

下水道プラント機器の耐用年数の推定

中日本建設コンサルタント株式会社 ○渡邊 博
中根 進

1. はじめに

下水道プラント機器には標準的耐用年数が示されているが、設備を管理する自治体の財政事情の切迫や下水道長寿命化支援制度の創設もあり、適正な維持管理を前提にした上で機器の延命化、長寿命化が求められている。自治体が管理している機器の余寿命を知るためには、現状の維持管理状態での機器の寿命（物理的耐用年数）を知る必要がある。

藤生らの調査・研究により、我国下水道プラント機械の耐用年数（改築時期）分布¹⁾が示された。

本論文では、現在稼動している機器の故障解析を行い、その故障確率分布を求め、我国の下水道プラント機械の改築年数確率分布を事前分布とし、ベイズの定理により稼動中の機器の耐用年数分布を推定する。

2. 下水道プラント機器の実績耐用年数

藤生ら¹⁾が全国の機械改築件数シェア分布や、改築時の事業費に基づいて試行反復計算を行い、ワイブル分布で耐用年数（改築時期）確率分布を表-1で示している。

ここで機器の信頼性を時間的な品質として、信頼度Rや故障率λなどをワイブル分布で表す。

・信頼度R：
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \dots\dots\dots (1)$$

故障確率F(t)は、 $F(t) = 1 - R(t)$ で表す。

・故障率λ：
$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \dots\dots\dots (2)$$

・故障確率密度f（本文中、故障（改築）確率分布と呼ぶ）：

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \dots (3)$$

ここに、m, η, γ：分布のパラメータ

表-1の機械設備ケース3のパラメータを使って、機械設備耐用年数の確率分布を図-1に示す。この図が全国のプラント機械設備の耐用年数の分布となる。

3. 下水道プラント機器の故障確率

筆者の一人が解析した下水道機器のハザード解析結果の一例を図-2²⁾に示す。この図の機器は、故障率λが一定で、故障確率密度fの値は減少している。故障確率F（1-信頼度R）は、故障確率密度の面積であり、経過年数とともに漸増する。

図-2のような機器は、故障確率分布を指数分布として表す

表-1 工種別、ケース別最良近似ワイブル分布¹⁾

工種	ケース	m	η	μ (年)	σ (年)
機械	1	3.40	26.0	23.4	7.6
	2	3.66	27.7	25.0	7.6
	3	4.09	27.8	25.2	6.9
電気	1	4.31	25.8	23.5	6.2
	2	4.47	27.4	25.0	6.3
	3	4.84	28.8	26.4	6.2
機電	1	3.69	27.0	24.4	7.4
	2	3.97	28.5	25.8	7.3
	3	4.34	29.2	26.6	6.9

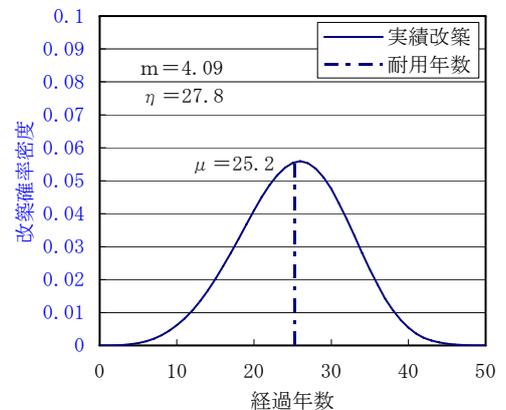


図-1 機械設備耐用年数分布¹⁾

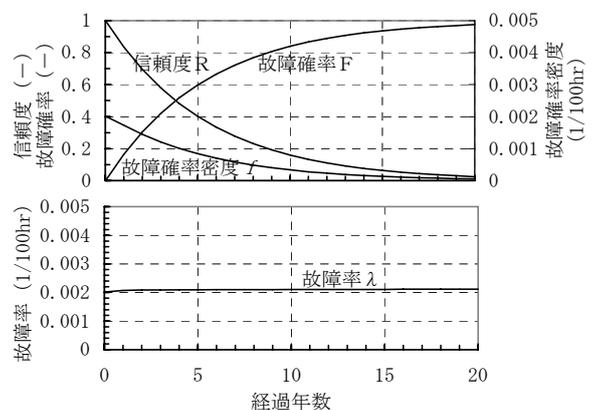


図-2 終沈掻寄機の故障確率分布

ことができる。

$$\text{故障確率密度 } f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \dots\dots (4)$$

各処理場の個別機器で故障解析を行うには、故障回数が少ないため、最小二乗法を用いて故障確率、故障確率密度などをワイブル分布で近似することが難しくなる。指数分布を使うことによって分布のパラメータの同定が容易となる。この指数分布のパラメータ λ は、故障率といわれ、機器設置から調査時までの期間（年）とその間に起きた故障の回数を使って(5)式で算出できる。

$$\text{故障率 } \lambda = \frac{\text{故障回数}}{\text{調査期間(年)}} \quad \dots\dots (5)$$

4. ベイズの定理

A事象を故障確率、B事象を改築確率とする。A事象とB事象の同時確率は、図-3の着色部であり、(6)式で示す。

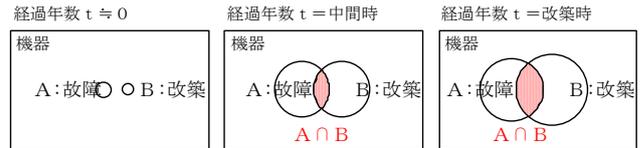


図-3 ベン図による故障確率と改築確率

A事象とB事象の同時確率 $=P(A \cap B)$

$$P(A \cap B) = P(B | A) \cdot P(A) \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 $P(B | A)$: A事象が発生している時、B事象が起きる確率（条件付確率）

$P(B)$: B事象が発生する確率

A事象とB事象が独立事象であれば、A事象とB事象の同時確率は、次式で求まる。

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad \dots\dots (7)$$

(6)は、確率を確率分布（確率密度）に置き換えても成立する。

この同時確率分布を機器の耐用年数分布とし、その確率値が0.5の経過年数をその機器の耐用年数とする。

ここで、B事象の改築確率には、全国の機械設備の改築確率（図-1の機械設備耐用年数分布）とする。A事象の故障確率には、各機器の故障確率密度 f を用いる。

下水道機器のような修理系の機器は、初期故障が多く、初期故障型を示すが、経過時間 $t \approx 0$ の故障確率 $F(t)$ が低く、故障確率を示す円の大きさが小さい。また改築確率は0である。時間の経過とともに、修理系の機器は保守点検が適正になされるため、故障率は一定となる。改築確率は、部品の摩耗劣化などとともに年々大きくなり、機器の寿命といわれる時期には、故障確率と改築確率の同時確率が高くなることが予測される。

5. 故障確率による耐用年数の推定

表-4に示す各処理場の機器の耐用年数を推定する。調査した故障回数から(5)式で故障率 λ を求めて、表-4に示す。

図-1の機械設備耐用年数分布と表-4の故障確率 $f(t)$ 分布を使って、(7)式の同時確率を算定し、故障確率 F が0.5の経過年数を読み取り耐用年数とする。

5.1 機器の耐用年数の推定結果

終沈汚泥掻寄機（チェーンフライト式）、返送汚泥ポンプ、濃縮汚泥掻寄機（中央懸垂型）について経過年数と推定耐用年数の関係の一例を図-5～7に示す。

その結果、終沈汚泥掻寄機の耐用年数は19.9年、返送汚泥ポンプは、22.4年、濃縮汚泥掻寄機は、19.6年となった。表-4のうち、図-5～7に示さなかった機器については、表-5に耐用年数の推定結果を示す。

表-4 各機器の調査年数と故障回数

処理場および機器名		調査期間 年	故障回数 回	故障率 λ 1/年
T	T1終沈掻寄機	17.43288	5	0.2868144
	T2返送汚泥ポンプ	17.43288	0	0
	T3返送汚泥ポンプ	17.43288	1	0.0573629
	T濃縮汚泥掻寄機	17.43288	2	0.1147258
U	U1終沈掻寄機	17.28219	2	0.1157261
	U2終沈掻寄機	17.28219	3	0.1735891
	U1返送汚泥ポンプ	17.28219	3	0.1735891
	U2返送汚泥ポンプ	17.28219	2	0.1157261
	U濃縮汚泥掻寄機	17.28219	0	0
H I	H I 1終沈掻寄機	20.73151	6	0.2894146
	H I 1返送汚泥ポンプ	20.73151	2	0.0964715
	H I 2返送汚泥ポンプ	20.73151	3	0.1447073
	H I 濃縮汚泥掻寄機	20.73151	9	0.4341218
H	H1終沈掻寄機	18.55068	2	0.1078127
	H2終沈掻寄機	18.55068	1	0.0539064
	H1返送汚泥ポンプ	18.55068	0	0
	H2返送汚泥ポンプ	18.55068	0	0
	H1濃縮掻寄機	18.55068	2	0.1078127

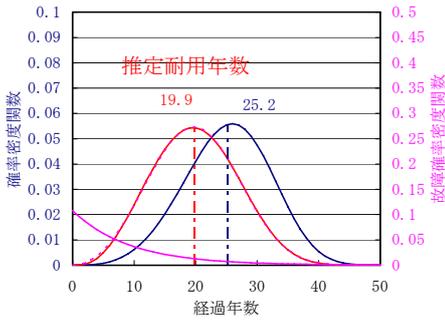


図-5 H1 終沈掻寄機

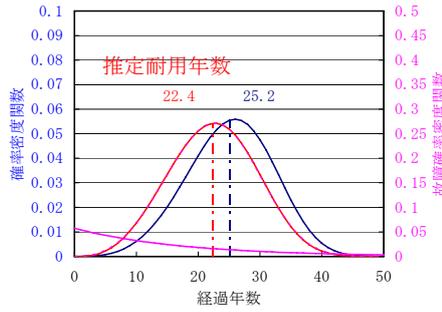


図-6 T3 返送汚泥ポンプ

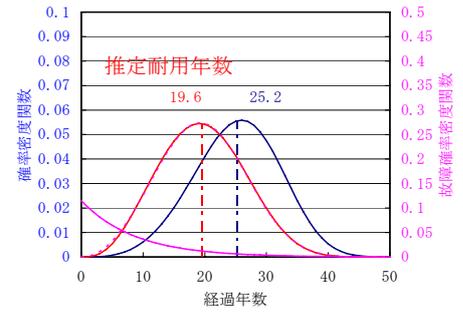


図-7 T1 濃縮汚泥掻寄機

5.2 機器の推定耐用年数と実績耐用年数

解析に利用した機器が実際に更新した年度を調査し、それを実績耐用年数とし、推定した耐用年数との比較を表-5に示す。

調査時毎に故障解析を行い、表-5のような耐用年数が推定できれば、機器の余寿命を知ることができる。

余寿命 = 推定耐用年数 - 経過年数 (調査期間)

表-5の機器は、調査後、劣化の程度、標準的耐用年数、事業費の平準化等を勘案した上で5ヶ年の再構築(更新)計画にのせられ、この計画に沿って実際に機器が更新された。このため、調査時に推定した耐用年数に対し実際の耐用年数は一致しせずズレを生じている。また、表-5の実績耐用年数欄が-の機器は、調査時に本体チェーンを修繕工事で交換した直後であったため、改築していない。

推定した耐用年数と実績耐用年数の関係を図-8に示す。図中*印の機器を除くと推定耐用年数と実績耐用年数は良く一致したと考えられる。*印の機器については、他の処理場の機器に比較すると初期故障など故障回数が多いため、推定耐用年数が短くなっている。これらの機器は故障原因を解明し、事前に対策が必要と思われる。

6. まとめ

機器の故障確率分布と設備耐用年数分布を用いて耐用年数を推定した。その結果、筆者が調査した処理場の機器の多くは、推定耐用年数に近いが、または超えている結果で余寿命がほとんど無い状態となった。

下水道管理者は、機器を点検したならば、故障の有無にかかわらず、調査期間を更新し、故障があれば調査期間と故障回数を更新して機器の故障確率密度を算定する。これにより、経過年数と推定耐用年数の差が余寿命であるから、つねに余寿命を明確しておくことができるようになる。故障実績が無い機器については、この手法では耐用年数を推定できないのが今後の課題である。

<参考文献>

- 1) 下水道機電設備のマクロマネジメント手法 藤生 和也 花木 啓祐 (社) 土木学会, 建設マネジメント研究論文集, Vol.15, 2008/12
- 2) 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
【問合わせ先】中日本建設コンサルタント株式会社 水工技術本部
〒460-0003 名古屋市中区一丁目18番6号 TEL 052-232-6055 E-mail s_nakane@nakanihon.co.jp

表-5 推定耐用年数と実績耐用年数の比較

機器名	調査時 経過年数	推定 耐用年数	実績 耐用年数
T1終沈掻寄機	17.4	12.4	-
T2返送汚泥ポンプ	17.4	25.2	27
T3返送汚泥ポンプ	17.4	22.4	27
T濃縮汚泥掻寄機	17.4	19.6	25
U1終沈掻寄機	17.3	19.5	20
U2終沈掻寄機	17.3	16.3	21
U1返送汚泥ポンプ	17.3	16.8	21
U2返送汚泥ポンプ	17.3	20.9	21
U濃縮汚泥掻寄機	17.3	25.2	21
H I 終沈掻寄機	20.7	12.3	25
H I 1 返送汚泥ポンプ	20.7	20.5	25
H I 2 返送汚泥ポンプ	20.7	18.1	25
H I 濃縮汚泥掻寄機	20.7	8.9	23
H1終沈掻寄機	18.6	19.9	24
H2終沈掻寄機	18.6	22.6	24
H1 1 返送汚泥ポンプ	18.6	25.2	24
H2 返送汚泥ポンプ	18.6	25.2	24
H1 濃縮掻寄機	18.6	19.9	21

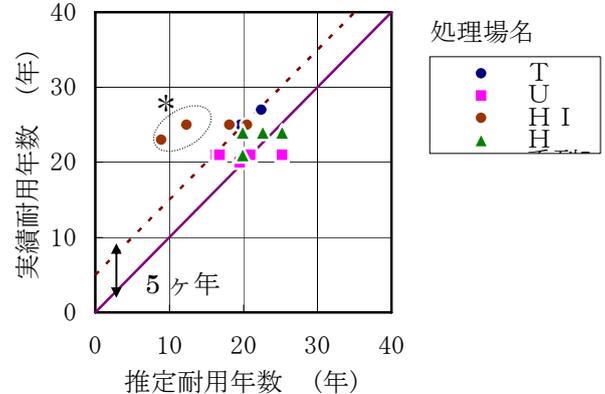


図-8 推定と実績耐用年数の関係