

# 不完全情報に基づく逐次点検方策について

\* 石坂 宜宏 ISHIZAKA Nobuhiro

† 佐藤 毅 SATOW Takashi

‡ 河合 一 KAWAI Hajime

## 1. はじめに

システム管理者は、効率的なシステム運用を実施するにあたり、不測のシステム停止を避けたい。それは、顧客へのサービス停止や事後保全費用などシステム停止に伴う損失が必要となるためである。また、顧客に対し不具合による危害を与える可能性がある場合、早期に発見されなければ社会的な信用を失い、管理者責任を強く追求される。管理者は、リスクを回避する手段としてシステムの状態を把握すべく点検を実施する。点検は、主に定期点検(文献[1])、非定期点検(文献[2])の2種類に分類される。定期点検は、あらかじめ定めた一定時間毎に点検を実施する。その実用性・汎用性は高く、自動車検査など幅広く活用されている。定期点検において、点検時間間隔を短期に設定すれば、システム状態を正確に把握する機会が増し、不測の事態を避ける可能性が増す。しかし、頻繁な点検は多額な点検費用を招き、経済的、資源的負担を強いる可能性が増す。点検時間間隔を長期に設定すれば、頻繁な点検を避けることは可能となる。反面、システム故障発見の機会が減ることから、故障発見を見逃すリスクを負うこととなる。定期点検に対し、非定期点検は点検時の劣化状態に依存し次回の点検時点を決定することから頻繁な点検を避け、保全費用及び余寿命を有効に利用できる。その実用性は発展途上の段階と考えられるが、船用、航空機関、人命に関わる分野での実用化が期待されている(文献[3])。これは、技術革新に伴う観測装置の性能向上が実用化への拍車をかけていると考えられる。ChristerとWang(文献[4])は、点検時に劣化状態を完全に把握できるとの仮定のもと、次期点検時点を決定する方策を提案している。通常、保全問題における評価規範としては、再生報酬定理(S.M.Ross, 文献[5])を用い導出する無限計画期間における単位時間あたりの期待保全費用を採用する。しかし、Christer等のモデルは、観測情報に基づき未来のシステム劣化過程を記述するため、期待サイクル長、つまりシステムの期待再生時間の導出が容易ではない。

\*〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101番地 鳥取大学大学院 工学研究科 社会開発システム工学専攻

†〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101番地 鳥取大学 工学部 社会開発システム工学科

Tel: 0857-31-5335 Email: zwsatow@sse.tottori-u.ac.jp

‡〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101番地 鳥取大学 工学部 社会開発システム工学科

Tel: 0857-31-5306 Email: kawai@sse.tottori-u.ac.jp

そこで、現点検時点から次期点検時点までの時間区間上における単位時間あたりの期待保全費用を評価規範として採用し、期待保全費用の導出を行なった。Grall等(文献[6][7])もまた、点検時におけるシステム状態に依存し次期保全時点を決定する状態依存型保全方策について考察を行なっている。Christerと同様に、再生報酬定理による単位時間あたりの期待保全費用導出の困難さを回避するため、セミ再生過程を用いた導出法を提案している。

上述のChristerやGrall等の論文に代表されるように、システムの状態は点検時に完全把握できると仮定する場合が多い。タイヤ摩耗に代表される物理的劣化量において、比較的容易に観測することが可能な場合、点検時にシステム状態を完全に把握できるという彼等の仮定は容認される。しかし、観測環境が劣悪な場合及び状態自体を客観的に数量化することが難しい場合においては、点検時点において観測対象の状態を完全に把握できない可能性がある。地中に埋設された水道ネットワークや疾患の状態などが考えられる。このような点検時にシステム状態の把握が困難な対象に対する状態依存型保全問題は、十分な研究が行われていない。

大西と河合(文献[8])は、点検を実施するにあたり、観測装置の出力結果が正確ではない仮定のもと、無限計画期間における単位時間あたりの期待総費用を最小とする点検・取替方策を提案している。大西等は、点検時のシステム状態と観測装置による出力結果に確率相関をもつと仮定している。これは、点検時のシステム状態が把握困難な場合を考慮しているため、観測装置の出力結果に対し不確実性をもたすためである。また大西等は、点検時に得られる情報はシステム運用中に変化しないと仮定した。しかし、観測結果が不完全な場合、得られたシステム情報の確からしさが時間経過と共に増す場合がある。上述の地中に埋設された水道ネットワークにおける点検は、地上からの観測によりパイプの侵食や亀裂などを診断するが、瞬時に侵食や亀裂の具合を正確に把握するのは困難である。しかし、次の点検結果より先の点検結果の情報の質が高くなる場合がある。点検時に正確なシステム情報が得られない場合において、効率的なシステム運用の達成には、過去に得られたシステム情報を用い今後のシステム劣化過程を予測し、今後の保全計画に反映すべきである。

本稿は、点検時におけるシステム情報が不完全な場合、最新の正確なシステム情報をもとに今後の劣化過程を予測し、次期点検時点を決定する状態依存型非定期点検方策について考察を行う。第2章は、システム劣化過程、システム情報の遷移、保全方策などモデルの概要について述べる。第3章は、現点検時点から次点検時点までの区間における単位時間あたりの期待保全費用を導出する。第4章では、第3章において求めた期待保全費用を最小化する最適点検方策について議論する。最後に、まとめと今後の課題について述べる。

## 2. モデルの設定

### システム情報の遷移及び観測装置について

- (A1) 観測装置は、ある確率  $\Phi_x(y)$  に従いシステム状態を出力する。ここで、 $x$  はシステム劣化量、 $y$  は観測装置の出力を表す。  
 (A2) 観測装置が出力する観測結果を  $\xi(t_{k+1})$  とする。  
 (A3) 観測結果が正確であるかどうかは、その点検時において判断できない。  
 (A4) 前回の点検時におけるシステム状態は、今回の点検時において把握可能である。  
 (A5)  $k$  回目の点検時点  $t_k$  において、最も新しい正確な劣化量を  $\Psi(t_{k-1})$  とする。

### システム劣化過程について

- (B1) 時刻  $t(\geq 0)$  におけるシステム劣化を表す確率過程を  $X_t(\geq 0)$  とする。  
 (B2) 劣化過程  $X_t$  は、非減少な確率過程であり  $X_0 = 0$  とする。

完全情報  $\Psi(t_{k-1})$  のもと、時刻  $t(> t_k)$  におけるシステム劣化量が  $y$  以下である確率は次式として与える。

$$P\{\hat{X}_t \leq y | \Psi(t_{k-1})\} = F_{(\Psi(t_{k-1}), t)}(y). \quad (1)$$

ここで、 $\hat{X}_t$  は、過去の完全情報  $\Psi(t_{k-1})$  から推定されるシステム劣化量を表す劣化過程である。

時間間隔  $(t_{k-1}, t)$  間における劣化増分  $\Delta\Psi(t_{k-1}, t)$  は、次式で与える。

$$\Delta\Psi(t_{k-1}, t) = \tilde{X}_t - \Psi(t_{k-1}). \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{X}_t$  はシステム運用開始時に予測される時刻  $t(> t_{k-1})$  におけるシステムの劣化量を表す。Christer(文献[4])は、 $\tilde{X}_t = \lambda t^\rho$  とし、 $\tilde{X}_t$  の劣化量を仮定している。

過去の完全情報から推定されるシステム劣化分布の構成例をあげる。 $k$  回目の点検時刻  $t_k$  以降、システム劣化増分は、尺度パラメータ  $\alpha$ 、形状パラメータ  $\beta$  をもつワイブルにより仮定する。時刻  $t(> t_k)$  において、完全情報  $\Psi(t_{k-1})$  のもと予測劣化増分が  $\Delta\Psi$  である確率密度関数は次式として与えられる。

$$f_{(\Psi(t_{k-1}), t)}(\Delta\Psi) = \alpha\beta(\alpha\Delta\Psi)^{\beta-1} \exp\{-\alpha(\Delta\Psi)^\beta\}. \quad (3)$$

ここで、尺度パラメータ  $\alpha$  は、初期パラメータ  $\alpha_0$  と予測される劣化増分  $\Delta\Psi$  の逆数により仮定し、次式として表す。

$$\alpha(t_{k-1}, t) = \alpha_0 \{[\Delta\Psi(t_{k-1}, t)]\}^{-1}. \quad (4)$$

以上より、 $t_k$ 以降にシステム劣化量が $y$ 以下となる確率は次式として与えられる。

$$F_{(\Psi(t_{k-1}), t)}(y) = 1 - \exp\{-[\Delta y \alpha(t_{k-1}, t)]^\beta\}. \quad (5)$$

ここで、 $\Delta y = y - \Psi(t_{k-1})$ とする。

### 取替方策について

- (C1) 故障レベル $L$ はシステムが要求される品質性能を満足することができなくなるレベルを表す。もし観測結果が $\xi(t_k) > L$ なら、故障状態とみなし、 $k$ 回目の点検時に事後取替を実施する。
- (C2) 予防保全レベル $L_P$ は、予防取替の実施を目的に設定したレベルである。もし観測結果が $L_P < \xi(t_k) \leq L$ なら、予防保全すべき状態とみなされ、 $k$ 回目の点検時に予防取替を実施する。
- (C3) もし $\xi(t_k) \leq L_P$ なら正常状態だとみなされ、運用を継続する。
- (C4) 取替は点検時にのみ行われ、点検時の観測結果にのみ依存する。
- (C5) 点検・取替による時間は無視するものとし、取替によってのみシステムは劣化量は0へと回復する。
- (C6) 次の点検時刻は点検時の観測結果及び過去から得られた情報により決定する。

## 3. 期待保全費用

現点検時点から次期点検時点までの区間における単位時間当たりの総期待保全費用を導出する。保全費用として、点検コスト $C_n$ 、取替コスト $C_r$ 、単位時間当たりの損失コスト $C_d$ を用いる。ただし、 $C_n < C_r$ を仮定する。

時刻 $t_{k+1}$ で取替え実施する確率は次式として与えられる。

$$\begin{aligned} W_1(t_{k+1}) &= P\{\xi(t_{k+1}) > L_P | \Psi(t_{k-1})\} \\ &= \int_{\Psi(t_{k-1})}^{\infty} \int_{L_P}^{\infty} \Phi_x(y) dy dF_{(\Psi(t_{k-1}), t_{k+1})}(x). \end{aligned} \quad (6)$$

次に、時刻 $t_{k+1}$ で取替えを実施しない確率は以下に与えられる。

$$\begin{aligned} W_2(t_{k+1}) &= P\{\xi(t_{k+1}) \leq L_P | \Psi(t_{k-1})\} \\ &= \int_{\Psi(t_{k-1})}^{\infty} \int_0^{L_P} \Phi_x(y) dy dF_{(\Psi(t_{k-1}), t_{k+1})}(x). \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、(6)式+(7)式=1である。

システム故障による損失期間は次式として与えられる。

$$U_1(t_{k+1}) = (t_{k+1} - t_k) \bar{F}_{(\Psi(t_{k-1}), t_k)}(L) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} (t_{k+1} - t) f_{(\Psi(t_{k-1}), t)}(L) dt. \quad (8)$$

(8) 式右辺の第一項は、点検時刻  $t_k$  では故障が発見されず、次回の点検時刻  $t_{k+1}$  まで故障状態である期待損失期間を表す。第二項は、連続した点検間隔  $(t_k, t_{k+1}]$  においてシステム故障が生じ、次回の点検時刻  $t_{k+1}$  までの期待損失期間を表す。

上記の結果から、 $(t_k, t_{k+1}]$  間における単位時間当たりの期待総保全費用は以下の式により表される。

$$V_1(t_{k+1}) = \frac{c_r W_1(t_{k+1}) + c_n W_2(t_{k+1}) + c_d U_1(t_{k+1})}{t_{k+1} - t_k}. \quad (9)$$

#### 4. 最適点検方策

(9) 式を最小にする次の点検時期  $t_{k+1}$  が満たすべき必要条件として次式が求められる。

$$\frac{c_d}{c_r - c_n} \int_{t_k}^{t_{k+1}} (t - t_k) f_{(\Psi(t_{k-1}), t)}(L) dt + (t_{k+1} - t_k) w_1(t_{k+1}) - W_1(t_{k+1}) = \frac{c_n}{c_r - c_n}. \quad (10)$$

ここで、 $w_1(t_{k+1})$  は  $W_1(t_{k+1})$  の密度関数を表す。つまり、 $w_1(t_{k+1}) = \partial W_1(t_{k+1}) / \partial(t_{k+1})$ 。また、(10) 式の左辺を  $Q(t_{k+1})$  とおくことにより、次の関係が無条件で成立する。

$$\lim_{t_{k+1} \rightarrow t_k} Q(t_{k+1}) = -W_1(t_k) < \frac{c_n}{c_r - c_n}. \quad (11)$$

上不等関係は、現点検時  $t_k$  以降に  $V(t_{k+1})$  を最小とする  $t_{k+1}$  が存在することを保証する。さらに、 $V(t_{k+1})$  を最小にする有限解  $t_{k+1}^*$  が少なくとも1つ存在する条件は以下として導かれる。

$$c_d \int_{t_k}^{\infty} (t - t_k) f_{(\Psi(t_{k-1}), t)}(L) dt > c_n. \quad (12)$$

最後に、最適点検時刻により点検が実施されたとき、単位時間当たりの期待総保全費用は次式として表される。

$$V_1(t_{k+1}^*) = (c_r - c_n) w_1(t_{k+1}^*) + c_d \int_{t_k}^{t_{k+1}^*} (t - t_k) f_{(\Psi(t_{k-1}), t)}(L) dt. \quad (13)$$

## 5. まとめ

本稿では、点検時におけるシステム情報が不完全な場合において、運用開始時に予測されるシステム劣化量と最も新しい正確な劣化量を用い今後の劣化過程を予測し次期点検時点を決める状態依存型点検方策の考察を行った。さらに、現点検時点から次点検時点までの区間における単位時間当たりの期待保全費用を導出のもと最小化を行い、最適点検時刻の決定を行った。今後の課題は、現時点における点検情報を有効に活用する手法の開発をする必要がある。

## 参考文献

- [1] J.K. Vaurio, "Availability and Cost Functions for Periodically Inspected Preventively Maintained Units," *Reliab.Eng.Sys.Saf.*, vol.63, pp.133-140, 1999.
- [2] K. Ito, T. Nakagawa, "An optimal Inspection Policy for a Storage System with Finite Number of Inspections," *J.Reliab.Eng.Assoc.Jpn.*, vol.19, pp.390-396, 1997.
- [3] 佐々木, "船用機関の状態監視及び故障診断 —主としてタービン機関について—," 平成10年度日本海事協会技術研究所研究発表会講演集, p.57.
- [4] A.H. Christer and W. Wang, "A Simple Condition Monitoring Model for a Direct Monitoring Process," *Euro.J.Oper.Res.*, vol.82, pp.258-269, 1995.
- [5] S.M. Ross, *Applied Probability Models with Optimization Applications*, Holden-Day, San Francisco, 1991.
- [6] A. Grall, L. Dieulle, C. Berenguer and M. Roussignol, "Continuous-Time Predictive-Maintenance Scheduling for a Deterioration System," *IEEE.Trans.on Rel.*, vol.51, pp.141-150, 2002.
- [7] A. Grall, L. Dieulle, C. Berenguer and M. Roussignol, "Sequential condition-based maintenance Scheduling for a deteriorating System," *Euro.J.Oper.Res.*, vol.150, pp.451-461, 2003.
- [8] M. Ohnisi and H. Kawai, "An Optimal Inspection and Replacement Policy under Incomplete State Information," *Euro.J.Oper.Res.*, vol.27, pp.117-128, 1986.