式のように各期の一人当たりの被害額を現況 ($t=0$ 期) の一人当たりの被害額で除し、0期の被害額を100とした指数として表すこととする。

$$D_t = \sum_{i=1}^m L_i^t(x_i^t) / P_t \quad (t=1,2,\dots,T) \quad \dots\dots\dots (7)式$$

$$R_t = \frac{\sum_{i=1}^m L_i^t(x_i^t) / P_t}{\sum_{i=1}^m L_i^t(0^t) / P_0} \times 100 = \frac{D_t}{D_0} \times 100 \quad (t=1,2,\dots,T) \quad \dots\dots\dots (8)式$$

ここに、 P_t : t 期の給水人口

4. ケーススタディ

1 配水池、28 需要点、40 管路からなる実配水管網（図-4 を参照）を対象とし、計画期間 6 期（1 期=5 年、計 30 年）における管路更新計画を検討した。なお、管種を 2 種類とし、それぞれの破損率を図-5 で与えた⁹⁾。本地域は、現在給水人口 71,400 人、実績日最大給水量 28,800m³/日の中規模の都市域であるが、新たな住宅開発や工場誘致の計画はなく、将来の給水人口、需要水量は図-6 のように停滞から減少へ移行していくものと予想されている。

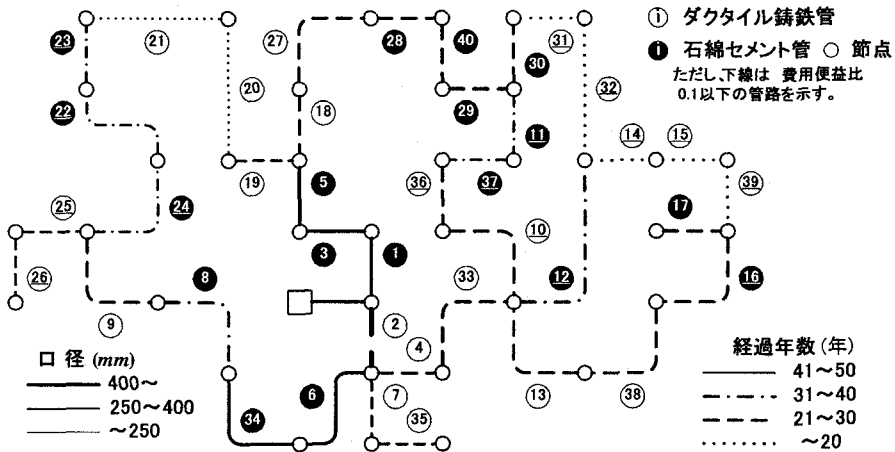


図-4 ケーススタディ管網図

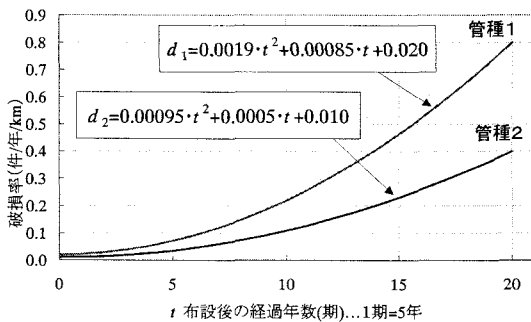


図-5 管路破損率

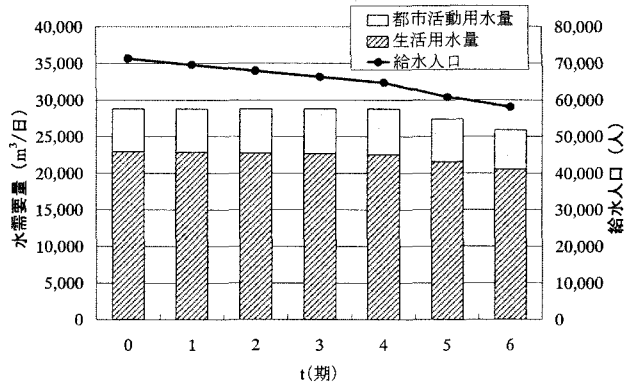


図-6 ケーススタディ地域の給水人口及び需要水量

この管路更新計画において、対象管路と更新時期の組合せ数は $2^{40} \approx 10^{12}$ であり、費用の制約により更新することのできる管路数は限定されるものの、実行可能な代替案は莫大な数となる。ここで、2. で提案した遺伝的アルゴリズムを用いれば、遺伝子として抽出され、ある程度の数に限定された代替案集合について探索を行ない、更新予算内で便益の高い計画代替案を自動的に得ることが可能となる。今回のケーススタディの計算時間は、パーソナルコンピュータで 1 時間程度であった。

更新費用の制約を、各期の給水収益の 1%、3%、5%、7% の 4 通り設定し、GA モデルにより各ケースの更新最適パターンを計算した結果、それぞれ約 10000 世代目で最大適応度の解を得た。各ケースの更新対象管路本数、管路延長、更新費用を表-1 に示す。また、各ケースの期別の一人当たり被害額指数は図-7 のとおりである。

表-1 更新費用制約ケースごとの更新費用、便益及び費用便益比

費用制約	更新対象管路		B 総便益 (千円)	C 更新費用 (千円)	費用便益比 B/C
	本数	管路長(m)			
1%	5	3,600	1,854,505	549,600	3.4
3%	12	11,020	4,902,145	1,640,020	3.0
5%	23	20,030	6,106,170	2,691,370	2.3
7%	24	20,780	6,477,415	2,768,620	2.3

表-1 に示すように、費用便益比は、費用制約の厳しいケース（給水収益に対する比率が小さいケース）の方が高くなっている。これは、更新費用が少ない方が更新による被害軽減効果の大きな管路のみを対象とするため生じる結果である。費用ケースごとでは 1% のケースに対し 3% のケースも同程度の費用便益比が得られており、3% 程度までは投資の効率性が確保できると見ることができよう。3% ケース

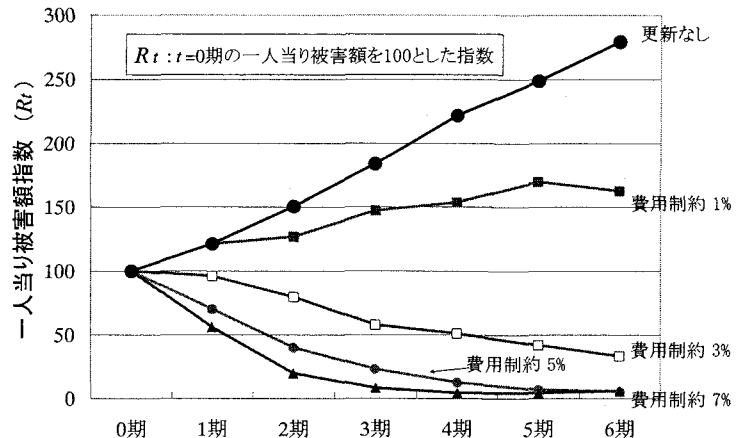


図-7 更新費用制約ケースごとの一人当り被害額指数 (R_t)

スに対し 5% ケースは、費用便益比率の低下が大きく、更新費用を大きく上げることにより、相対的な効果が小さくなることを示している。さらに 7% ケースは 5% ケースと更新費用、便益とも同程度であり、ケーススタディ地域においては 5% 程度が投資水準としては上限であることが分かる。一方、各ケースの一人当り被害額指数を見ると、1% ケースでは期を経るにしたがい指数が上昇し、4 期目以降には 150 を超える状態となっている。これは、現況に比べて、管路破損による被害の危険性が高くなっていることを示しており、給水収益の 1% 程度の更新投資では、管網の状態を現況レベルにも維持できない。つまり、先の費用便益比では効率が高いと評価されても十分な更新効果が得られず、更新費用を増やす必要があることを示唆している。3% 以上のケースにおいては、一人当り被害額指数が減少しており、3% 以上の更新投資を行うことにより管路破損による被害の危険性を減らすことができることが確認できる。

この一人当り被害額指数の目標値を定めること、すなわち管路破損に伴う需要者の被害受忍度を設定することにより、更新費用の目安を設定することができよう。このケースでは、3% の投資により 6 期目の一人当り被害額指数が 33 となっており、管路破損に伴う断・減水被害額を現況の 1/3 の水準に減らすことができることが示された。さらに、5% の投資により一人当り被害額指数を 3 期目には 23 に、6 期目には 6 にまで下げることができ、それぞれの期における安定性を現況の 4 倍、15 倍以上まで高めることができる。現況の一人当り被害額は表-2 に示すように 1.9 千円/年/人であり、この被害額自体の大きさを例えば高度浄水処理導入に伴う費用増 1.2 千円/年/人（参考文献 13）をもとに試算）と比較することなどにより、将来の管路破損に伴う被害をどこまで軽減すべきかを設定することが考えられる。また、アンケート調査等を通じて需要者の断水被害受忍度及び被害軽減のための支払い意思額を把握することなどにより、この目標値を設定することも考えられる。

さらに、本ケーススタディでは、各期の給水収益に対し一定の比率で更新費用を設定したが、更新による効果の早期発現のためには後年次の予算を早い時期に振り分け、目標とする一人当り被害額指数のレベルが達成された段階でこのレベルが維持できる程度に更新費用を削減することが効果的と判断できる。本研究で提案した一人当り被害額指数は、このような期別予算の配分を計画する上でも有効な指標となると考える。

表-2 更新費用制約ケースごとの一人当たり被害額 (D_i)

【千円/年/人】

	現況	1期	2期	3期	4期	5期	6期
更新なし	1.9	2.2	2.8	3.4	4.1	4.6	5.2
費用制約1%		2.2	2.4	2.7	2.8	3.1	3.0
費用制約3%		1.8	1.5	1.1	0.9	0.8	0.6
費用制約5%		1.3	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1
費用制約7%		1.0	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1

5. おわりに

本研究では、複雑な配水管網の超長期的な更新順序決定モデルとして GA モデルを提案するとともに、現況に対する一人当たりの被害額の比率により更新後の水供給のレベルの感度分析を行い、必要となる投資水準及び投資の年次配分の考え方を提案した。GA モデルにおいては各管路の費用便益比による解空間の絞込み及び新世代の生成における適応度継承戦略の導入などにより、整数計画モデルと同等の解を得ることが可能となり、これにより実管網の更新順序決定を行うことが可能となった。また、GA モデルにより様々な費用制約ケースの検討を行うことができ、この計算結果をもとに投資の効率性のみでなく、更新後の水供給の安定性が確保できるような更新事業量を検討することができた。

今後の課題としては、更新時期の水需要量に応じた管径のダウンサイジングに関する検討¹⁴⁾、さらには、新たなルートへの布設及び被害の地域的偏在の解消等も考慮した上での更新による管網再編成計画¹⁵⁾への拡張等が考えられる。

【参考文献】

- 1) 水道統計：(社)日本水道協会、平成15年度
- 2) 厚生労働省健康局：水道ビジョン、pp.15-16、2004
- 3) 間山一典：バックデータから見た水道ビジョン(その1)－更新需要の試算を中心として－、水道、Vol.50 No.2、pp.27-35、2005
- 4) 小棚木修・小泉明・渡辺晴彦：水道管路網の改良・更新計画のための評価手法に関する研究、土木学会環境システム研究論文集、Vol.29、pp.361-368、2001
- 5) 小棚木修・小泉明・渡辺晴彦：水道管路の更新順序と投資水準の適正化に関する研究、土木学会環境システム研究論文集、Vol.31、pp.169-177、2003
- 6) 朝倉安佳・小泉明・稲員とよの・小棚木修・渡辺晴彦：整数計画法を用いた管路更新順序の適正化に関する一考察、第55回全国水道研究発表会講演集、pp.56-57、2004
- 7) A. Asakura, A. Koizumi, O. Odanagi, H. Watanabe and T. Inakazu : A Study on Appropriate Investment of Pipeline Rehabilitation for Water Distribution Networks, Proceedings of 4th IWA Water Congress and Exhibition, ID116158 (8 pages, CD), 2004
- 8) D.E. Goldberg : Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, pp.27-88, Addison-Wesley, 1989
- 9) 三宮信夫・喜多一・玉置久・岩本貴司：遺伝的アルゴリズムと最適化(システム制御情報ライブラリー17)、朝倉書店、pp.21-62、1998
- 10) 稲員とよの・小泉明・古川唯一・小棚木修・渡辺晴彦：GAによる配水管網の更新に関する一考察、土木学会第59回年次学術講演会講演概要集、第7部門、pp.3-4、2004
- 11) 稲員とよの・小泉明・古川唯一：遺伝的アルゴリズムを用いた最適管路更新順序に関する一考察、第56回全国水道研究発表会講演集、pp.78-79、2005
- 12) 小泉明・稲員とよの・荒井康裕・工藤大：遺伝的アルゴリズムによる配水管網の漏水防止制御計画、水道協会雑誌、第839号、pp.20-30、2004
- 13) 大阪府水道部：21世紀に向けての水道(府営水道の高度浄水処理 Q&A)、p.22、1991
- 14) 小泉明・稲員とよの・吉井恭一郎：ハイブリッドGAを用いた最適配水管網設定方法の提案、第56回全国水道研究発表会講演集、pp.420-421、2005
- 15) 小棚木修・小泉明・渡辺晴彦：ネットワーク構造に着目した水供給システムの安定性の評価に関する研究、土木学会環境システム研究論文集、Vol.30、pp.257-263、2002