

下水処理場プラント機器の信頼性解析事例

－ 機器の累積ハザード解析 －

中日本建設コンサルタント（株） 水工技術本部 副本部長 中根 進

1. はじめに

平成16年度末で下水道普及率が68.1%に達し、設備の改築時期にきている処理場が多くなっている。設備改築修繕計画では、原則的に標準的耐用年数に達し、機能が低下した設備を対象に劣化診断を行い、財政規模などを勘案して優先順位を決め、事業費を平準化した上で事業計画を立案する。

事業費の平準化に際して、更新時期をやむをえず延伸しなければならない設備がでてくる。延伸設備には、故障リスクが少ない機器を対象とすることが望ましく、その判定の一指標として故障率を提案する。

2. 解析対象

平成15,16年度で設備改築診断を行った4処理場の設備維持管理データを使用して信頼性解析を行った。4処理場は処理規模も各々異なり、機器仕様は異なるが、同一機種間で解析した。

設備は、機器とその機器を動かすための補機や計装（以下、その構成要素という）で構成され、それらが一体となり機能する。設備の信頼性を評価するためには、その構成要素が直列、並列、またはその組み合わせで機能しているかを分析し、構成要素毎に解析する。一般に設備としての信頼性は、構成要素毎の信頼性を合成して評価する。

本報告では、設備としての解析ではなく、機器単体の解析結果を示す。

解析事例として処理場で24時間稼働し、設備として構成要素が少ない次の3種類の機器を選んで信頼性解析する。

- ・沈殿池のチェーンフライト式掻寄機
- ・重力濃縮槽の中央駆動懸垂形掻寄機
- ・返送汚泥ポンプ

3. 信頼性解析

3.1 故障内容と故障データ

信頼性解析には、機器の稼働開始日、故障日、故障内容、調査日が必要となる。

本報告では解析データを維持管理年報から求めた処理場もあり、故障日を特定できないデータも

あるが、設備維持管理日報などで故障履歴があれば機器の平均故障間隔（寿命予測）ができる。

解析には、機器の「故障」を定義する必要がある。ここでは、機器本体の故障を次のように考え、故障データを整理する。注油、潤滑油の補給や交換、分解整備による停止は、保全のための停止であり、「故障」としない。

1) チェーンフライト式掻寄機の故障

掻寄機のフライトシュー、本体チェーン等の交換は、使用を続けると故障に繋がると判断し、解析上「故障」とした。保護装置は機器の故障を予防する装置で、その作動は「故障」としない。

2) 返送汚泥ポンプの故障

軸封水断は保護装置が働いたもので、ポンプ自体の故障としない。電動機の故障はポンプの故障とする。

表-1の設備管理台帳などから同種の機器毎に故障日を抽出して図-1のような機器の使用状況図を作成し、故障日の間隔（区間時間） t を求める。

表-1 設備管理台帳例

機器名	No1 終沈汚泥掻寄機	
日付	履 歴	施工者
S60年4月〇日	No1,2 設置	〇〇会社
H2年8月〇日	No1,2 シュー交換	
H8年5月〇日	No1 スプロケット交換	〇〇会社
:	:	:

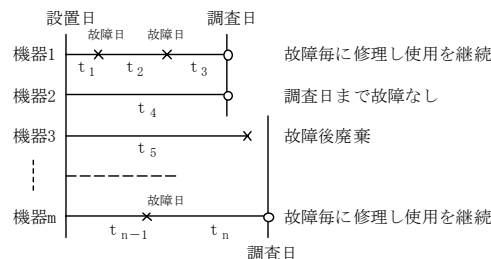


図-1 機器の使用状況図

図-1を基に故障の区間時間 t を小さいものか

ら並べ、**図-2**に示す故障解析用データを作成する。

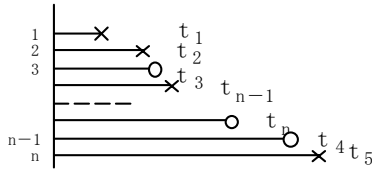


図-2 機器の故障解析用データ

3.2 解析の手順

図-1の機器は、故障した時点で寿命に達したのではなく、故障部を修理して使用を続ける機器で、解析上「修理系」の機器という。「非修理系」と「修理系」は、同じ解析手法をとるが、得られる結果は**表-2**に示す信頼度と平均故障寿命および故障率と平均故障間隔¹⁾である。非修理系の平均故障寿命は、俗にいう平均寿命である。

表-2 非修理系と修理系の解析例

非修理系	寿命分布： $f(t)$, MTF (平均故障寿命) 信頼度： $R(T)$, B_{10}
修理系	故障率： λ , MTBF (平均故障間隔)

以下に4処理場の最終沈殿池のチェーンフライト式掻寄機(以下終沈掻寄機という)を例に挙げ、解析手順を紹介する。終沈掻寄機の故障データを**図-2**のように整理した上で、**図-3**故障のヒストグラムを作成する。

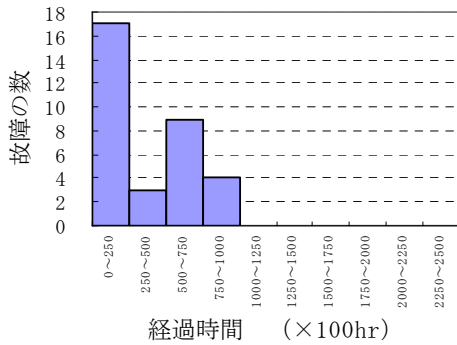


図-3 故障数のヒストグラム

ヒストグラムと故障率の関係²⁾を**表-3**に示す。修理系の故障率とは単位時間当たりの故障確率をいい、故障確率とはある時点 t_1 の残存数に対する故障数である。

表-3 ヒストグラムと故障率の関係

級番号	級	中心値	度数 (故障数)	残存数	故障確率	故障率(単位時間 当たりの故障確率)
i	$T_{i-1} \sim T_i$	t_i	f_i	$n_i = \sum_{j=i}^n f_j$	f_i/n_i	$f_i/n_i h$

図-3に示すヒストグラムの各柱の総面積を1として経過時間を ∞ とした滑らかな分布曲線を故障の確率密度関数 $f(t)$ といい、**図-4**に示す。

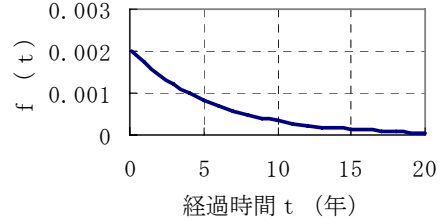


図-4 故障確率密度関数

図-4は、右下がりの曲線であるが、この故障の確率密度曲線は、故障の型によって一般的に**図-5**のように表される。²⁾

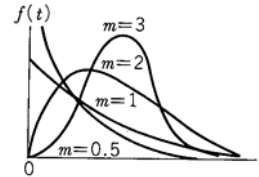


図-5 ワイブル分布の故障確率密度関数

図-4の曲線は、**図-5**の $m=1$ あたりに相当する曲線であり、これらの故障確率密度曲線は下式で表わされる。²⁾

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \quad (1)$$

ここに、 m ：形状パラメータ
 η ：尺度パラメータ
 γ ：位置パラメータ

上式は、ワイブル分布する故障分布関数を確率密度関数にしたものである。**図-5**のある時点 t で $f(t)$ 曲線の右側と左側面積が同じとなるのは、(2)式で表され、これを修理系の平均故障間隔 (MTBF) といい、非修理系では平均故障寿命 (MTTF) という。

$$MTBF(MTTF) = \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \quad (2)$$

ここに $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数という。

信頼度は $f(t)$ 曲線と同じ形状を示し、(3)式で表される。

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (3)$$

図-4の確率密度関数を故障率 λ ($\gamma=0$ とする)として関数で表したものが(4)式と**図-6**にな

る。

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (4)$$

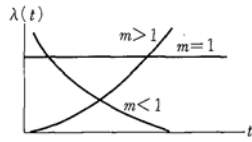


図-6 ワイブル分布の故障率曲線

(1) (4)式に示すmの値に応じて図-5, 6のようにグラフの形状が変化し, 故障の型を表わす。¹⁾

m < 1 故障率減少型→初期故障型

製造・設計上の不具合が各製品に内在しているため, 稼動初期に故障率が高く, 経時的に次第に故障率が減少する型である。

予防的な保全を行っても信頼性を向上させる効果がなく故障が生じてからの事後保全になる。

m = 1 故障率一定型→偶発故障型

何らかの要因で偶発的な故障原因が発生して, 機器などが使用不可となる型である。

m > 1 故障率増大型→摩耗故障型

稼動の始まりには故障の出方が少なく, 時間の経過にしたがって故障率が漸増する型である。予防的な保全が効果的な機器である。形状パラメータmと製品・機器の例を表-4に示す。

表-4 mの値と製品・機器の例¹⁾

m	製品・機器例
0 < m < 1	一部の電子部品, 電子素子
m = 1	電子部品
1 < m	機械部品(ベアリング, ブレーキ, シュー)

3.3 累積ハザード法

故障履歴データからワイブル分布の各パラメータ (m, η, γ) を推定することが信頼性解析である。

その一手法として累積ハザード法を用いて, ワイブル分布のパラメータを推定する。

図-2の故障解析用データを表-5のようにして累積ハザード値②を算定する。図-2の○印は, 故障日ではなく, その時点まで故障していない打

ち切りデータとして扱う。

表-5 累積ハザードの求め方

データ順位 i	区間時間① × 100hr	故障1・打ちり0 δ	データ逆順位 K	① 1/K	② Σ 1/Ki = H(t)
1	44	1	33	0.030303	0.030303
2	47	1	32	0.03125	0.061553
3	58	1	31	0.032258	0.093811
4	65	1	30	0.033333	0.127144
5	69	1	29	0.034483	0.161627
6	80	1	28	0.035714	0.197341
~~~~~					
30	836	1	4	0.25	1.670456
31	880	1	3	0.333333	2.003789
32	920	0	2	0	2.003789
33	983	0	1	0	2.003789
T	12,672	25			

表-5の経過時間 (区間時間) と累積ハザード値に自然対数をとってグラフ (図-7参照) に表すと一次直線で表され, その傾きが形状パラメータmとなり, 切片bとmを使って(5)式の尺度パラメータηが推定できる。

$$\eta = \frac{-b}{m} \quad (5)$$

位置パラメータγは回帰直線が上に凸になった場合に, 図-5のワイブル分布の故障確率密度曲線の時間的ずれとして表される。γは保障時間を表し, その時点までは故障が生じないことを示す。以降の解析では, γ = 0 とする。

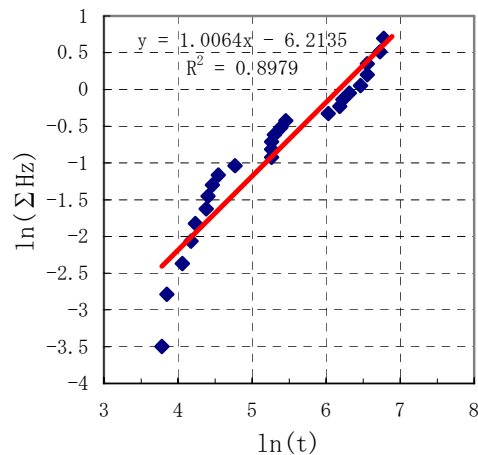


図-7 終沈掻寄機の累積ハザード解析

図-7の時間軸 ln(t) の値が 3.5~4.5 の範囲で, プロットしたデータが下降し, 回帰線とのずれが大きくなっている。これは故障原因となるチェーンやスプロケットの交換を予算措置により複数年度にかけて順次修理するため, 区間時間が短いデータが多くなることによるものと考えられる。

形状パラメータ m = 1.006

尺度パラメータ η = 480 (× 100hr)

m = 1.006 ≒ 1 であり, 故障率が一定で偶発故障

型を示す。m, ηより(3)式、(4)式よりそれぞれ信頼度、故障率を算定した結果を図-8に示す。

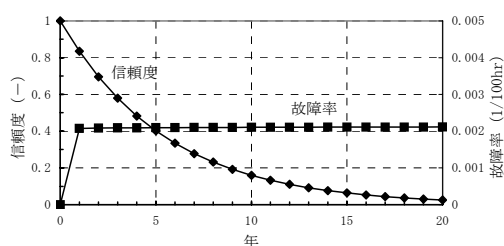


図-8 終沈掻寄機の信頼度・故障率

#### 4. 解析事例

##### 4.1 掻寄機および返送汚泥ポンプ

累積ハザード法により、上記の終沈掻寄機を含め、最初沈殿池のチェーンライト式掻寄機や重力濃縮槽の中央駆動懸垂形掻寄機と返送汚泥ポンプ(横軸無閉塞ポンプ)の解析事例を示す。図-7, 9~11に各機器の累積ハザード解析、表-6にその結果を示す。

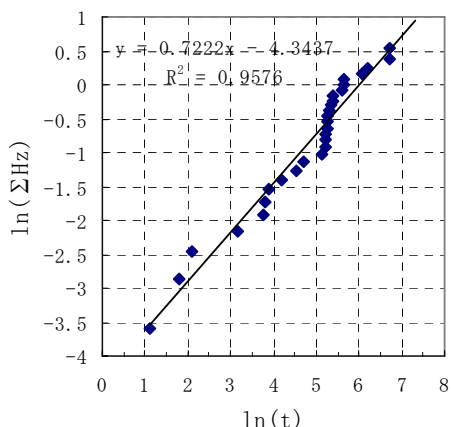


図-9 初沈掻寄機の累積ハザード解析

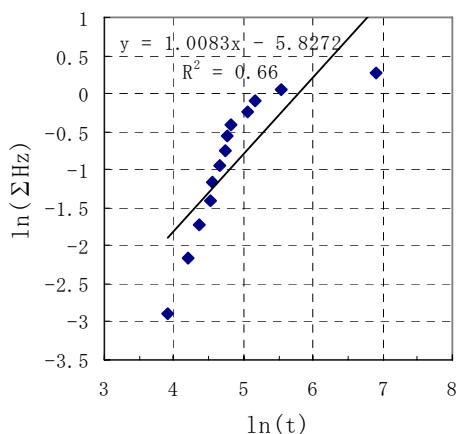


図-10 濃縮槽掻寄機の累積ハザード解析

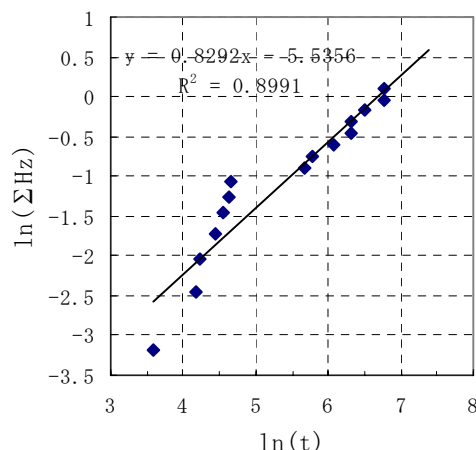


図-11 返送汚泥ポンプの累積ハザード解析

累積ハザード解析の結果、mから(2)式を使って、各機器の平均故障間隔(MTBF)を算定し、表-6に示す。

表-6 累積ハザード解析の結果

機器	データ数		パラメータ		平均故障間隔 MTBF (年)
	全体	故障	形状 m (-)	尺度 η (×100hr)	
初沈掻寄機	36	28	0.722	409	5.7
終沈掻寄機	33	25	1.006	480	5.5
濃縮槽掻寄機	18	13	1.008	324	3.7
返送汚泥ポンプ	24	15	0.829	793	10.0

各機器について90%の信頼度で平均故障間隔の区間推定結果を表-7に示す。

表-7 平均故障間隔の区間推定

機器	平均故障間隔	区間推定	
	MTBF (年)	下限 (年)	上限 (年)
初沈掻寄機	5.7	3.8	7.3
終沈掻寄機	5.5	4.1	8.3
濃縮槽掻寄機	3.7	4.2	11.3
返送汚泥ポンプ	10.0	7.2	17.9

表-6のm, ηを使って初沈と終沈掻寄機の信頼度と故障率を算定して図-12に示す。

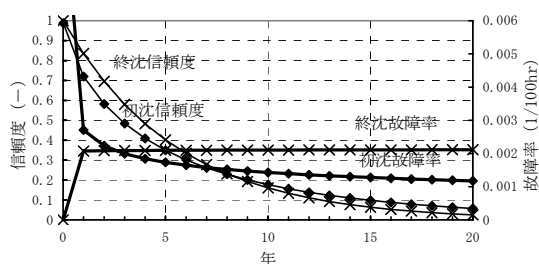


図-12 初沈と終沈掻寄機の信頼度と故障率

初沈掻寄機、返送汚泥ポンプは $m < 1$ で、初期故障型を示し、予防的な保全を行っても信頼性を向上させる効果がなく故障が生じてからの事後保全する故障タイプとなった。終沈掻寄機、濃縮槽掻寄機は $m \approx 1$ で偶発故障型を示し、同じチェーンフライト式でも初沈と異なる故障の型を示した。

掻寄機の平均故障間隔は、4~6年程度であり、4~6年程度に一度故障する確率が63%程度あることを示している。後述4.2に示すスプロケットホイールのような摩耗故障型の部品で構成される機器は、本来摩耗故障型の故障タイプとなる。しかしながら、解析データの中に初沈、終沈とも約2年でスプロケットを交換した初期故障の事例が各3池分含まれていることや予算措置により修理を分けて行っているため、区間時間の短いデータが多いことが、形状パラメータ $m$ に影響を与え、初期故障型や偶発故障型を示したと考えられる。短期間でスプロケットを交換した事例は、スプロケット歯面の焼入れ不足という初期不良とのことであった。

図-12で初沈掻寄機は、例えば15年経過した時点で信頼度が0.10となる。これは15年経過した時点で不具合なく稼動している割合が10%であることを示している。同様に終沈の場合は、15年経過した時点で6%稼動しており、初沈と終沈を比較すると8年程度経過すると初沈の方が、信頼度が高いという結果になった。

分流式の場合、初沈の掻寄機は、使用条件が終沈に比べて不利と考えられる。

- 1) 初沈のほうが終沈より水質が悪いこと。
- 2) 掻寄速度は一般的に初沈 0.6m/min 終沈 0.3m/min と設定されており初沈の方が速いこと。

初沈と終沈では、チェーン強度や部品の使用材質は結果的に同じものを使用することが多く材質的な差でもない。

初沈の機長は、同一処理場では終沈に比べ短く、物理的に掻寄機各部に作用する力が小さいため、摩耗等が少なく、8年程度経過後の信頼性が高いという結果になったと思われる。

一方、濃縮槽掻寄機は、中央駆動懸垂形で摺動部がなく信頼性が高いこと予測されたが、臭気対策のため覆蓋されているため、掻寄機を構成する部材の気相部での腐食による故障が多く、信頼性がチェーンフライト式に比べて劣る結果となった。

返送汚泥ポンプは $m = 0.829$ で平均故障間隔が10年であった。

解析結果を他事例と比較する。水道施設維持管理指針には、海外の例⁹⁾であるが配水池への送水ポンプの解析例が示されている。

参考表-6.2.1 ポンプシステムの故障と修理に関するデータ

	MTBF (平均故障間隔) (hr × 10 ⁴ )	MTTR (平均修理時間) (hr)
ポンプ	0.032066	9.6
パワートランスミッション	0.035620	2.3
モータ	0.066700	6.9
バルブ	0.014440	11.6
制御系	0.083580	3.7

返送汚泥ポンプは、ポンプ、伝達装置、モータを含めて本体として解析した。上表は、構成要素毎のMTBFであるが、比較のため送水ポンプとして3要素をまとめたMTBFを算定すると、1.5年(13,500h)であった。

また、建築設備の床排水ポンプだけの信頼度分析の結果⁴⁾では、 $m = 0.96$ 、 $\eta = 2,428 \times 100\text{hr}$ であり、MTBFは28.2年(2,473 × 100hr)と報告がある。

#### 4.2 掻寄機スプロケットホイールの寿命予測

最終沈殿池の主要部品であるスプロケットホイールについて寿命予測を行った。故障データの中からスプロケットホイールを交換した日を抽出し、他の故障日は打ち切りデータとして処理し、累積ハザード解析した。(図-13 参照)

スプロケットホイールは反転して利用を継続できるが、点検記録ではあきらかにできなかったのが新品に交換したものと仮定した。また、初期不良によるスプロケット交換の3データを除いて解析した。

その結果、 $m = 2.094$ で摩耗故障型を示し、平均故障寿命は14年という結果を得た。

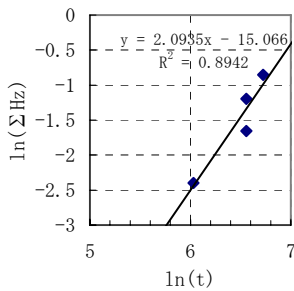


図-13 終沈スプロケットホイールの累積ハザード解析

国交省が示す機器の標準的耐用年数⁵⁾では、搔寄機は15年であり、スプロケットホイールの平均故障寿命と同程度の年数となった。

#### 4.3 設備改築計画での利用

設備の改築や修繕計画で事業費の突出を避けるため、改築や修繕時期を延伸したい設備がでてくる場合、その機場で相対的に故障率が小さい機器をその候補とすることができる。

終沈搔寄機は、故障率が一定であり、15年経過した搔寄機をあと5年延伸させようとした場合、 $0.002(1/100\text{hr}) \times 5\text{年} \times 365\text{日} \times 24\text{hr/日} = 0.9$ 回故障する確率がある。故障の確率を少なくしたい時には、延伸期間を短くしたり、故障確率の小さい機器を延伸の対象とする。

#### 4.4 修理系機器の点検周期

定期点検は、故障の発生を未然に防止するために行い、定期点検の周期が長ければ点検費用はかからないが、故障の発生する確率は高くなる。ただし、故障率が時間に関係なく一定 ( $m=1$ )、または時間経過ともなって減少する場合 ( $m<1$ ) では、故障が生じてからの事後保全が有効である。

ある修理系の稼働開始(時点0)から故障にいたるまでの時間(故障時間間隔)の分布関数を  $F(t)$  とおいて、1回当りの点検費用を  $C_M$ 、突発故障の発生による損失費用を  $C_e$  とし、この修理系に関してかかる単位時間当りのコストを最小とする点検周期  $T$  は、(6)式で表される。¹⁾

$$m \left( \frac{T}{\alpha^{1/m}} \right)^{m-1} \cdot \int_0^{T/\alpha^{1/m}} e^{-t^m} dt - \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{T}{\alpha^{1/m}} \right)^m \right\} \right] = \frac{1}{C_e/C_M - 1} \quad (6)$$

ここにワイブル分布の平均値は、(7)式となる。

$$\mu = \alpha^{1/m} \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \quad (7)$$

終沈スプロケットホイールについて、(6)式より式の左辺のグラフを、横軸に  $T/\mu$  をとって  $K=1/(C_e/C_M-1)$  を、図-14に示す。

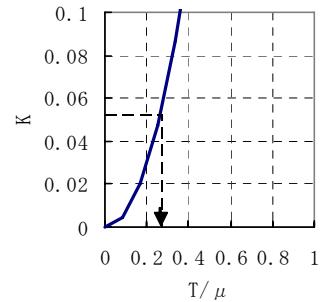


図-14  $T/\mu$  と  $K$  の関係

ここで、終沈の故障による損失費用  $C_e$  をどのように算出するか議論しなければならないが、最低限スプロケットを交換修理する費用が必要であり、 $C_e/C_M=20$  と仮定すると、 $K=0.053$  となり図-14より  $T/\mu=0.26$  であり、単位時間当りのコストが最小となる最適点検周期  $T$  は、3.6年となる。

## 5. まとめ

本報告では、信頼性解析の手順と事例を紹介したが、維持管理データから、機器の信頼性解析を行うことにより機器の故障率、平均故障間隔などを推定でき、それらの解析値を設備の改築修繕計画に利用できる。

故障時の損失費用から最適な点検周期を算出することができ、故障率とともに改築修繕計画に利用が可能である。

処理場の管理年報は、信頼性解析を行うための基礎資料となるが、故障内容を把握する記録として不十分なことがある。保守・修繕の記録は、できるだけ故障発生日、内容を詳細に残していただくことが重要である。

### <参考文献>

- 1) 品質保証のための信頼性入門 p.98, pp. 211~255 日科技連
- 2) 信頼性工学入門 pp. 74~119 日本規格協会
- 3) 水道施設維持管理指針 p. 293 1998年版
- 4) 雑排水ポンプシステムの信頼性解析事例 鹿島建設 第32回日科連信頼性・保全性シンポジウムH14年7月
- 5) 下水道事業の手引 pp. 192~194 平成16年版