Ⅳ－116　　しゅんせつ船の設備更新に関する研究

京都大学工学部　正員　吉川和広
京都大学大学院　学生員○春名　攻
京都大学大学院　学生員　伊勢村邦朗

1)はじめに

設備更新の問題は従来MAPI, NEW・PAPI などの方法や，ダイナミック・プログラミングによる設備更新モデル等で取扱われているが，土木工事用機械設備に適用する場合には不適当な場合が多い。すなわち，土木工事では機械の損耗の程度が非常に激しく，設備を使用する対象物の諸性質，使用期間がかなりの程度に変化するなど，他の装置産業の場合と異なる点が多くある。従って，土木工事用設備の更新方法については，その特殊性を考慮した合理的な基準についての研究を行なう必要がある。本研究においては，近年急増したしゅんせつ工事において最もよく使用される非航式ポンプしゅんせつ船における設備更新の問題を従来とは異なった立場より考察したい。

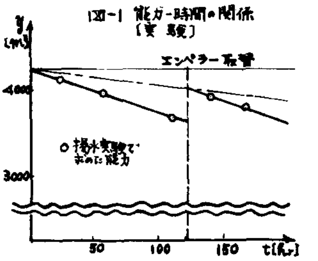
2)設備更新に関係する要素の分析

ポンプしゅんせつ船において，故障・寿命による修理・取替の分析を実績に基づいて行なうと，ポンプ，カッター，パイプ系統に関係するものが全体の休止時間の70%，休止回数の60%を占めている。これらは，主として揚土される土砂の通過による摩耗が原因であり，いわゆる摩耗故障によるものと考えられる。さらに，揚土能力はしゅんせつ時間とともにかなりの速さで低減し，経済的に耐えられない状態を生じる。この能力の低下もやはり各部品の摩耗による能力の低下に起因するものである。従って，ポンプしゅんせつ船の設備更新の問題は摩耗部品を対象にすることによって合理的に解決することが出来ると考えられる。与えられた工期・土量を満足し，総工事費を最少にすることを設備更新の評価基準とすると，設備更新の考え方として，(1)摩耗部品を技術的に改良しその部品を使用することにより，寿命を伸ばし，故障を少なくするという方法で費用を減少させる。(2)現有する設備のままで，能力の低下に着目し，摩耗部品の合理的な取替を行なうことにより，工事費を減少させる，という2つの立場が考えられる。一般に前者の場合は，部品を改良された部品におきかえるための費用と，工事費の減額によって評価できるが，しゅんせつ船においては，そのような解析のための資料は殆んど得られていない。このため本研究では後者の立場をとることにした。つぎに，部品の摩耗による能力の低下，修理・取替による能力の回復等を調べるために，エンペラー，カッター，パイプを取替の対象として，現場で実験を行なった。能力の計測において揚土量を直接計測することは不可能なので，揚水実験を行なって揚水能力 y_w をもとめ，これに平均含泥率 γ を用いて揚土能力 y をもとめた。すなわち y は次式で計算される。

$$y = y_w \times \gamma \qquad (m^3/hr) \cdots\cdots(1)$$

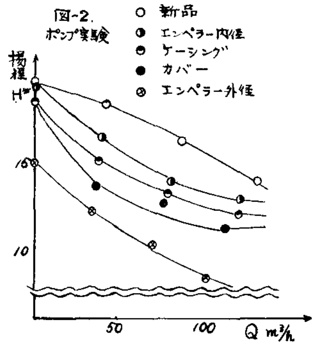
実験の結果，つぎのようなことが求められた。すなわち，図-1に示されるように，(i)能力－時間曲線は，ほぼ直線で示される。その勾配は一定である。(ii)取替による能力の回復は，エンペラーだけにあらわれる。(iii)エンペラー取替後の能力 $y(t)$ は，初期能力 y_0 まで回復せず，他の摩耗部品による能力低下 $y_0 - y(t)$ が残る。(iv) $y_0 - y(t)$ は，およそ時間に比例する。

図-1 能力-時間の関係 [実験]



さらに管径100mmの小型サンドポンプによる模型実験を行ない，摩耗による能力の低下要因を調べた。すなわち，エンペラー内径，ケーシング，カバー，エンペラー外径を，実際の摩耗形状に基づいて，順次削り取り，各段階において，揚水能力を計測し図−2を得た。この結果，時間に対しての定量的な能力低下の程度をもとめることはできなかったが，上記(iii)にあげた他部品の摩耗に起因する能力の低下の存在を確認することができた。

図-2. ポンプ実験

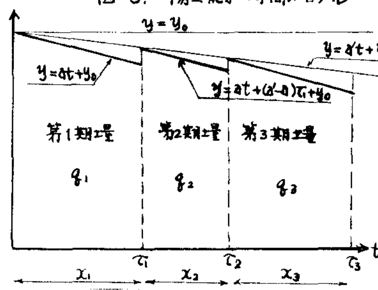


3) 設備更新モデル

2)で述べたように摩耗部品の中でもエンペラーの取替が，主として能力に関係するので以下においては，上述の特性に基づいて，エンペラーの取替を対象とするモデルを作成した。このモデルにおいては，能力に関係しない他部品の取替・修理は，寿命あるいは故障を生じた時点で各個に行なうものとするが，これは費用の点で最も有利であると考えられる。すなわち，寿命に達しない場合に取替を行なうという方法をとると，一定期間内ではかえって取替回数を増加させ，従って費用・時間を増加させるのである。いま図−3に示すように，

$$y(t) = a(t) + y_0 \quad \cdots\cdots (2)$$

図-3. 揚土能力−時間のモデル



で $t=0$ から取替時点までの能力時間関係をあらわし，さらに，エンペラー以外の部品に起因する能力低下量を $-a't\ (a'<0)$ であらわせば，(iv)より $y_0 - y(t) = -a'(t)$ となり取替直後の能力の上限が

$$y(t) = a'(t) + y_0 \quad \cdots\cdots (3)$$

であらわされる。つぎにエンペラーの取替基準として，つぎのような「強制取替時間 x^*」を定める。すなわち「取替時点よりの経過時間を x とすれば，$x < x^*$ のとき寿命に達したとき，x の時点で取替を行ない，$x = x^*$ になっても寿命に達しないときは，$x = x^*$ において取替を行なう」いま，自然状態での寿命時間 x の確率分布が $\varphi(x)$ であたえられるとき，取替時間の確率分布 $f(x)$ は，　$x < x^*$ のとき $f(x) = \varphi(x)$，　$x = x^*$ のとき $f(x) = \int_{x^*}^{\infty} \varphi(x)dx$ ……(4)

であたえられる。いまこのように定めたとき，n 回目の取替を行なう直前までの，土量 Q_n，工期 T_n，工事費 F_n は次式で与えられる。$f(x)$ に従う，i 回目の寿命時間 x を x_i とおくと，

$$\left.\begin{aligned}
Q_n &= \sum_{i=1}^{n} q_i = \sum_{i=1}^{n} \left\{ \frac{1}{2} a x_i^2 + (a'\tau_{i-1} + y_0) x_i \right\} \\
F_n &= \left\{ \lambda c_f - C^* + \frac{1}{1-\alpha}(C^* + C^{**})(1 + \lambda t_f) \right\} \tau_n + (n-1) C_r + \frac{1}{1-\alpha}(C^* + C^{**})(n-1) t_r \\
T_n &= \frac{1}{1-\alpha} \left\{ (1 + \lambda t_f) \tau_n + (n-1) t_r \right\} \qquad \text{ただし } \tau_n = \sum_{i=1}^{n} x_i
\end{aligned}\right\} (5)$$

ここで，t_r；エンペラー取替の所要時間［時間］　C_f；他部品1回あたり平均修理費用［円］
C_r；エンペラー取替費用［円］　α；工事不能率［時間/時間］
λ；他部品全体での平均故障率［回数/時間］　C^*；1時間あたりの休転損失費用［円/時間］
t_f；他部品の1回あたり平均修理時間［時間］　C^{**}；1時間あたりの固定費用［円/時間］

いま，これらの期待値によって評価を行なうとすれば，$E[Q_n]$，$E[T_n]$，$E[F_n]$ は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}
E[Q_n] &= \sum_{i=1}^{n} E[q_i] = \frac{1}{2} a' x_m^2 \cdot n^2 + \left\{ \frac{1}{2}(a - a') x_m + \frac{1}{2} a \sigma_x^2 + y_0 \cdot x_m \right\} n \\
E[T_n] &= \frac{1}{1-\alpha} \left\{ (1 + \lambda t_f) x_m + t_r \right\} n - \frac{1}{1-\alpha} t_r
\end{aligned}\right\} (6)$$

$$E[F_n]=\left[\left\{\frac{1}{1-\alpha}(1+\lambda t_f)(C^*+C^{**})+\lambda C_f-C^*\right\}x_m+\frac{1}{1-\alpha}(C^*+C^{**})t_r+C_r\right]n-C_r-\frac{C^*+C^{**}}{1-\alpha}t_r$$

ただし，$x_m=E[x]$，$\sigma_x^2=E[(x-x_m)^2]$ である。上式は，x_m, σ_x を固定して考えるとき，n の1次あるいは2次の関数をあらわし，特に $E[T_n]$, $E[F_n]$ は n に関して1次の増加関数である。いま，与えられた土量，工期を Q^*, T^* とおくと，実際の工事は Q^* が得られた時点で完了する。従って，$E[Q_n]\geqq Q^*$ を満足する n のうち最小の $n=N$ とすれば，真の揚土量，工期，工事費は次式で与えられる。

$$\left.\begin{array}{l} E'[Q_N]=Q^*,\quad E'[T_N]=E[T_{N-1}]+\frac{1}{1-\alpha}\{t_r+(1+\lambda t_f)x_0 \\ E'[F_N]=E[F_{N-1}]+\frac{1}{1-\alpha}(C^*+C^{**})t_r+C_r+\left\{\frac{1}{1-\alpha}(C^*+C^{**})(1+\lambda t_f)+\lambda C_f-C^*\right\}x_0 \end{array}\right\}\quad (7)$$

ここで，x_0 はつぎのようにしてもとめられる。Q_{N-1} を揚土したとき残りの土量は (Q^*-Q_{N-1}) となり，その期待値は $(Q^*-E[Q_{N-1}])$ となる。また $N-1$ 回目取替後から x 時間経過時点での揚土量 $g(x)$ は

$g(x)=\frac{1}{2}ax^2+(a'\tau_{n-1}+g_0)x$ ...... (8)　　であたえられるが，(8)式では x は寿命を考えないから確率変数とは考えない。従って x_0 は次式の根のうち小さい方の根によって与えられる。

$E[g(t)]-(Q^*-E[Q_{N-1}])=0$，すなわち $\frac{1}{2}ax^2+\{a'(N-1)x_m+g_0\}x-(Q^*-E[Q_{N-1}])=0$ (9)

このようにしたとき，数学モデルは次式であらわされる。

(a) x^* を固定し，　$E_{x^*}[Q_n]\geqq Q^*$，$E'_{x^*}[T_n]\leqq T^*$　　(10)　　の条件のもとで，

$\min\limits_{n} E'_{x^*}[F_n]=Z_{x^*}$　　(11)　　をもとめる。

(b) x^* を変化させ，　$Z=\min\limits_{x^*} Z_{x^*}$　　(12)　　をもとめる。

4)適用計算例

各定数を資料より求めたところ，$\varphi(x)$ は正規分布 $N[438, 16900]$ として与えられた。本例では，x^* を $\int_{-\infty}^{x^*}\varphi(x)dx=0.90, 0.80, \cdots\cdots, 0.20, 0.10$ に対応して与え，あらかじめ x_m, σ_x を各 x^* に対して計算したところ，容易に計算できて図-4のように求められた。

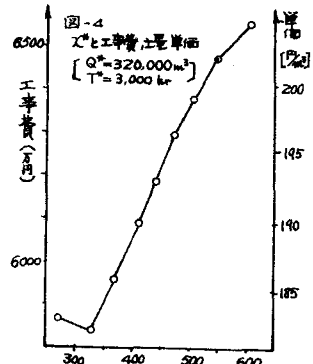


図-4 x^* と工事費，土量単価

5)危険率を与えた場合の数学モデル

(3)においては，工期，土量を期待値によって評価したが，計画の安定性—すなわち，どれくらい危険率を有するかを評価の基準に導入することも必要であると考えられる。ここで，土量，工期に対して危険率 ε_Q, ε_T を与えることとする。さて，第 n 期末の全揚土量，工期はある確率密度関数に従うが，これを $r_n(Q_n)$, $s(T_n)$ とおくと，これらは次のようにして計算することができる。いま，$f(x_i)$，$\tau_i(\tau_i)$，$g_i(g_i)$ によって，それぞれ，x_i, τ_i, g_i，の確率密度関数をあらわすと，$\tau_i(\tau_i)$ はコンボリューションを用いることによって次式で与えられる。

$\tau_1(\tau_1)=f(x)$，　$\tau_i(\tau_i)=\int\tau_{i-1}(\tau_i-x)f(x)dx$　$(i=2, 3, \cdots, n)$　　(13)

ただし，$\tau_i=\sum\limits_{k=1}^{i}x_k$ である。つぎに，$g_i(g_i)$ は，$X=x_i$ なる変数を導入し X と g_i の同時確率分布を $P(X, g_i)$ とすると，　$g_i(g_i)=\int P(X, g_i)dX$ ...... (14)

とあらわされる。ここで変換を行なうと，X, g_i は x_i, τ_{i-1} の関数であるから

$P(X, g_i)=P^*(x_i, \tau_{i-1})\left|\frac{\partial(x_i, \tau_{i-1})}{\partial(g_i, X)}\right|$ .... (15)

となるが，x_i, τ_{i-1} が独立であり，$X=x_i$　$dX=dx_i=dx$，$\left|\frac{\partial(x_i, \tau_{i-1})}{\partial(g_i, X)}\right|=\left|\frac{1}{a'x}\right|$ であるから上式は，

$g_i(g_i)=\int f(x)\tau_{i-1}(\tau_{i-1})\left|\frac{1}{a'x}\right|dx$，ただし $\tau_0(\tau_0)=1$，$(i=1, 2, \cdots, n)$ ...... (16)

また，$r_i(Q_i)$は，$Q_i=\sum_{k=1}^{i} g_k$であり，g_iは独立であることから，コンボリューションを用いて，

$$r_i(Q_i)=\int r_{i-1}(Q_i-g_i)\,g_i(g_i)\,dg_i \qquad r_1(Q_1)=g_1(g_1) \quad (i=2,3,\cdots,n) \cdots\cdots (17)$$

で与えられる。つぎにT_iの確率密度関数$s_i(T_i)$は，T_iがτ_iの関数であるから変換を行なうことにより，

$$s_i(T_i)=\tau_i(\tau_i)\left|\frac{d\tau_i}{dT_i}\right| = \tau_i\left(\frac{(1-\alpha)T_i-(n-1)t_r}{1+\lambda t_f}\right)\left|\frac{1-\alpha}{1+\lambda t_f}\right| \cdots\cdots (18)$$

とあらわされる。このようにして，$r_i(Q_i)$，$s_i(T_i)$がもとめられるがこれらの累加確率分布関数を，$R_i(Q_i)$，$S(T_i)$とおくと，制限条件を満足させるには，次式を満足していなければならない。

$$R_n(Q^*)\leq \varepsilon_Q, \quad S_n(T^*)\leq 1-\varepsilon_T \cdots\cdots (19)$$

一方，工事費の評価を期待値で行なうとすれば，前述の式(5),(6)でも示したように$E[F_n]$は時間に関して増加関数であるから，$\min_n E[F_n]$をあたえる$n\equiv n^*$は次式を満足する。

$$n^*=\min\{n;\ R_n(Q_n)\leq\varepsilon_Q,\ S_n(T_n)\leq 1-\varepsilon_T\} \cdots\cdots (20)$$

ここで，評価を行なう土量，工期が離散変数nに対して，$Q_1,Q_2\cdots Q_n$，$T_1,T_2\cdots T_n$のように与えられるが，一般に(15)式で等号が成立することは少ない。しかし与えられたε_Q，ε_Tに対する条件のもとで，工事費の最小値をもとめるためには，(19)式の土量の制限式が等号を有するような工期，土量をもとめればよい。いま等号が成立しないときn_1，n_2が

$$n_1=n\{R_n(Q^*)<\varepsilon_Q,\ S_{n-1}(T^*)<1-\varepsilon_T<S_n(T^*)\},\quad n_2=\min_n\{n;\ R_n(Q^*)<\varepsilon_Q,\ S_n(T^*)<1-\varepsilon_T\} \quad (21)$$

で与えられるとする。xを(n_k-1) $(k=1,2)$回目の取替時点からの経過時間とすれば，(3)と同様にして

$$S^*_{n_k-1}(T^*)=1-\varepsilon_T, \qquad R^*_{n_k-1}(Q^*)=\varepsilon_Q \cdots\cdots (22)$$

あるいは

$$S^*_{n_k-1}(T^*)<1-\varepsilon_T, \qquad R^*_{n_k-1}(Q^*)=\varepsilon_Q \cdots\cdots (23)$$

を満足するようなxを求めれば，与えられた危険率以下の危険性で，かつ工事費最小となるような，n_1あるいはn_2を評価することができる。ここでxは(3)と同様に確率変数と考えない。よって$g(x)$の確率密度関数は，次式であたえられる。ここで(8)式で与えられるように$g(x)$はτ_{n_k-1}の函数だから，

$$P_x(g(x))=\tau_{n_k-1}(\tau_{n_k-1})\left|\frac{d\tau_{n_k-1}}{dg(x)}\right| \qquad k=1\text{ or }2 \cdots\cdots (24)$$

となる。また$R^*_{n_k-1}(Q^0)$は$r^*_{n_k-1}(Q^0)$の累加確率分布関数であり，$r^*_{n_k-1}(Q^0)$は次式で与えられる。

$$r^*_{n_k-1}(Q^0)=\int r_{n_k-1}(Q^0-g(x))\,P_x(g(x))\,dg(x) \cdots\cdots (25)$$

さらに，$S^*_{n_k-1}(T^0)$は$s^*_{n_k-1}(T^0)$の累加確率分布関数であり，$s^*_{n_k-1}(T^0)$は，$s^*_{n_k-1}(T^0)=s_{n_k-1}(T_0=T_{n_k}-x)$ -(26)
であたえられる。このとき費用の期待値は，3)と同様にして，

$$E'[F_{n_k}]=E[F_{n_k-1}]+\frac{1}{1-\alpha}(C^*+C^{**})t_r+C_r+\left\{\frac{1}{1-\alpha}(C^*+C^{**})(1-\lambda t_f)+\lambda C_f-C^*\right\}x \quad (27)$$

であらわされるが，xを増加させることによって，式(22)あるいは式(23)を満足するxを求めれば，制限条件を満足し，かつ$Z_{x^*}=\min_{n_k}E'[F_{n_k}]$が求まる。さらに，$x^*$を前述のごとく変化させて，$\min_{x^*} Z_{x^*}$をもとめれば，これが最小の工事費を与え，この時の$x^*$が最適取替基準をあらわしている。

6) 以上で設備更新問題において，能力低下に注目した解決方法を論じたが，3)に述べた期待値の計算はあらかじめ，各x^*に対して，x_m，σ_xを計算しておけば，簡単な計算によって最適取替基準を決定することができる。5)で述べた方法は，従来の期待値の概念に対して，危険率を導入することによって計画の信頼性を大きくしようと試みたものである。しかし一般に各計算は電子計算機を用いなければならないと考えられる。最後に本計算例では，能力低下曲線Q，Q'を実測で得たが，これらは土性によって異なる。もし，これらが力学的解明により理論的に求められるなら，より実用的なものとなろう。