

■ 報 告 ■

シミュレーション手法を用いた下水道用機器の点検計画の評価

中 根 進

要 旨：筆者らの調査範囲で下水道用プラント機器は、初期故障型か偶発故障型の故障特性を示す。このような機器は、時間計画保全では信頼性を向上させる効果が少なく、状態監視保全が必要とされている。現状では機器の状態を常時、監視記録する装置やその解析手法が用意されていないので、時間計画保全を行っているのが実情である。初期故障型、偶発故障型を示す下水道機器の不具合間隔について信頼性解析を行い、その不具合分布をワイブル分布で表現した。機器の不具合を擬似的に発生させ、定期点検日前に発生した不具合を故障とするシミュレーションにより、時間計画保全による点検計画を年間保全コストで評価する。現状の点検計画を含めた点検頻度の異なる3ケースを想定し、現状の点検計画が優位であることを示した。

キーワード：シミュレーション、ワイブル分布、不具合間隔、時間計画保全、状態監視保全、下水道機器

1. はじめに

下水道用プラント機器の信頼性解析を行うことにより、機器の故障特性（初期故障型、偶発故障型、摩耗故障型）が明らかになる。一般に故障特性から機器の保全手法（予防保全、事後保全）を選択する。機器の故障特性はワイブル分布のパラメータ（ m, η ）で表現できる。

筆者らの調査の範囲では、下水道プラント機器（以下機器と言う）の故障特性は、初期故障型（ $m < 1$ ）か偶発故障型（ $m = 1$ ）を示す¹⁾ため、時間計画保全を行っても予防保全効果が期待できない²⁾とされている。そのため機器の保全は、状態監視保全といわれる予防保全手法をとることが必要となる。しかし、現状では機器の状態を示す情報を常時監視記録する装置や状態を解析する手法が用意されていないことが多く、状態監視保全ではなく、摩耗故障型の機器に対して有効な時間計画保全を行っているのが実情である。本文は、機器の不具合間隔について信頼性解析を行い、その不具合間隔をワイブル分布で表し、計画する定期点検日以前の不具合については機器の故障とするシミュレーションにより、時間計画保全の内、定期保全と言われる点検計画について緊急保全コストを導入した年間保全コストによって評価する。

2. プラント機械設備の不具合間隔

2.1 日常点検および定期点検

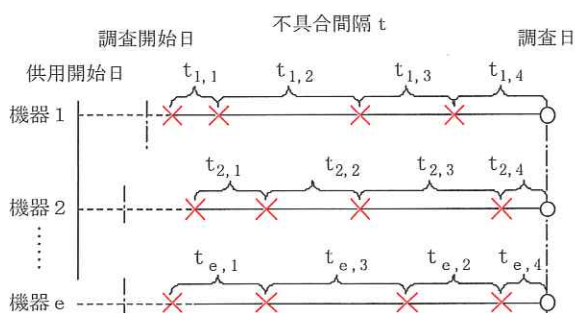
本文では、指針³⁾に示される次のような点検を日常点検および定期点検とする。

- ①日常点検：日常巡視点検を言い、五感（音、熱、振動、臭い等）、計器の指示値のチェックなどを1日1回行う点検を言う。
- ②定期点検：週に何回、月に何回というような日常巡視点検以外の弛み、漏れ、変色などの外見的点検や必要に応じて給油、給脂あるいは増締、清掃等の手入れを行う点検を言う。

2.2 点検保守記録と不具合間隔

機器の故障や安全保護装置の作動に伴う原因確認や簡易な修復・修理作業などの故障、修復・修理の内容、発生時刻の記録を点検保守記録とする。

故障、修復・修理作業など時間的な間隔を本文では不具合間隔と定義する。維持管理年報などの点検保守記録から不具合発生日を特定し、機器毎に不具合間隔 t_i を算出し、図-1の不具合間隔 t_i を得る。今回の信頼性解析では、機器の運転時間でなく、運転しているものとして設置されている時間で整理し、修復・修理に要する時間は考慮していない。



図－１ 点検保守記録に基づく機器毎の不具合間隔 $t_{e,i}$ の整理

保管されている記録から故障、修復・修理の時刻を調査したが、収集記録の始点が機器毎に異なっていた。機器毎に点検保守記録の最初に現れる不具合の時刻を基準として図－２のように不具合間隔 $t_{e,i}$ を昇順に並べて、信頼性解析データを作成する。



図－２ 信頼性解析データ(不具合間隔の並替え)

2.3 不具合間隔の定式化

不具合間隔をシミュレーションするため、機器毎に不具合間隔を定式化する。機器がある確率のもとで不具合が生じるものと考え、不具合までの時間(不具合間隔)が確率分布に従うと仮定する。この確率を累積した累積確率分布をワイブルの分布式で表す。

不具合の累積確率分布を累積不具合確率として、(1)式で表す。

累積不具合確率 F :

$$F(t_i) = 1 - e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m} \quad (1)$$

ここに、 m : 形状パラメータ

η : 尺度パラメータ

本文では、累積ハザード法によって調査値を累積不具合確率 $F(t)$ で近似する。累積不具合確率 $F(t)$ はハザード関数 $H(t)$ を使って (2) 式で表す。

$$F(t_i) = 1 - e^{-H(t_i)} \quad (2)$$

不具合の回数 n と不具合間隔 t_i の昇順に並び替えたデータ(図－２)を使って不具合間隔 t_i 毎のハザード値 $H(t_i)$ を算定する。

$$\text{ハザード値} : H(t_i) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n-i+1} \cdot \delta_i \right)$$

ここに、 δ_i : ダミー変数 (1 : 不具合データ, 0 : 打切データ)

算定したハザード値 $H(t_i)$ から (2) 式を使って不具合確率 $F(t_i)$ を算出する。

(2) 式は、両辺に 2 回対数を取ることで不具合間隔 t と $F(t_i)$ の関係が線形となり、線形近似ができる。この直線の傾きが (1) 式の形状パラメータ m となり、切片 b から尺度パラメータ η を同定できる⁴⁾。本文では、機器のパラメータの同定までを便宜上、信頼性解析と呼ぶ。

この信頼性解析を機器毎に行い、ワイブル分布のパラメータ m , η を推定し、不具合間隔を定式化する。

2.4 シミュレーションデータ

ある処理場(汚水処理水量 : 2,379 千 $\text{m}^3/\text{年}$)⁷⁾ の沈砂池・主ポンプ設備、水処理設備、汚泥処理設備の点検している機器すべて 158 基を対象にして信頼性解析を行い、時間計画保全による年間保全計画について評価する。

今回、信頼性解析によって得られたワイブル分布のパラメータ m , η の一部を表－１に、全機器を別表(123 頁参照)に示す。

表－１ シミュレーションデータ

設備名	機器名	ワイブル分布パラメータ		指数パラメータ
		m	η	λ
沈砂池設備	流入ゲートNo.1	0.73	246.6	0.0043
	流入ゲートNo.2			
	粗目スクリーン			
	粗目スクリーン	1.75	72.8	0.0098
	沈砂掻揚機			
	トラフコンベア			
	細目自動除塵機No.1	1.10	195.3	0.0003
	沈砂洗浄ブロワ	0.44	181.6	
	電動ホイス	0.78	317.2	
	脱臭ファン	0.87	256.5	
	活性炭吸着塔	0.42	205.0	
	床排水ポンプ	1.27	265.2	
	計装用コンプレッサー	1.20	344.8	
	⋮			
計	158			

表－１では予備、常用機の区分は不明であるが運転時間は同じとして解析した。流入ゲートなどについては、不具合履歴が極めて少なく、ワイブル分布のパラメータ m , η を推定することができない。このため不具合回数が 3 回以下の場合には指数分布⁵⁾を仮定する。調査開始日からある調査日までの調査期間内の不具合率 λ_i は、指数分布とすると下式で求められる。

$$\text{不具合率} \lambda_i = \frac{\text{不具合回数} X_i}{\text{調査期間} T_i}$$

累積不具合確率 $F(t_i)$ は、不具合率 λ_i をパラメータとして次式で表す。

$$F(t_i) = 1 - e^{-\lambda_i t_i}$$

不具合実績の無い機器は、シミュレーションする期

間で不具合の発生する確率を小さくするように、不具合回数 x_i を 1 として (調査期間 $T_i \times 2$) で除して不具合率 λ_i を算出した。

散気板は、反応槽 1 槽にライザー管を通じて多くのホルダーに収納されているが、解析では、反応 3 槽分の散気板を 1 つの機器として扱い指数分布を仮定した。

3. シミュレーション手法

3.1 定期点検計画

機器の定期点検は、本処理場での聞き取り調査の結果、1 ヶ月の中で決められた日時で行うのではなく、機器毎に設定した回数を 1 ヶ月の中で随時行うとのことであった。シミュレーション上の定期点検は、図-3 のように月に k 回定期点検を行う場合に、一ヶ月毎に 0～1 までの値をとる一様乱数 r を k 個生成し、月の点検日を設定する。この乱数を 12 回 (12 ヶ月分) 発生させ、時間保全計画による年間点検計画とする。

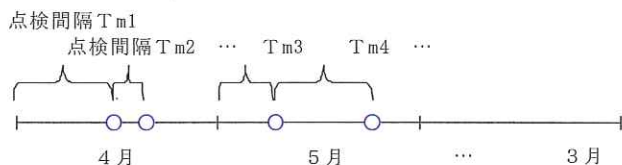


図-3 点検間隔 T_m

今回評価する年間点検計画を表-2 に示す。現状行われている月 1 回の定期点検による保全を点検計画 2 とし、不具合回数を減少させることを目的に点検頻度を月 2 回とする計画を点検計画 1 とする。また、保全コストの低減を目的に点検頻度を半減 (月 0.5 回) する計画を点検計画 3 とする。

表-2 年間点検計画

	定期点検回数 k	備考
点検計画 1	月 2 回	
点検計画 2	月 1 回	現状
点検計画 3	月 0.5 回	

3.2 不具合間隔の生起

信頼性解析を行って機器毎に得た累積不具合確率 F のパラメータ m, η を用いる。機器毎に 0～1 までの値をとる一様乱数 r を生成し、この乱数値 r を (2) 式の累積不具合確率 $F(t)$ の逆関数に代入し、不具合間隔 T_f を生成する。不具合間隔 T_f を図-4 に示すように並べると $\times$ 印が不具合日となる。

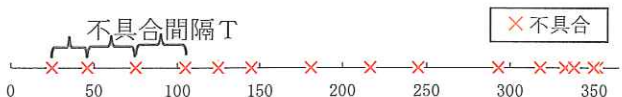


図-4 機器毎の不具合間隔 T_f の生起

なお、定期点検時において各機器をすべて分解し、必要に応じて部品の交換まで行うような整備を想定する場合、シミュレーションとしては、分解整備直後に不具合間隔 T_f を生起させる。指数分布する機器のある下水道機器では、不具合間隔が短くなる。ただし、今回のシミュレーションでは、分解整備を想定せず、各機器に対して予め図-4 の不具合間隔 T_f を生起させ、この不具合間隔 T_f を定期点検の後や偶発故障の後に使用する。

3.3 年間保全コストの推定

点検計画の評価を行うために緊急保全費用という指標を導入する。通常の点検に要する費用を定期点検費用とする。定期点検で見つけられなかった偶発的な故障による保全費用を緊急保全費用とし、それらを以下のように設定する。

① 1 回当たり定期点検費用 (C_m)

図-5 に示す定期点検間隔 T_m より機器の不具合間隔 T_f が大きい時は、偶発的な故障を未然に防止できることもある (適切に保全された) と仮定して、1 回当たりの定期点検費用 C_m を計上する。

$$\text{点検間隔 } T_m \leq \text{不具合間隔 } T_f$$

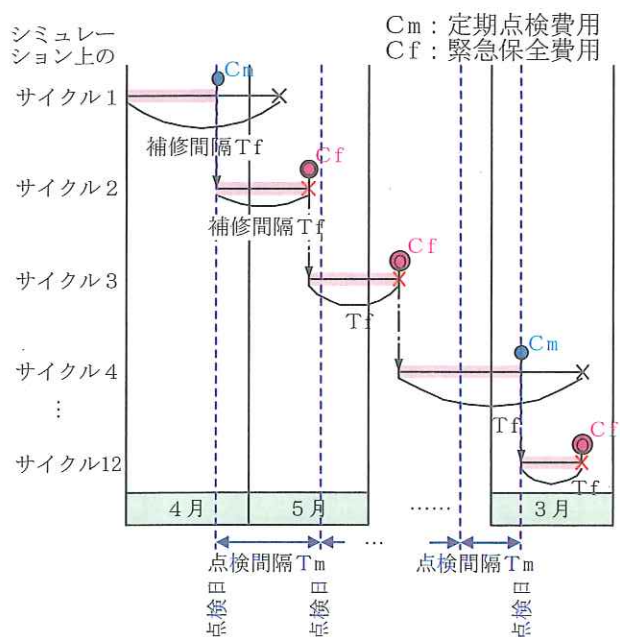


図-5 機器の不具合と点検費用の発生関係

② 機器別故障 1 回当たり緊急保全費用 (C_f)

定期点検間隔 T_m より機器の不具合間隔 T_f が小さければ、定期点検ではその機器の不具合を見つけないことができないとして、その不具合を故障と考え、緊急保全費用 C_f を計上する。

$$\text{点検間隔 } T_m > \text{不具合間隔 } T_f$$

以上の①定期点検費用と②故障による緊急保全費用を 1 年間、積み上げて年間保全コストとする。

3.4 点検コストの設定

3.4.1 点検コスト

下水道統計⁷⁾により該当する処理場の「人件費」と「運転管理費」を調査し、これらを加算した費用を年間の点検費用として表-3に示す。

表-3 実績年間定期点検費用(H17年度)

	金額 千円/年	H17公共下 水道統計 項目番号
運転管理委託費	42,423	1346
= 点検費用	42,423	

定期点検回数は、シミュレーションする処理場の聞き取り調査により以下の回答を得た。

- ・日常点検回数：週5回（五感）
- ・定期点検回数：機器1基につき1回

年間の総点検回数を表-4のように算出し、機器1基当たり点検1回の点検費用を算出する。

$42,423 \text{ 千円/年} \div (275 \text{ 回/月} \times 12 \text{ ヶ月/年}) = 12.9 \text{ 千円/回}$

この点検費用を定期点検費用とし、シミュレーションでは12.9千円/回を1とし、定期点検回数を乗じて定期点検コストとする。

表-4 点検機器数と聞き取り調査による点検回数

大分類	中分類	点検機器数		月当たり点検回数	
		中分類別	大分類別	①日常点検	②定期点検
				5回/(全機・週)×4週/月	月1回/機器
プラント機械設備	沈砂池	脱臭含	13	13	13
	主ポンプ		13	13	13
	送風機		9	9	9
	水処理	初沈	19	79	79
		エアタン	8		
		終沈	17		
		滅菌	7		
		ろ過水	18		
	汚泥処理	その他	10	44	44
		濃縮	9		
		薬注	8		
		脱水	24		
		脱臭	3		
	小計		158		158
	プラント電気設備		37		37
	建築設備		60		60
	計		255		275 回/月

3.4.2 緊急保全コスト

故障の内容によりオーバーホールするような修理・修繕となるかどうか明らかなでないが、オーバーホール費用を故障に対する緊急保全に要する費用と考える。

文献6)に表-5に示す主ポンプ、送風機、反応タンク（機械曝気装置）のオーバーホール費用の調査値が記載されている。このオーバーホール費用には、機器の仕様（諸元）は不明であるが、調査台数が明らかになっているので、機器1台当たりのオーバーホール費用を算出する。

表-5 主機の実績オーバーホール費用⁶⁾

機器名	機種	1台当たり オーバーホール 費用(千円)
主ポンプ	立軸渦巻斜流	7,870
	立軸斜流	11,120
	水中汚水ポンプ	2,430
送風機	ターボブロワ	10,175
	ロータリブロワ	1,578
反応タンク	機械式曝気装置	2,261

このオーバーホール費用と機器費の比を今回シミュレーションする処理場を含む5処理場について算出し、機器費に対するオーバーホール費用の費用関数を算出した。

$$y = 0.5618 \cdot \exp(-0.00003x)$$

ここに、y：オーバーホール費/機器費

x：機器費 千円

故障機器に対して上式に（機器/12.9千円）を乗じ、無次元化した緊急保全費用を算出する。

機器費によって定期点検費用より緊急保全費用が安価にならないように、緊急保全費用には定期点検費用を加算するものとする。すべての機器に対して1年間の緊急保全費用を集計したものを緊急保全コストとする。緊急保全コストと定期点検コストを加算し、年間保全コストとする。

4. シミュレーション解析結果

4.1 シミュレーション試行過程

機器の不具合を生起させるための試行回数は、年間保全コストの分布を描くに必要な回数を想定して500回とした。一般にデータを線形で回帰する場合、データの個数は、30個以上、非線形の場合には50個以上必要とされているので、10倍のデータ数があれば十分と考え、500回とした。

4.1.1 故障の発生状況

故障回数は、定期点検日以前に発生した不具合日である。シミュレーションした年間故障回数の生起状況を図-6～8に示す。

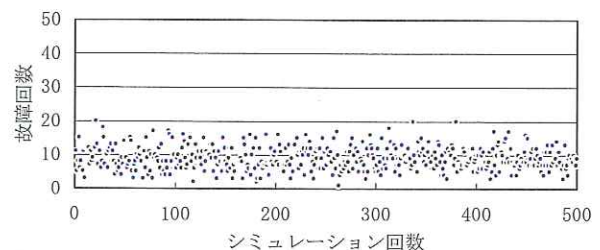


図-6 点検計画1（点検頻度：月2回）における年間故障生起回数

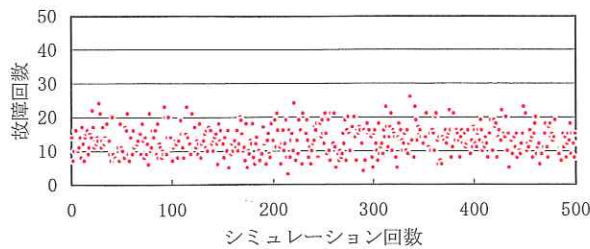


図-7 点検計画2(点検頻度:月1回)における年間故障生起回数

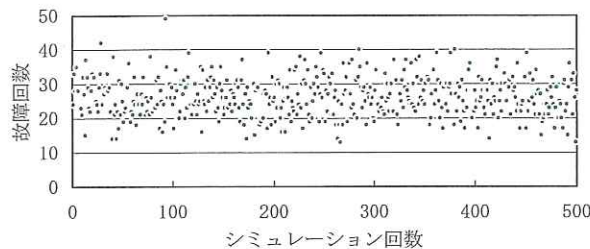


図-8 点検計画3(点検頻度:月0.5回)における年間故障生起回数

点検頻度を減らした点検計画3では、故障回数が機器158基当たり最大40回程度生起している。点検計画1のように点検頻度を多くとることにより、故障回数が最大20回程度に減少させる効果がシミュレーションできている。

4.1.2 年間保全コストの変動状況

シミュレーション実行中の試行回数に対する年間保全コストの変動を図-9～11に示す。

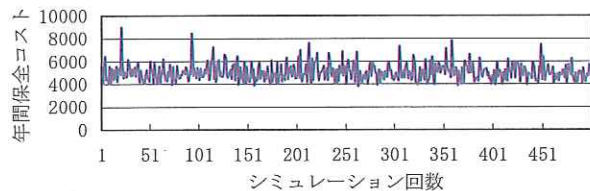


図-9 点検計画1(点検頻度:月2回)の年間保全コスト

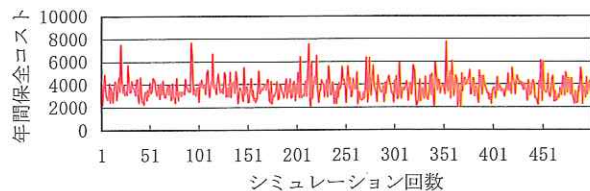


図-10 点検計画2(点検頻度:月1回)の年間保全コスト

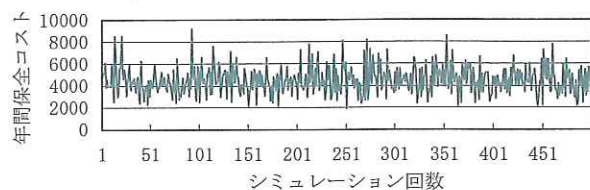


図-11 点検計画3(点検頻度:月0.5回)の年間保全コスト

シミュレーション手法を用いた下水道用機器の点検計画の評価

4.2 シミュレーションによる緊急保全回数と年間保全コスト

シミュレーション回数による年間保全コストの変動を打点(・印)して分布図とし、図-12に示す。この分布を対数正規分布で近似し、合わせて図-12に示す。

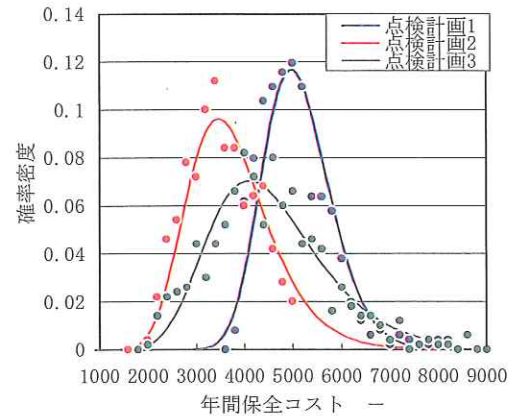


図-12 点検計画別年間保全コストの分布

この分布図から機器158基当たりの年間保全コストの平均値と90%区間推定値を算出して表-6と図-13に示す。

表-6 シミュレーション結果

年間予定点検回数	点検計画1	点検計画2	点検計画3
定期点検コスト	3,792	1,896	948
緊急保全コスト	1,227	1,777	3,523
年間保全コスト	5,019	3,673	4,471
年間保全平均値	5,019	3,673	4,471
信頼下限 5%	3,957	2,408	2,754
信頼上限95%	6,240	5,284	6,750
年間緊急保全回数	9.0	13.0	26.3
信頼下限 5%	3.5	6.3	17.0
信頼上限95%	14.5	19.6	35.5

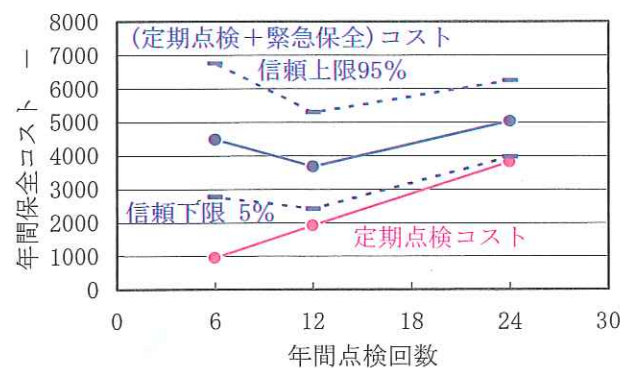


図-13 点検計画と年間保全コストのシミュレーション結果

現状行われている点検は、点検計画2であり、この計画での年間保全コストが最も安価な結果となった。点検回数を月0.5回に半減する(点検計画3)と、定期

点検コストは半減するものの緊急保全コストが増加し、年間保全コストは、現状の点検計画2よりわずかではあるが大きくなった。点検計画1は、現状の点検計画2の2倍の点検回数とするが、緊急保全回数は、点検計画2の2/3程度であり、定期点検コストが2倍となり、年間保全コストとして最も高価となった。

4.3 シミュレーション結果と実績コストとの比較

汚水処理量に対して統計⁸⁾から算出した実績の修繕費/点検費用を図-14に示す。

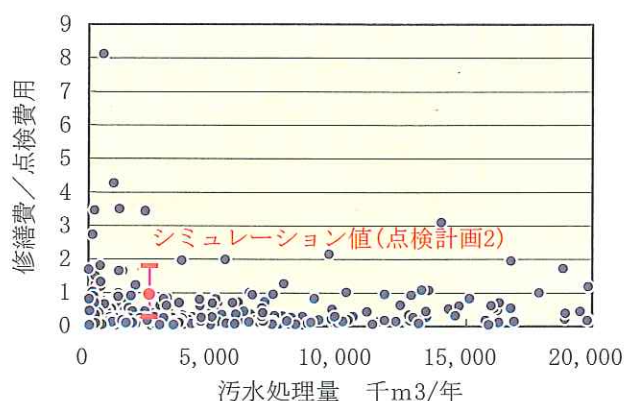


図-14 実績の修繕費/点検費用とシミュレーション値の比較(単独公共下水道)

このシミュレーション値には電気、建築設備などの緊急保全コストを含んでいないが、シミュレーション結果を図-14に打点して示す。実績の修繕費/点検費用に対し、シミュレーション結果が大きい。これは、シミュレーションでは修繕費を算出しているのではなく、故障による緊急保全費用を算出しているためであり、費用関数による機器別の緊急保全費用が、機器のオーバーホール費用を利用していることによって、修繕費より大きな値になっている。

5. まとめ

コスト縮減に聖域はなく、処理場の維持管理費縮減も課題となっているのが現状である。年間保全計画を評価する1手法を示すことができた。各機器の不具合発生間隔をシミュレーションすることにより定期点検

回数を多くすれば故障回数が減少し、減らせば、増加することが再現できた。これにより、定期点検費用と緊急保全費用を設定した上で、定期点検以前の不具合を故障と考え、機器の故障回数を推定し、時間計画保全による点検計画を年間保全コストで評価することができた。シミュレーションの試行回数に対する年間保全コストの変動を分布で示すことにより、年間保全コストの平均値、信頼区間値を推定した。

年間保全コストの分布には、シミュレーションの機器数が少ない場合は不連続な分布しか得られず、保全コストの信頼区間値を示すことができない恐れがある。そのため本シミュレーションは、小規模な処理場で点検する機器が少ない場合には推定する年間保全コストにバラツキが生じることが懸念される。

また、シミュレーションの際、機器の緊急保全費用を費用関数から推定したが、故障の内容により緊急保全費用は大きく異なることが予想される。シミュレーションの精度をあげるには、故障の内容と緊急保全コストを整合させることが重要と考えている。

〈参考文献〉

- 1) 下水処理場プラント機器の信頼性解析事例 中根進 下水道協会誌論文集 2006.4月号
- 2) 信頼性工学入門 p163 北川賢司著 コロナ社
- 3) 下水道維持管理指針-2003年版- 後編 p724 (社)日本下水道協会
- 4) 改訂版信頼性工学入門 p117 真壁 肇 編 日本規格協会
- 5) ベイズ推計による下水道機器の故障解析 中根進 下水道協会誌論文集 2010.9月号
- 6) トライポロジーを活用した設備診断に関する技術マニュアル(潤滑診断による状態監視保全) 2009年12月(財)下水道新技術推進機構
- 7) 平成17年度版下水道統計(電子版) 26-4 維持管理費・財源内訳(単独).xls (社)日本下水道協会
- 8) 平成17年度版下水道統計(電子版) 26-6 施設別維持管理費(単独).xls (社)日本下水道協会 (23.5.7 受付)



* (なかね すすむ)
昭和50年 中日本建設コンサルタント(株)入社
水工技術本部 技師長
平成19年より現職、技術士(上下水道部門:下水道)、
(社)日本下水道協会 特別会員