

下水道設備インフラの効率的な運用と維持管理のための設備診断技法

下水道設備老朽度診断その1(総括)

原田敏郎*、柏木雅彦**、早稲田邦夫**

増田和夫***

* 東京都下水道サービス(株)

東京都千代田区大手町2-6-2日本ビル

** (社) 東京下水道設備協会会員 (株) 日立製作所

*** (社) 東京下水道設備協会会員 (石川島播磨重工業(株))

概要

下水道設備を適切に維持管理していくためには、合理的な改良やリノベーションが必要である。

改良やリノベーション実施の意志決定は耐用年数や設備老朽度などによるが、老朽度を定量的に判定し、どこかの機場の、どの設備から補修・改良やリノベーションを行っていくのが最適かと言う戦略的な情報整備を行うシステムは少ない。このテーマに対する一つの解決技法として、物理的要因・機能的要因・社会的要因からなる診断項目に評価点をつけ、設備や機場の老朽度合を定量的且つ総合的に判断するポートフォリオ技法や設備の余寿命を推定する技法を開発した。また、経済的診断としてのライフサイクルコスト法を試行した。本稿はこれらの技法に関する概要を述べたものである。

本技法は、リノベーション戦略の策定を支援する技法として評価され、東京都下水道局にて採用されている。診断対象設備は、水処理・ポンプ・焼却などの機械設備および電気設備など下水道の全設備である。

キーワード

下水処理、設備診断、ポートフォリオ、ライフサイクルコスト、余寿命、リノベーション

1. はじめに

都市圏における下水道は、建設の時代を終え、質的向上を中心としたリノベーション(以下、再構築と記す)。単なる更新ではなく、老朽化した施設の近代化・高付加価値化などを目的とする)が主体となってきている。また、耐用年数を超えた設備が散見される状況にあるが、耐用年数を超えたら更新するという事にはならず、各設備の老朽化度合を定量的に判定し、多方面から見た情報整備を行って、最適な意志決定を行う科学的技法が求められている。本稿では、かかる要望に応えるために開発した技法の概要を述べる。

2. 設備の再構築戦略策定支援技法の手順

我々が目的とした設備診断技法は、信頼性技術や統計的手法に立脚した定量的で実践的な診断技法を確立すると共に、どこかの機場のどの設備から再構築や改良・補修を行うのが最適かと言う戦略問題を支援できる総合技法である。

各種文献調査の結果、上記の目的に合う技法は見出せず、開発せざるを得なかった。開発した診断技法の概略手順を図1に示し、以下に略記する。

- 1) 各機場からの更新要望情報や建設時期など多様な情報から、老朽度診断の対象とする複数の機場、設備の設定が行われる。
- 2) 現地調査団が結成され、設備毎に準備された「現地調査票」に基づき、設備を五感により診断すると共に、機場の技術者、管理者にヒアリングを実施し、老朽度を評価する。
- 3) 現地調査票に記入された診断結果を、「チェックリスト」にインプットする。「チェックリスト」は帳票ソフトで作成されており、後述する数式や判定モデルにより、設備毎の評価値や余寿命値が算出される。「チェックリスト」の情報は、本技法の根幹を成す情報である。また、設備毎の「チェックリスト」から、社会的要因やライフサイクルコストが記載された、1機場1シートの「総合評価表」が作成される。

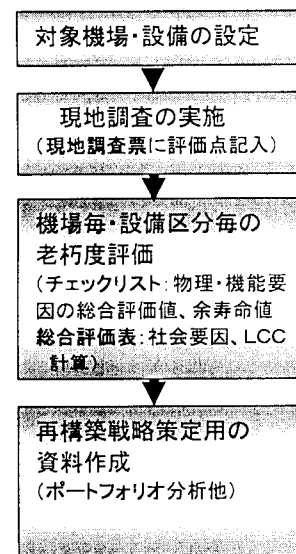


図1 再構築戦略策定支援技法の手順

4) 一方、「チェックリスト」の情報から、再構築戦略策定の根幹をなす、ポートフォリオや各種分析情報が作成される。これらの情報は、当局による再構築戦略の策定に供される。

3. 設備診断技法の要素技術

実践的な設備診断を開発する際の問題は、対象とする設備の区分をどうするか、診断要因としてどんな項目を採用するか、評価点をどうするか、設備内の主機・補機の扱いをどうするか、適正な評価をする体制は、どうあるべきか等であった。

これらの課題に示唆を与えてくれた資料は、文献¹⁾などの資料であり、これらの資料を参考にして設備診断の総合的技法構築の要素を検討した。以下に検討した要素技術につき述べる。

(1) 設備区分 (設備群) の扱い方

設備区分の分類は文献¹⁾の中分類を基本として採用したが、池の系列などで創設・増設系の時期が大幅に異なるような場合は区別した。例として、電気設備の設備区分をあげると表 1 の通りである。本例はポンプ所の例で、比較的単純であるが、動力制御設備などは電気室毎に区分した。

(2) 設備診断要因

設備診断要因については、文献¹⁾を参考にして、物理的要因、機能的要因とした。さらに、機場全体の評価として、社会的要因を加味した。

診断要因の詳細については本稿に続く2編の論文を参照頂きたい。

(3) 診断要因の評価点

現地調査の評価点を如何に扱うかも大きなテーマである。

一般的には5点法(1~5点)が各種評価に採用されるが、調査員の判断基準として出来るだけ評価の差が出にくいこと、感覚的に捉えやすいことなどを考慮して、表 2 に示す様な0~3点の範囲を評価点とする事とした。

信頼度の議論においては、評価点0は信頼度1.0であり、評価点3.0は信頼度0すなわち、故障率100%、不信頼度は1.0であり、設備寿命は既に尽きていると判断できる。また、現地調査は2名以上の専門調査員により評価し、評価の合理性を確保した。

(4) 設備や要因項目の重み

一つの設備区分は主機や補機など多くの単独設備により構成されたシステムとなっている。

設備区分の評価は、単独設備毎に診断された評価点を総合して評価する必要がある。また、設備の診断要因間の評価点を総合して一つの評価点とする必要がある。このために、単独設備間の重み付、要因間の重み付が必要である。各々につき表3、4に示す。

重み付の詳細については本稿の続編(その2)を参照頂きたい。

4. 設備の総合的老朽度評価

設備の老朽度は物理的要因、機能的要因により診断されるが、該当設備の総合評価を如何に扱うか、また、機場毎に比較するためには、機場全設備の総合的な評価をどうするか、と言う課題がある。

事例を表 5 に示す。この例は処理場の、ある池系列の動力制御設備の例であり、物理的要因(X1)、機能的要因(X2)の評価点は各々1.43、0.45である。設備評価は不信頼度を表わし、これを最大評価点3.0で基準化した数値が不信頼度である。

不信頼度1.43/3と、同じくと0.45/3を持つシステムの、直列系の不信頼度を評価点に換算した総評価点(Y)は表 5 下段に示す式となり、1.67となる。

表 1 設備区分の例(電気設備)

特高受変電設備 高圧受変電設備 自家発電設備 動力制御設備 無停電電源設備 監視制御設備 遠方監視制御設備	設置場所・置年度による小区分
	汚水沈砂池 雨水沈砂池 汚水ポンプ 雨水ポンプ ディーゼル掛ポンプ

表 2 評価点

正常	0
ほぼ正常	1
対策を要す	2
至急対策を要す	3

表 3 設備の重み係数例
(汚水ポンプの例)

ポンプ	1.0
電動機	1.0
吐出弁類	0.5
補助機器類	0.5

表 4 診断項目の重み係数

物理的要因	0.85
機能的要因	1.00
社会的要因	0.85
経済的要因	—

表 5 設備区分の設備診断表例
(処理場動力制御設備の例)

物理的要因(X1)	1.43
耐用年数超過率	1.00
機能的要因(X2)	0.45
総評価点(Y)	1.67
$Y = [1 - (1 - X1/3) * (1 - X2/3)] * 3$	

機場全体の設備総合評価は、各設備区分毎の総評価点 (Y) の平均値として、機場の設備全体の評価点 (X3) が計算される。表. 6にポンプ所の例を示す。

このポンプ機場の設備全体の評価点は2.16であり、老朽度が進んでいることが分かる。(X3)は機場間の比較に利用される。

表 6 機場の設備診断総合評価例
(ポンプ機場の例)

設備区分	物理要因	機能要因	総評価点(Y)
沈砂池	1.76	1.68	2.45
汚水ポンプ	0.98	0.63	1.40
雨水ポンプ	0.54	0.97	1.33
特高受変電	1.39	1.03	1.94
高圧受変電	1.72	0.81	2.06
自家発	1.43	0.86	1.88
動力制御	1.78	1.31	2.31
監視制御	0.00	1.51	1.51
遠方監視制御	0.00	1.20	1.20

設備全体評価点
(X3)
2.16

表 7 機場の社会的要因評価例

法規上の問題点	1.00
労働環境上の問題点	2.00
周囲環境上の問題点	0.50
町づくりとの関係	0.00
拡張・増設余地	1.70
災害対策上の問題点	1.00

社会的要因評価点
(X4)
0.88

社会的要因は機場全体に対し評価される。ある機場の評価例を表. 7に示す。診断項目毎に重みをつけ、その平均値に社会的評価の重み0.85を乗じた値が (X4) である。

表. 6, 7は「総合評価表」に表示される。

5. ポートフォリオによる再構築戦略支援技法

老朽化した設備は各機場に存在するが、設備の再構築は、予算執行上や監督上の問題などから、計画的に執行される。ポートフォリオは多様な製品群を2軸の要因で弁別して、経営戦略の資とする技法であるが、この技法を再構築戦略策定支援として応用した。設備区分毎の再構築戦略策定の2要因として、横軸に耐用年数超過率(稼働年数/標準耐用年数)、縦軸に総評価点(Y)をとった。

耐用年数超過率を採用した理由は再構築を判断する際の最も重要な要因をなすからである。

図. 2にポートフォリオ例を示す。図は3つの処理場、7カ所のポンプ所の診断設備対象の全設備につきプロットしたものである。

横軸、縦軸共最大値は3.0であり、両軸共3分割され、計9つのゾーンから構成される。耐用年数超過率は1.0と1.5で分割し、総評価点(Y)は1.5と2.5で分割した。

分割された各ゾーン、A~Hの意味づけは以下の通りである。

- A : 直ちに再構築すべき設備群
- B, C : ここ数年内に再構築を検討すべき設備群
- D : 直ちに改良を検討すべき設備群
- E, F : 改良を検討すべき設備群
- G : 補修を検討すべき設備群
- H : 当面の間検討対象外の設備群

ゾーンの区分けをどのレベルに設定するかはデータの蓄積が必要であるが、現状はデルファイ法により、上記に設定した。

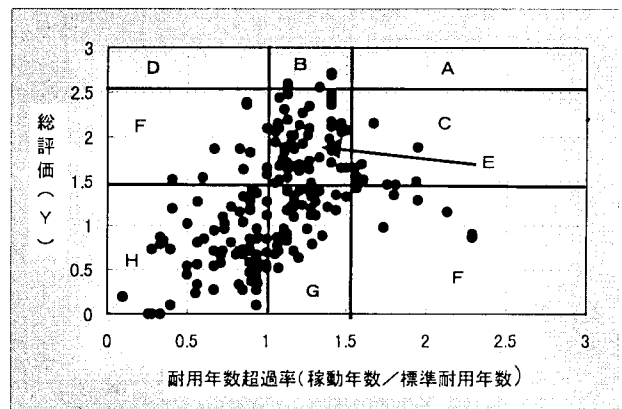


図 2 設備老朽度ポートフォリオ
(設備毎ポートフォリオ)

また、E、FゾーンにあってもB、Dゾーンに近い設備の判定が重要である。これについては、次項に示す余寿命が、1年以内の値を示す設備を要注意設備として警告する。

機場間の評価は、横軸に社会的要因 (X4)、縦軸に該当機場の設備平均総評価 (X3) をプロットした図で、機場としての老朽度比較を行う。

6. 余寿命推定についての考察

設備の余寿命を推定する一技法につき紹介する。

寿命推定は、油入変圧器の絶縁油劣化度合いを計測して診断する様な、一部の単独機器についての技術は開発されているが、システム品に関する文献は見いだせなかった。

種々検討結果、最も高度なシステムを構成する人間の平均寿命に注目した。平均寿命は「生命表」²⁾が毎年公表され、その結果に基づいて発表される。図. 3に平成7年度の生命表と近似させた正規累積関数を示す。平成7年度の男性の平均寿命は79, 48歳であり、最長寿は105歳とバラツキがあるが、平均寿命とは50%の人が死亡する年齢で定義される。

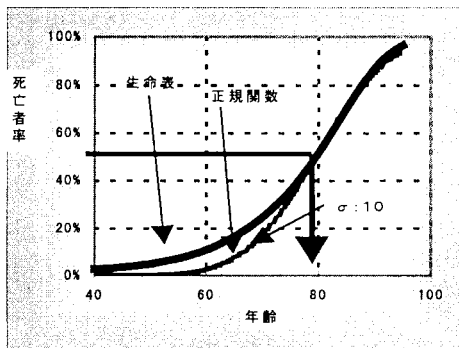


図 3 日本人男性の生命表(平成7年)

個々が寿命を持つ集団は、個によって寿命のバラツキがあり、平均寿命と分散を持ったある母集団から構成される。設備の寿命を更新された時期とすると、同一設備でも、構成や環境などにより、寿命時期は分散する。更新実績の平均値を平均寿命、寿命と判断した時期の分散を持つ統計的な集団が存在すると考える。

そこで、各設備を納入した製造社にアンケート調査し、設備毎の平均更新時期と分散を調査した。

母集団の形は、多少の誤差には目をつぶり、使いやすい正規分布を想定して、設備毎の平均更新時期と標準偏差を算出し、参考データとした。

生命表の考え方を参考にして、設備の更新実績の平均経過年数を平均寿命 (平均 μ) とし、更新時期の分散度合を標準偏差 (σ) とする正規累積関数を寿命カーブと定義した。

受変電設備の寿命カーブ例を図. 4に示す。縦軸は評価点に換算され、評価点 1.5が平均寿命である。

一方、余寿命は、あと何年で寿命を迎えるかを予測するものであるから、限界寿命を設定する必要がある。即ち、設備寿命の分散度合いをどの様に扱うかと言う問題である。分散度合いにより異なるが、約90%の設備が寿命となる時期の ($\mu + 1\sigma$) の値をとることにした。限界寿命から、正規累積関数より逆引きして求められる平均寿命を差し引いた値を余寿命として算出し、下式に示す。

余寿命 = 限界寿命 - 正規累積関数 f (確率、平均寿命、標準偏差)

限界寿命: $\mu + 1\sigma$

確率: 評価点 / 3

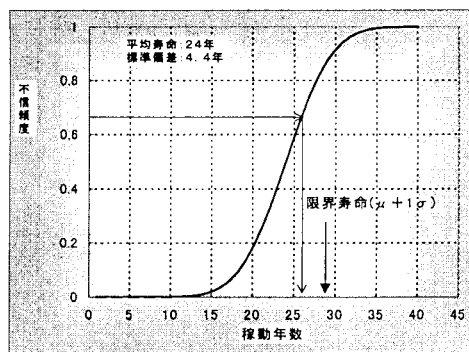


図 4 受変電設備の寿命カーブ

平均寿命: 設備の更新実績から求めた平均稼働年数

標準偏差: 設備の更新実績の偏差値 σ

現在は、総評価点 (Y) / 3 を確率としているため、評価点 1.5 が信頼度 0.5、即ち、平均寿命に対比させているが、評価点の定義から、2.0 や 2.5 の方が良いとの意見がある。ポートフォリオ上、E、Fゾーンにあっても、評価点 (Y) が 2.5 に近く、 σ 値が小さい設備は、余寿命が 1 年をきる設備がある。図. 2 のケースでは、9 件の設備が上記に該当した。この様な設備については、ゾーン区分にかかわらず、再構築対象設備グループに編入する。

機器の信頼度モデルはワイブル関数で表されることが一般に知られているが、設備の関数係数などが不明なことから、実用的な正規関数を採用した。

7. 経済性評価

(1) 維持管理費と予測

経済性評価は文献¹⁾のライフサイクルコスト法(以下、LCCと記す)に依った。LCCは、維持管理費の実績とその将来予測値と減価償却により償却される設備の現在価額の和(ライフサイクルコスト)が最低点である時期を該当設備の経済的限界とする手法である。

図. 5に比較的安定した、維持管理費の実績を持つ、あるポンプ所の維持管理費の実績および予測値を示したものである。維持管理費は補修費と改良費の合計値を対象とした。

予測式は下記とした(文献¹⁾)。

$$\text{維持管理費 } C = a e^{bt}$$

a, bは定数、tは経過年数である。

図. 5の例では下式となった。

$$C = 1.42 e^{0.298t}$$

維持管理費把握上の問題は、複数設備が複合されて計上されている場合が多く、設備区分毎の実績把握が困難なケースが多い事や、補修・改良工事が希にしか行われない受変電設備やポンプ設備などでは、連続性が無く、予測出来ない事などである。図の例はポンプ所全体に対して予測した例である。

また、金銭の経年的価値の変化を表す、デフレータ係数を採用しなかったが、今後のテーマである。

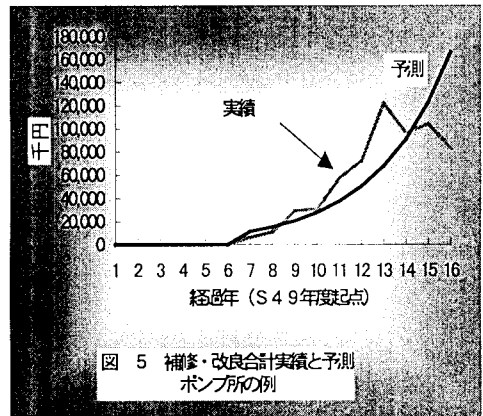


図 5 補修・改良合計実績と予測
ポンプ所の例

(2) LCC計算

ポンプ所全設備を対象にしたLCC計算例を図. 6に示す。

維持管理費の予測は、図. 5の例である。LCCを計算する上で問題となるのは、長年にわたり増設・改良が行われ、財産の嵩上げが行われる一方、減価償却されていくが、長期間に亘る年度毎の資産価額の把握が困難な点や、設備毎の把握は更に困難な点である。

図の例では、現時点の資産価額から、初期投資額を類推する方法をとり、増設・改良の影響を除いたものである。

設備毎のLCC計算は、上述の理由から困難が伴うため、機場全体を対象とし、設備毎の現在価額比で行うのが実践的と思われる。

LCC計算は、維持管理費を適切に把握できるデータの整備や、長年にわたる年度毎の資産価額を把握できるデータの整備など、建設、改良、補修工事費のデータベース化が必要と思われる。

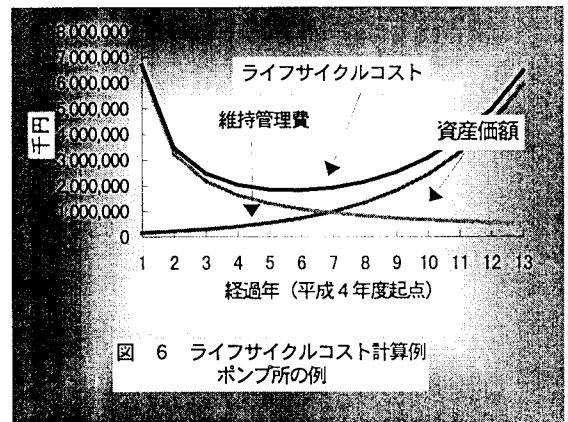


図 6 ライフサイクルコスト計算例
ポンプ所の例

8. おわりに

下水道設備の効率的な再構築戦略を支援するための技法として、設備診断とその結果に基づく

ポートフォリオの活用、余寿命推定およびライフサイクルコストに基づく経済性評価など、一連の技法につき、その概略を述べた。機械設備や電気設備に関する詳細は、本稿に続く2編の論文を参照頂きたい。

実務的に活用できるこれらの技法は論理的に未熟な点もっており、設備診断・再構築戦略支援技術につき、諸賢のご指摘、ご指導が頂ければ幸いである。

最後に、本技法は東京都下水道局殿の多大のご指導、ご協力により開発されたものであり謝意を表したい。

参考文献

- 1) 下水道施設改築・修繕マニュアル(案) 平成3年12月(社)日本下水道協会編
- 2) インターネットホームページ www.mhw.go.jp/toukei/njh/htm/njh1-2.html
- 3) 電気学会技術調査報告「電気設備診断・更新技術に関する調査報告」 376号
- 4) 電気学会技術調査報告「工場電気設備の寿命予知・技術に関する調査報告」 第230号
- 5) 機械学会雑誌「機器・構造物の寿命診断と長寿命化技術」'91 1月号 ほか