要求稼働率の確保を考慮した定期予防保全方式の適用*

船 木 謙 一^{*1}, 吉 本 一 穂^{*2}

Periodic Preventive Maintenance Policy with Required Interval Availability

Kenichi FUNAKI and Kazuho YOSHIMOTO^{*3}

^{*3} Department of Industrial and Management Systems Engineering, Waseda University,
3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

We propose a periodic preventive maintenance policy for a repairable equipment considering required interval availability. Here the required interval availability is fraction of total operating time over a certain time interval, which is required to accomplish some task by the equipment. The proposed policy gives an optimal preventive maintenance interval that minimizes total expected cost per unit time assuring the required interval availability with a predetermined confidence probability. We derive its mathematical model and apply the policy to a vapor-reflow equipment in a PCB assembly line where minimal repair is performed upon failure. The results show its usefulness compared to conventional periodic preventive maintenance policy.

Key Words: Production System, Production Planning, Preventive Maintenance, Minimal Repair, Interval Availability, Production Management

1. 緒 言

設備を良好な状態で使用するためには、適切な時点に予防保全を実施することが重要である。設備診断や状態監視に基づく保全が経済的に得策でない設備には、時間を基準として予防保全を計画する必要がある。予防保全計画の方法のうち、予め決めた一定周期ごとに予防保全を施す定期予防保全方式は、管理が容易であることから、故障しても比較的軽微な損失で済む加工組立型プロセスの生産設備に広く適用されている。定期予防保全方式では、予防保全時点に達する前に故障することもあるので、予防保全周期を長くすると故障による修理費用が生じる確率が高くなる一方、予防保全周期を短くすると予防保全が頻繁になり、予防保全費用がかさむというトレードオフがある。そのため、従来の定期予防保全方式に関する研究では、上記のトレードオフを勘案して、修理費用と予防保全費用の期待値を合計した期待総保全費用を最小化するように予防保全周期を求めているものが多い^{①②}。

しかし、生産設備のミッションは、生産計画により

課された生産量をこなすことであるので、生産設備に対する予防保全は単に期待総保全費用を小さくするだけでなく、課された生産量をこなせる稼働状態を確保するように計画すべきである。課された生産量をこなすということは、設備に対しては、そのために必要となる総稼働時間や稼働率（これらをそれぞれ要求総稼働時間、要求稼働率と呼ぶことにする）を確保することとして捉えることができる。そこで筆者らは、要求稼働率の確保を考慮した定期予防保全方式を提案し、その方式の下での最適予防保全周期の存在条件などを示した^③。しかしそこでは、故障の際の修理によって設備が新品状態に戻ることを仮定したため、必ずしも現実的なモデルとは言えなかった。

実際の故障の際には、故障した部位のみの修理や取り替えで対応し、早く稼働状態に復帰させることが多い。この場合には、修理によって設備の機能は回復されるが、設備全体としての故障のしやすさ（故障率）はほとんど回復されない。このように設備全体としての故障率の回復をせず、機能の回復だけをする修理は小修理（minimal repair）と呼ばれ^{④⑤}、多数の部位から構成される設備に対する修理モデルとして良く当てはまるため、今までに多くの研究がある^⑥。そこで本研究では、先に提案した定期予防保全方式^③において、故障の際に小修理が施される場合のモデルを示す。そ

* 原稿受付 2000 年 6 月 2 日。

^{*1} (株)日立製作所生産技術研究所(☎244-0817 横浜市戸塚区吉田町292)。

^{*2} 正員、早稲田大学理工学部(☎169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)。

E-mail: kazuho@yoshi.mgmt.waseda.ac.jp

して、実際の生産設備への適用例を示し、提案した方式の有効性を検証する。

2. 小修理の考え方

生産現場においては、設備の故障の際にオーバーホールのように設備全体を修理、整備して新品状態に戻すことはほとんどない。むしろ早く稼働状態に戻すことを優先して、故障した部位のみの修理（小修理）によって設備の機能を回復させることが多い。ここで設備の故障とは、劣化や破損などによって稼働が不可能になる状態だけでなく、所定の要求された機能を果たせなくなったり、生産物の要求品質を満たせなくなった状態を含む。例えば、後で取り上げるプリント基板組立ラインのリフロー設備の場合には、表1に示すような部位がある。リフロー設備が故障した場合にはその原因となった部位の特定が行われ、その部位に対して修理が施される。修理の際に故障した部位の周辺や関連する部位を清掃したり、整備したりすることは考えられるが、設備全体を新品状態にすることはない。

以上のような小修理は、形式的にはその前後で故障率を変えない修理としてモデル化される。小修理モデルにおける故障率の推移の例を示すと図1のようになる。小修理モデルは、多数の部位から構成される複雑な設備に対して良く当てはまるため、多くの事例に適用されている^{9) 10)}。なお、修理にかかる時間を無視すると、小修理が施される場合の故障の発生は非定常ポアソン過程で表される¹⁰⁾。

3. 要求稼働率の確保を考慮した定期予防保全方式

ここでは、故障の際に小修理が施される場合のモデルを示す。

3.1 提案した方式の概要 まず、先に提案した定期予防保全方式⁹⁾の概要を以下に説明する。なお、提案した方式では、生産ラインにおいて連続的に稼働している設備を想定しており、プレス機械などのように処理対象の到着に応じて間欠的に動作する設備は対象としていない。

連続的に稼働する生産設備に対しては、生産計画をブレイクダウンするとその設備が処理すべき品種や量として表すことができ、さらに、設備の質的、量的能力が決まっていれば、その生産計画を達成するために最低限必要となる総稼働時間（要求総稼働時間）に置き換えて表せる。また、計画期間が決まっていれば、その要求総稼働時間を計画期間の長さで割ることによって、最低限必要となる稼働率（要求稼働率）が得ら

Table 1 Components of the vapor-reflow equipment

Component	Function	Failure mode
Heater	Heating atmosphere in chamber	Insufficient heating Heat variation Over current
In-chamber roller conveyer	Carrying PCB within chamber	Roller damage and stain Roller vibration Driving-gear malfunction Oil seal degradation Guide breakage
Belt conveyer	Carrying PCB into chamber	Belt damage and stain Belt deterioration Driving-gear malfunction
Vapor thermo-regulator	Monitoring and regulating temperature in chamber	Thermal sensor error Temperature variation Circuit damage
Drainage collecting pump	Collecting drainage in chamber	Drainage leak Thermal trip Strainer clog Gear malfunction Gear breakage
Cooler	Cooling solder and drainage	Drainage leak Cooling-water leak Pipe damage and stain Cooling-water shortage Flow switch malfunction
Exhaust duct	Exhausting air in chamber	Exhaust fan damage and stain Duct damage and stain Exhaust leak
Water liberating tank	Liberating pure water from drainage	Mesh-sheet deterioration Tank corrosion and rust
Board-drop sensor	Sensing PCB dropping	Sensor malfunction Circuit damage

Fig. 1 A sample failure rate realization

Fig. 2 Classification of losses

れる。

しかし、設備の故障は確率的な現象であるので、要求稼働率を必ず確保できるとは限らない。提案する方式では、要求稼働率を確保できなかった場合には何らかの損が生じるものと考え、図2に示すように二つの損に分けて捉える。一つは、金額として表される損で、たとえば総稼働時間不足を補うための残業による労務費の増分など直接的に金額で表されるものや、生産遅れによる売り損など間接的に金額に換算できるも

のが挙げられる。このような金額として表される損はペナルティと呼ぶ。もう一つの損は金額として表せない損で、たとえば納期遅れなどにより、顧客に与えた不信感などが考えられる。

ペナルティは金額として表せるので、保全費用と合わせて最小化する。一方、金額として表せない損は直接的に評価することができないので、確率的に回避することを考える。そのために、要求稼働率を確保する確率の基準として信頼係数を導入し、信頼係数以上の確率で要求稼働率を確保できるようにする。信頼係数は、金額として表せない損を避けるために保全計画者が設定する政策変数である。

以上より、提案する定期予防保全方式において、最適予防保全周期を決める問題は次のように表される。

- 最小化 : ペナルティと保全費用の合計の単位時間あたり期待値
- 制約条件 : 要求稼働率を確保する確率が信頼係数以上

3.2 使用する言葉と記号 定式化において用いる言葉を次のように定義する (図3)。

①稼働状態、稼働時間：

設備が稼働している (課された仕事を処理している) 状態をその設備の稼働状態と呼び、稼働状態 1 回当たりの時間長さを稼働時間と呼ぶ。

②修理状態、修理時間：

設備が修理のために停止している状態を修理状態と呼び、修理状態 1 回当たりの時間長さを修理時間と呼ぶ。修理時間には、修理が始まるまでの待ち時間や修理自身にかかる正味の時間、修理が終了してからの立ち上げ調整や試運転に必要な時間などが含まれる。

③予防保全周期：

ある予防保全から次の予防保全までの期間。

④稼働率：

予防保全周期の長さに対するその予防保全周期中の総稼働時間の割合。稼働率は実績として総稼働時間がどの位の割合を占めたかを示し、稼働状況によって確率的に分布する。

⑤不足時間：

要求総稼働時間に比べて実際の総稼働時間が少ない

Fig. 3 States of an equipment

かった場合の時間差分。ペナルティは不足時間の長さに応じて生じる。

また、定式化において以下の記号を用いる。

- T : 予防保全時点 ($T > 0$)
- U_T : 予防保全時点 $t = T$ までの間の総稼働時間 (確率変数)
- U_n : n 回目の故障が発生するまでの総稼働時間 (確率変数)
- D_n : n 回目の修理状態が終了するまでの総修理時間 (確率変数)
- A_T : 予防保全時点 $t = T$ としたときの稼働率 (確率変数)
- N_T : 予防保全時点 $t = T$ までの間の故障回数 (確率変数)
- a_R : 要求稼働率
- p : 信頼係数 ($0 < p < 1$)
- T_L : 不足時間
- $F(t)$: 故障時間分布関数
- $\Lambda(t)$: 累積ハザード関数
- $G(t)$: 修理時間分布関数
- $G_n(t)$: $G(t)$ の n 重スチルチェス畳み込み積分 (ただし $t \geq 0$ に対して $G_0(t) = 1$, $G_1(t) = G(t)$)
- $\xi_T(a)$: 稼働率分布関数 ($= \text{Prob}\{A_T \leq a\}$)
- $N(T)$: 予防保全時点 $t = T$ までの間の期待故障回数 ($= E\{N_T\}$)
- C_R, C_P : 1 回当たり小修理費用, 予防保全費用
- $P(T_L)$: 不足時間が T_L であるときのペナルティ
- $P_E(T)$: 予防保全時点 $t = T$ としたときの予防保全周期中の期待ペナルティ
- $C(T)$: 予防保全時点 $t = T$ としたときの単位時間あたり期待総費用 (評価関数)
- T^* : 最適予防保全時点

3.3 定式化 まず、定式化において以下の前提を設ける。

- [前提1] 現時点 $t = 0$ において設備は新品状態であり、次の予防保全時点 $t = T$ を計画する。
- [前提2] 予防保全を施す前に設備が故障した際には小修理が施され、直ちに修理状態に入る。修理状態終了後は直ちに稼働状態に戻る。
- [前提3] 故障時間と修理時間はそれぞれ独立に分布関数 $F(t)$, $G(t)$ を持つ確率分布に従う。
- [前提4] 予防保全にかかる時間は無視できる。

[前提5] 要求稼働率は長期的な計画の下に定数として与えられている。

以上のうち、前提1, 3, 5は先の研究⁹⁾における前提と同じであり、それぞれの詳細な説明と妥当性については文献⁵⁾を参照されたい。また、前提2と4は本研究における適用例に対応した前提である。特に前提4は、予防保全作業が就業時間外に実施される場合や、設備全体を短時間で取り替えられる場合に成り立つ。

まず、要求稼働率を確保する確率が必要となるので、故障の際に小修理が施される場合の稼働率分布関数 $\xi_T(a)$ を導く。故障時間と修理時間の分布が互いに独立である場合には、予防保全時点 T までの総稼働時間 U_T は次の分布関数で表される確率分布に従う¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{U_T \leq u\} &= \sum_{n=1}^{\infty} \text{Prob}\{U_n \leq u\} [\text{Prob}\{D_{n-1} < T-u\} \\ &\quad - \text{Prob}\{D_n < T-u\}], \quad u \in [0, T] \end{aligned} \quad (1)$$

特に、故障の際に小修理が施される場合には、非常ポアソン過程の定義から

$$\text{Prob}\{U_n \leq u\} = \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\Lambda(u)^k}{k!} e^{-\Lambda(u)} \quad (2)$$

が成り立ち、

$$\text{Prob}\{D_n < T-u\} = G_n(T-u) \quad (3)$$

であるので、式(1)は

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{U_T \leq u\} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\Lambda(u)^k}{k!} \{G_{n-1}(T-u) - G_n(T-u)\} e^{-\Lambda(u)} \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。ここで、稼働率 A_T は

$$A_T = \frac{U_T}{T} \quad (5)$$

であるので、結局、稼働率分布関数 $\xi_T(a)$ は、 $a \in [0, 1]$ に対して次のように求められる。

$$\begin{aligned} \xi_T(a) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\Lambda(aT)^k}{k!} \{G_{n-1}(T-aT) \\ &\quad - G_n(T-aT)\} e^{-\Lambda(aT)} \end{aligned} \quad (6)$$

次に、要求稼働率 a_R を確保できなかった場合に生じるペナルティについて考える。まず、予防保全時点 $t = T$ としたときに実際の稼働率が a であった場合の不足時間 T_L は、実際の総稼働時間が要求総稼働時間より少ない場合にのみ生じるので、次のように表される。

$$T_L = \max\{(a_R - a)T, 0\} \quad (7)$$

よって、不足時間が T_L であるときのペナルティを $P(T_L)$ で表すと、予防保全周期当たりの期待ペナルティ $P_E(T)$ は次のように求められる。

$$\begin{aligned} P_E(T) &= \int_0^{a_R} P(T_L) d\xi_T(a) \\ &= \int_0^{a_R} P((a_R - a)T) d\xi_T(a) \end{aligned} \quad (8)$$

また、予防保全時点 $t = T$ としたときの予防保全周期当たりの期待故障回数を $N(T)$ とすると、予防保全周期当たりの期待保全費用は $C_P + C_R N(T)$ で表される。ここで、故障の際に小修理が施される場合の $N(T)$ は以下のように求められる。まず、前提3より、故障時間と修理時間は互いに独立であるので、式(2)と式(3)より

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{N_T \geq n\} &= \text{Prob}\{U_n + D_{n-1} \leq T\} \\ &= \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\Lambda(T)^k}{k!} e^{-\Lambda(T)} \right\} * G_{n-1}(T) \end{aligned} \quad (9)$$

である。ただし、記号*はスチルチェス畳み込み積分を表す。したがって、 $N(T)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} N(T) &= E\{N_T\} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n [\text{Prob}\{N_T \geq n\} - \text{Prob}\{N_T \geq n+1\}] \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\Lambda(T)^k}{k!} e^{-\Lambda(T)} \right\} * G_{n-1}(T) \end{aligned} \quad (10)$$

3・1で説明したように、提案する定期予防保全方式では、与えられた信頼係数 p 以上の確率で要求稼働率 a_R を確保するという条件の下で、単位時間当たり期待総費用 $C(T)$ を最小化するように予防保全時点を計画する。したがって、提案する定期予防保全方式は確率的制約条件のある非線形最適化問題として次のように表される。

$$\begin{cases} \text{最小化: } C(T) = \frac{P_E(T) + C_P + C_R N(T)}{T} \\ \text{条件: } 1 - \xi_T(a_R) \geq p, \\ \quad 0 < p < 1, 0 < a_R < 1, T > 0 \end{cases} \quad (11)$$

なお、小修理モデルを前提にした以上の定式化結果は、文献⁵⁾の結果と比べて $\xi_T(a)$ 及び $N(T)$ の形が異なる。

4. 適用例

ここでは、提案した定期予防保全方式をプリント基板組立ラインの生産設備に適用した例を示し、有効性を検証する。

4.1 対象設備の概要 対象とする設備は、プリント基板上に搭載する部品をはんだ付けするリフロー設備である。リフロー設備には、部品が搭載され、はんだペーストが塗られたプリント基板をマガジンラックに入れた状態（ロット）で供給する。供給されたロットは、リフロー設備の搬送コンベアによりプリント基板 1 枚ずつリフロー槽に送り込まれる。槽内では高温の蒸気を吹き付けることによって部品接着するとともに、不要なはんだを除去する処理を行う（ペーパーリフロー）。処理が終わったプリント基板は、搬送コンベアにより槽外に送り出される。

このリフロー設備は設備メーカーから購入したもので、現状では設備メーカーとの契約に基づいて 3 ヶ月ごとに定期予防保全を行っている（但し、実際の予防保全実施日は設備メーカーの都合などに応じて前後している）。予防保全の際には、オーバーホールの処置が施され、ほぼ新品状態に戻る。予防保全作業は夜間などの就業時間外に行われるので操業には影響しない。

また、故障した場合の修理も設備メーカーに依頼している。修理の際には、故障内容の確認、故障した部位の特定、修理、交換、動作試験などが行われる。リフロー設備には表 1 に示したような部位があり、修理は故障した部位のみを対象として施されるので小修理に相当する。また過去の修理記録によると、故障してから設備メーカーによる一連の修理作業が終了するまでに、いずれも 3 日かかっている。

4.2 要求稼働率 プリント基板はその品種に拘わらず、容量が 20 枚のマガジンラックに入れられた状態で、1 ロット 20 枚ずつリフロー設備に供給される。リフロー設備では 1 ロット当たり平均 7.2 分のサイクルで投入することができる。これに対し、リフロー設備 1 台あたりに要求される生産量は月平均 25000 枚で計画されている。一方、当工場の就業形態は、1 日当たり就業時間が 7.75 時間、1 ヶ月当たり就業日数が 21 日であるので、要求稼働率 ar は次のように求められる。

$$ar = \frac{\text{月生産量} \div \text{ロットサイズ} \times \text{投入サイクル}}{\text{月当たり就業時間}} \\ = \frac{25000 \div 20 \times 7.2}{21 \times 7.75 \times 60} = 0.922 \quad (12)$$

4.3 ペナルティ 要求稼働率を確保できなかった場合の不足時間分は残業によって補われる。したがって、ペナルティとしては残業費用が考えられ、その内容は作業員の残業手当である。リフロー設備の操業費や材料消費は残業をしても増えることはないの

で、ペナルティには考慮しない。ここで、残業手当の大きさは不足時間に比例するので、本例におけるペナルティは比例係数を $\rho > 0$ として次のように表せる。

$$P(T_L) = \rho T_L \quad (13)$$

比例係数 ρ は、平均賃率 2000 円/時間と残業時間の賃増し率 1.61 とから

$$\rho = 2000 \times 1.61 \times 7.75 \div 10000 = 2.5 \quad (14)$$

となる。但し、後の計算に合わせるために 1 日当りに換算し、かつ他費用項目と評価単位を合わせるために万円単位にしてある。

4.4 保全費用 考慮する保全費用は予防保全費用と故障の際の修理費用であるが、いずれも設備メーカーへの支払い額が保全費用となる。保全費用には、設備メーカーからの保全作業員の人件費（派遣費用）や保守部品費、技術料などが含まれている。

予防保全費用については、設備メーカーとの契約に基づく定額が基本になっており、1 回当たり 100 万円（実際には、年間契約で 4 回分を 400 万円）支払っている。一方、修理費用は故障の内容によってその都度金額が変わるが、正確なデータが得られなかったので、保全計画者からのヒアリングにより 1 回当たり平均 30 万円であるとする。ここで、ヒアリングに基づく金額を修理費用として用いることは、当然、計画評価における費用の絶対値としては正確性を欠くことになるが、後述の有効性の検証は現状との比較による相対評価で行うので、双方の費用計算において同じ金額データを用いれば十分有意な評価が可能である。したがって、当然、正確な修理費用を用いることが理想であることは認めつつも、ここでは先のヒアリングによる修理費用を用いて評価することにする。

4.5 故障時間分布 本例では、リフロー設備の故障時間分布として、さまざまな分布形状を表現することができ、故障時間分布として良く使われるワイブル分布を考える。また、多くの部位から構成され、部位の故障が設備の故障となるような設備では、それぞれの部位の故障時間のうち、最も早い故障時間が設備としての故障時点となる。したがって、複数の確率変数の中の最小値の分布を表す極小値分布の一つであるワイブル分布を採用することは意味的にも妥当である。このとき、故障時間分布関数と累積ハザード関数はそれぞれ次のように表される。

$$F(t) = 1 - e^{-\theta t^m}, \quad \theta > 0, m > 0 \quad (15)$$

$$\Lambda(t) = \theta t^m \quad (16)$$

この下で、過去の故障履歴を用いてパラメータを最尤推定法により推定した結果、それぞれ

$\theta = 9.786 \times 10^{-6}$, $m = 2.429$ となった. したがってリフロー設備の故障率は IFR パターンを持っており, 予防保全が必要であると言える. なお, このときの期待故障時間 (MTTF) は約 1023 日である.

4.6 修理時間分布 修理時間には, 設備メーカーによる一連の作業の時間が含まれるが, 4.1 で述べたように, 過去の修理記録によるといずれの修理も 3 日かかっていた. したがって, 修理時間分布関数は形式的には 3 日以上で確率 1 となる次のような単位関数で表すことができる.

$$G(t) = U(t - 3) \quad (17)$$

4.7 信頼係数 要求稼働率が確保できなかった場合の損のうち, 金額として表せない損は定量的でないためペナルティよりも明確に捉えることが難しい. 本例においては, リフロー設備の停止による他工程及び組立ライン全体への影響は大きいと考えられ, したがって見えない損が生じることは確実であるが, その大きさを考慮して信頼係数に反映することはさらに難しい. 但し, 先の研究⁹⁾で述べたように, 結果として得られた計画からフィードバックして判断することは可能であるので, ここでは信頼係数の値として 0.90, 0.95, 0.99 の 3 通りを用意し, 結果がどのように異なるかを検証することにする.

4.8 最適予防保全周期の決定 以上の各数値をまとめると表 2 のようになる. これらの数値を用いて, 提案する方式における最適予防保全周期を求める.

(1) 稼働率分布関数

式(6)と式(16)より, 本例における稼働率分布関数は次のようになる.

$$\xi_T(a) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\theta^k (aT)^{mk}}{k!} \{G_{n-1}(T - aT) - G_n(T - aT)\} e^{-\theta(aT)^m} \quad (18)$$

ここで, 修理時間分布関数が式(17)で表される場合には,

$$G_{n-1}(T - aT) - G_n(T - aT) = \begin{cases} 0, & T - aT \leq 3(n-1) \\ 1, & 3(n-1) < T - aT \leq 3n \\ 0, & 3n < T - aT \end{cases} \quad (19)$$

であることから, これらを式(18)に代入して整理すると次のようにまとめられる.

$$\xi_T(a) = \sum_{k=\left[\frac{T-aT}{3}\right]+1}^{\infty} \frac{\theta^k (aT)^{mk}}{k!} e^{-\theta(aT)^m} \quad (20)$$

但し, 記号 $[x]$ は実数 x を越えない最大整数を表す.

Table 2 Numerical values

Required interval availability a_R	0.922
Preventive maintenance cost C_P	1000000
Minimal repair cost C_R	300000
Unit penalty ρ	25000
Confidence coefficient p	0.90, 0.95, 0.99

(2) 期待ペナルティ

式(8)に式(13)を代入して部分積分を用いると, $\xi_T(0) = 0$ であるので, 予防保全周期当たりの期待ペナルティは次のように整理できる.

$$P_E(T) = \int_0^{a_R} P(T_L) d\xi_T(a) = \rho T \int_0^{a_R} \xi_T(a) da \quad (21)$$

(3) 期待故障回数

式(10)と式(16)より, 予防保全周期中の期待故障回数は次のようである.

$$N(T) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\theta^k T^{mk}}{k!} e^{-\theta T^m} \right\} * G_{n-1}(T) \quad (22)$$

特に, 修理時間分布関数が式(17)で表される場合には

$$G_n(T) = U(T - 3n), \quad n = 0, 1, \dots, \left[\frac{T}{3}\right] + 1 \quad (23)$$

であるので, 式(22)に代入して整理すると次のように求まる.

$$N(T) = \sum_{n=1}^{\left[\frac{T}{3}\right]+1} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\theta^k \{T - 3(n-1)\}^{mk}}{k!} e^{-\theta \{T - 3(n-1)\}^m} \quad (24)$$

(4) 最適予防保全周期

以上より, 表 2 の数値を用いて, $\xi_T(a_R)$ と $C(T)$ の T に対する変化を計算するとそれぞれ図 4, 図 5 のようになる.

図 4 から分かるように, 修理時間分布関数 $G(t)$ が不連続関数であるために, $\xi_T(a_R)$ の値は式(20)の和の計算の区切りにおいてジャンプしている. 具体的には, T の値が $3 \div (1 - a_R) = 3 \div (1 - 0.922) \approx 38.46$ 増加するごとにジャンプしている. これにより, 問題(11)の制約条件を満たす T の実行可能領域は分割される. 信頼係数 p のそれぞれの値に対する実行可能領域を示すと表 3 のようになる.

一方, 図 5 より, $C(T)$ は $T = 178$ において最小値を得ていることが分かる. また, 表 3 の実行可能領域を考慮して信頼係数 p のそれぞれの値に対す

Fig. 4 Fluctuation of $\xi_T(a_R)$

Fig. 5 Fluctuation of $C(T)$

る最適予防保全時点 T^* をまとめると表4のようになる。表中、要求稼働率を確保する確率は最適予防保全時点における $1 - \xi_{T^*}(a_R)$ の値である。この結果より、信頼係数 p の値が小さい方が制約が緩くなって期待総費用が小さくなると同時に、要求稼働率を確保する確率も低くなることが分かる。

4.9 現状との比較 次に、提案した定期予防保全方式によって得られた結果を現状と比較する。

まず、記録が残っている過去 13 回の予防保全における予防保全周期の平均長さを計算すると 61.9 日であった。そして、その間の予防保全回数、修理回数と表2に示した C_P 、 C_R の値を用いて 1 日当たり平均総保全費用を計算すると 1.727 万円/日となった。また、実績としての稼働率は 98.9% であった。

これらの値と表4に得られた結果を比べれば分かるように、現状行われてきた保全は過剰保全になっていたと考えられる。すなわち、予防保全周期については、表4の最短のケース 89 日（信頼係数 0.99）よりも平均で 20 日以上も短く、その結果、予防保全頻度が高いため費用も高くなっている。表4の結果を受け容れれば、最も条件の厳しい場合（信頼係数 0.99）でも費用を現状より 25% 程度削減できることが分かる。また、稼働率も 98.9% と要求稼働率 92.2% に比べ

Table 3 Feasible ranges

Confidence coefficient p	Feasible range
0.90	$0 < T \leq 180.0$ $192.5 \leq T \leq 200.0$
0.95	$0 < T \leq 37.0$ $38.5 \leq T \leq 142.0$ $154.0 \leq T \leq 165.0$
0.99	$0 < T \leq 19.0$ $38.5 \leq T \leq 57.0$ $77.0 \leq T \leq 89.0$

Table 4 Optimal solutions

Confidence coefficient p	Optimal preventive maintenance cycle T^* (days)	Total expected cost per unit time $C(T^*)$ (1000yen/day)	Probability to keep required interval availability $1 - \xi_{T^*}(a_R)$
0.90	178	9.98	0.91
0.95	165	10.01	0.95
0.99	89	12.96	0.99

Table 5 Cost reduction rates

Confidence coefficient p	Cost reduction rate compared to current method
0.90	42.2%
0.95	42.0%
0.99	25.0%

ポイント以上も高く、必要以上に予防保全が施されている現状を表していると言える。提案する方式によって得られた表4の各結果について、現状と比較した場合の費用削減効果をまとめると表5のようになる。

4.10 考察 以上の結果より、保全費用や稼働率の面から、リフロー設備に対する現状の保全は過剰であることが観察された。このことは、設備メーカーとの契約という実際的な問題があることを割り引いて考えても、故障を起こさないように早めに予防保全を施す傾向があるためと考えられる。このような現象が起きるのは、経営的には保全費用を削減することが有効であると分かっているにもかかわらず、設備の運用管理責任を持つ保全計画者の立場では、故障を起こさずに稼働状態を保つことが重要であり、しばしば保全費用を低減することよりも優先されるからであると思われる。

定量的に表すことができる費用だけで評価した場合には、図5から分かるように予防保全を 178 日周期で施すのが最経済的である。この周期は 1 ヶ月を 21 日とすると約 9 ヶ月を意味しており、保全計画者の立場からすると受け容れ難いほど長い周期であろう。実際、金額で表される損（本例では残業費用）以外にも、リフロー設備が停止することによる負の影響が存

在することは明らかで、したがって 178 日より短い周期での予防保全が必要である。このように、従来の研究における費用のみによる評価の枠組みは明快で理解し易いが、現実の保全計画者の意思決定要因を考えると必ずしも完全ではないことが分かる。

提案した定期予防保全方式では、上記のような定量的に表せないあいまいな部分を考慮するために、信頼係数という政策変数を導入している。したがって、提案した方式を有効に活用するためには信頼係数の適切な設定が必要となる。しかし、先の研究⁹⁾においても指摘したように、信頼係数の設定には主観的な面が多分に存在しうる。また実際には、金額として表せない損の大きさを信頼係数にどのように反映すべきかが不明のため、信頼係数を一意に決められない場合もある。そこで、予め信頼係数の値をいくつか用意しておき、それらの下で得られた結果を見て判断するというフィードバック的アプローチが有効であると考え、本例においても 3 通りの信頼係数を用意して、それらの結果を基に判断するというアプローチをとった。表 4 の結果を得た上での保全計画者の判断は、信頼係数 0.99 の場合が妥当ということであった。これは、予防保全周期を現状より長くしても高い確率（ほとんど確率 1）で要求稼働率を確保でき、かつ費用も削減できることが分かったからである。このようなフィードバック的アプローチをとれば、結果として得られる定量的な効果や影響を判断材料として使えるため、事前にはあいまいだった判断基準がより明確になることが期待される。例えば、本例では結果的に判断外になったが、信頼係数が 0.95 の場合と 0.90 の場合では、表 5 の費用削減効果においてあまり大きな差は見られない。このことを判断材料にすれば、信頼係数を 0.95 にすることによって、費用削減効果を大きく犠牲にすることなく、より高い確率での要求稼働率の確保が可能であるということを認識できる。このように、主観的で不明確な意思決定場面において定量的根拠を与え、より確信度の高い判断を可能にしていると言える。なお、以上のようなフィードバック的意思決定過程は、数学的には先の研究⁹⁾に示したラグランジュ乗数による判別に相当している。

5. 結 言

本研究では、先の研究⁹⁾で提案した定期予防保全方式を、故障の際に小修理が施されるモデルに修正し、プリント基板組立ラインのリフロー設備に適用した例

を示した。その結果、現状の保全実施状況では、必要以上に頻繁に予防保全を施していることが分かり、稼働率や保全費用の面から過剰保全であることが観察された。また、提案した定期予防保全方式によって、要求稼働率を確保しながら総費用を削減できることを示し、その有効性を確かめた。

文 献

- (1) McCall, J. J., Maintenance Policies for Stochastically Failing Equipment: A Survey, *Manage. Sci.*, 11-5 (1965), 493-524.
- (2) Pierskalla, W. P. and Voelker, J. A., A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance, *Nav. Res. Logist. Q.*, 23-3 (1976), 353-388.
- (3) Sherif, Y. S. and Smith, M. L., Optimal Maintenance Models for Systems Subject to Failure- A Review, *Nav. Res. Logist. Q.*, 28-1 (1981), 47-74.
- (4) Valdez-Flores, C. and Feldman, R. M., A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-unit Systems, *Nav. Res. Logist.*, 36-4 (1989), 419-446.
- (5) 船木謙一・吉本一穂, 生産の達成を考慮した定期予防保全計画, 日本経営工学会誌, 46-5 (1995), 409-419.
- (6) Barlow, R. and Hunter, L., Optimum Preventive Maintenance Policies, *Oper. Res.*, 8-1 (1960), 90-100.
- (7) Murthy, D. N. P., A Note on Minimal Repair, *IEEE Trans. Reliab.*, 40-2 (1991), 245-246.
- (8) Beichelt, F., A Unifying Treatment of Replacement Policies with Minimal Repair, *Nav. Res. Logist.*, 40-1 (1993), 51-67.
- (9) Cleroux, R., Dubic, S. and Tilquin, C., The Age Replacement Problem with Minimal Repair and Random Repair Costs, *Oper. Res.*, 27-6 (1979), 1158-1167.
- (10) Feldman, R. M., Lively, W. M., Slade, T., McKee, L. G. and Talbert, A., The Development of an Integrated Mathematical and Knowledge-based Maintenance Delivery System, *Computers Oper. Res.*, 19-5 (1992), 425-434.
- (11) Chen, M. and Feldman, R. M., Optimal Replacement Policies with Minimal Repair and Age-dependent Costs, *Eur. J. Opl. Res.*, 98-1 (1997), 75-84.
- (12) Hsu, L., Simultaneous Determination of Preventive Maintenance and Replacement Policies in a Queue-like Production System with Minimal Repair, *Reliab. Eng. Sys. Safety*, 63-2 (1999), 161-167.
- (13) Sheu, S., Yeh, R. H., Lin, Y. and Juang, M., A Bayesian Perspective on Age Replacement with Minimal Repair, *Reliab. Eng. Sys. Safety*, 65-1 (1999), 55-64.
- (14) Rigdon, S. E. and Basu, A. P., The Power Law Process: A Model for the Reliability of Repairable Systems, *J. Quality Technology*, 21-4 (1989), 251-260.
- (15) Nakagawa, T. and Kowada, M., Analysis of a System with Minimal Repair and Its Application to Replacement Policy, *Eur. J. Opl. Res.*, 12-2 (1983), 176-182.
- (16) Funaki, K. and Yoshimoto, K., Distribution of Total Uptime during a Given Time Interval, *IEEE Trans. Reliab.*, 43-3 (1994), 489-492.