

建築設備の保全方策の検討

梶原 暁

(技術研究所)

Examination of Maintenance Policies for Building Equipment

by Gyo Kajiwara

Abstract

Maintenance keeps building equipment functioning at optimum efficiency. Maintenance policies, however, are mainly based on experience. Few policies have undergone a theoretical analysis aimed at practical implementation. This paper describes a method for calculating the operation time from a reliability curve formulated at the time maintenance is done. The method is applied to various Weibull distribution lifetime to calculate the operation time when overhaul maintenance is done. Operation time is also calculated when changes are made to the maintenance policy or its implemented time. As an example, the simple calculation simulates the cost of maintenance using actual values for maintenance. This study describes a method for formulating a building maintenance policy based on the cost requirements established by the building's management.

概要

老化する設備に対して保全は性能を保つのに有効であるが、経験に基づく知見が多く、理論的な検討も十分とは言えず実務での適用に課題がある。保全して信頼度が変わる場合に信頼度曲線から稼働時間を算出する方法を着想して保全後の稼働時間を求めた。この方法を用いて、幾つかのワイブル分布型の寿命分布に対してオーバーホールする場合と、保全方法や保全時期を変えた場合の稼働時間の変化を求めた。さらに実際の数値を入れて簡単な計算を行い収益の変化を求めた。これらから経営の視点で決められた保全費用に合わせて保全法を選択する道をつけた。

§ 1. はじめに

すべての物は時間の変化に従って老化する。本文が対象にしているものは建築設備である。つまり建築に設備された空調・衛生等の工業製品である。必ず時間の経過に伴い劣化する。図-1に示すように劣化する方向は一方であり、自然に再生は起きない。

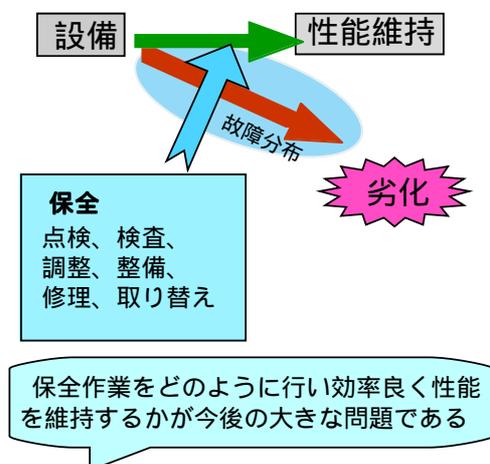


図-1 設備保全の役割

機器設備は割り当てられた機能があり、老化は機能の低下を引き起こす。機能を維持するためには老化した箇所を若返らせる必要があり、傷んだりすり減った部位は修復して機能を回復させなければならない。すなわち保全が必要である。特に最近のように省エネ・省資源が唱えられ、できるだけ物持ちを良くして使うことが社会的な要望になっている風潮では、保全の必要性は増大する。

劣化が確率事象でありまた分布を持つとすると、予知することができるようになり予防保全の可能性が出る。実際そのような検討が行われている。分布のばらつきが小さければ効率のよい保全ができるが、確率に基づくものである以上必ず予想に合わない場合がある。予防保全だけでは実務に適用できず、点検に基づいて保全の効率を上げようとする所以である。

信頼性工学は壊れにくさを確率的に数値 $R(t)$ で表して信頼度としている。劣化するとこの数値は必ず低下する。この数値を利用して保全を行うときの信頼度の変化に着目し、その式を使い数値積分を行って稼働時間の期待値を得て保全の効果を表すことを試みた。さらに保全法の選択、保全時期の選定等の保全の実施に役立てることを試みた。

§ 2 . 保全の現状

従来、保全は故障を修理することから始まっているのだろう。実際の仕事を通じて様々の工夫が行われてきたようである。JIS信頼性用語¹⁾に定期保全、状態監視保全等の様々の保全法の名称が記されている。ただこれらの理論的な背景については年令取り換え等の一部の方策を除いてはほとんど検討されていない。²⁾³⁾ 現実の問題として、設備には保全が必要であり、壊れてしまってからどのように対応するかを機械・電気等の技術的な観点からだけ判断するのは限界があるだろう。時間の概念を入れて、様々な保全法の理論的な背景を明確にしておくことで保全を応用のきく状態にすることが必要である。

§ 3 . 保全と信頼度の変化⁴⁾⁵⁾

定義によれば信頼度 $R(t)$ は故障寿命を確率変数と見なしたときの故障分布関数 $F(t)$ を 1 から引いた関数である。この曲線を数直線の上に描けば信頼度曲線になる。故障分布 (= 不信頼度関数) を微分したのが故障の確率密度関数 $f(t)$ である。故障があれば信頼度は低下する。そして保全が行われ修理が終われば信頼度は回復する。この信頼度の変化を表したのが図-2である。

故障が起きたときに保全が必要になるが、故障後に対応して行うのが事後保全 (CM) 故障の前に予想して計画的に行うのが予防保全 (PM) である。予防保全は予想がどれだけ正確に行えるかがその有用性を左右する。できるだけ壊れる寸前に十分な資材

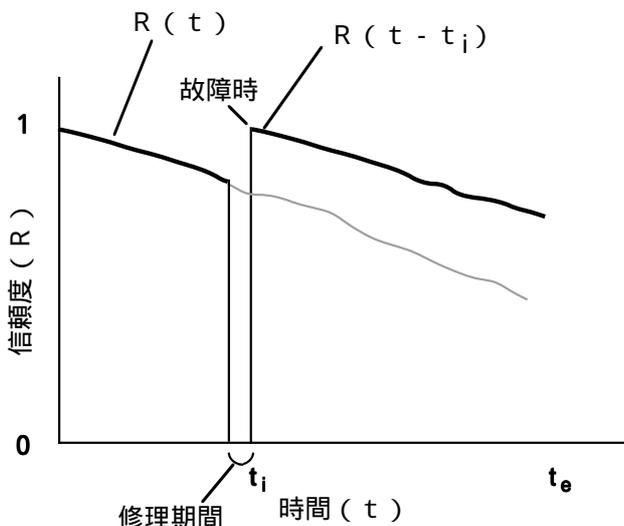


図-2 事後保全時の信頼度変化
ただしオーバーホール時を表す

と人力を用意して行えば無駄の無い良い保全になる。一方事後保全は故障の起きた後に対策を立てて保全するので場合により準備が不十分であり、後手の対策でそのために損失を増やしたり、収入を減らしたりする。しかし、前以て準備がいらずに保全できるのは大きなメリットであり、技術的に簡単な故障であれば十分にメリットを発揮する方法である。

すると問題になるのはやや複雑な設備などで、故障が発生した場合にどのような対応をすればいいのかが選択できる場合に何を根拠に判断するかということになる。

§ 4 . 建築設備の特徴

ここで対象にしているのは建築設備である。建築設備はポンプ、ファン、ボイラー等の機械と配管、ダクト等の導管で構成される。中でも非常に簡単な例を図-3に示す。生産形態からは機械は工場で作られ、ダクト、配管などは現場で作られることが多い。現場で作られるものは概して生産環境がばらつくことが多く、工場に比べて品質の維持が難しい。現在の技術動向は現場製作を出来るだけ工場に移して現場作業を減らすようにしているが、それでも接続部の作業は残る。このような生産形態のために建築設備は様々のばらつきを持ったアイテムが混合するこ

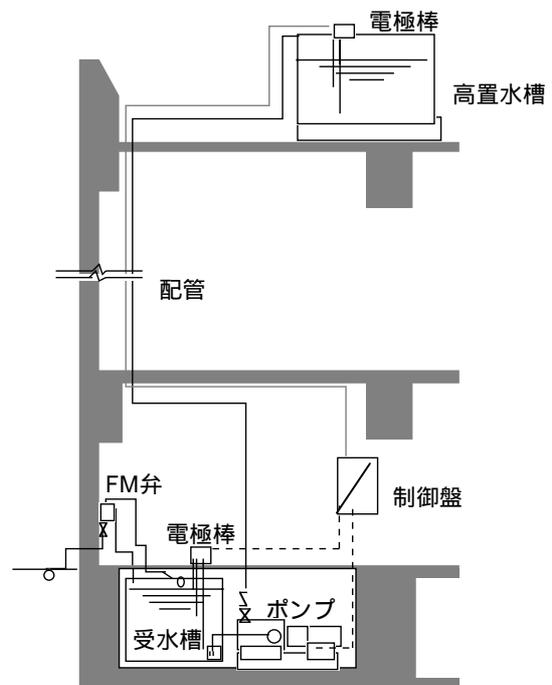


図-3 設備の例

ポンプ、水槽は工場製作で配管は現場加工である

とになる。そこで信頼性もアイテムごとにばらつくことになる、そして安全性もばらつくことになる。

安全性を向上するためには、このような建築設備の特性に鑑みて取り組む必要がある。単独の機器だけあるいはユニットならば交換を考えるだけですむ。建築設備ではあるアイテムでは交換が行われ、別のアイテムでは更新工事が行われるというようにアイテムごとに最良の保全方策が様々であり、全体としてはそれらの組み合わせが最良の保全方策になる。保全の程度にも幅が必要である。

§ 5 . 故障と稼働時間の関係

5 . 1 故障回数と稼働時間

故障と期待稼働時間の間には以下の関係がある。

$$L = p_0 L_0 \Delta t + p_1 L_1 \Delta t + p_2 L_2 \Delta t + \dots + p_n L_n \Delta t$$

$$= \sum_{i=0}^n p_n L_n \Delta t \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_0^t pL dt \quad (1)$$

ただし

L : 全期待稼働時間

p_i : i 番目の故障の起きる確率

L_i : i 番目の故障の起きた場合の期待稼働時間

一方で L_i は修理が完全に行われ元々と同じになる。

L =

$$p_0 L_0 \Delta t + p_1 \left(L_1 \Delta t + \frac{p_2}{p_1} L_2 \Delta t + \dots + \frac{p_n}{p_1} L_n \Delta t \right) \quad (2)$$

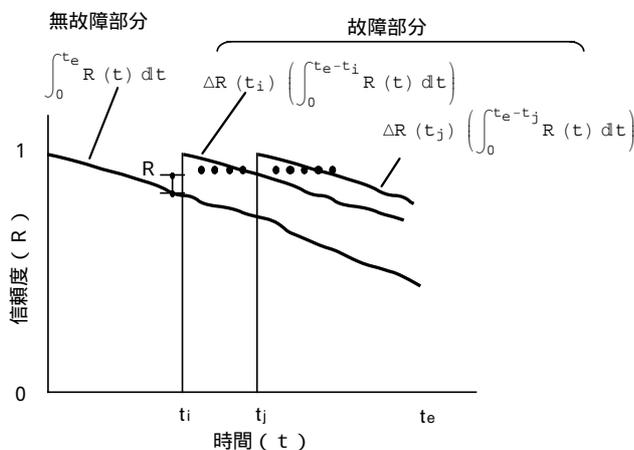


図-4 故障の起きるときの信頼度変化
故障部分は無数にあるのを2例で代表している

p_2 は p_1 の下で起きる。 L_1 と L_2 は時間がずれるだけで全く同等だから $p_2 / p_1 \approx p_1$ 故に $p_2 \approx p_1^2$ 2次のレベルになり小さいので無視する。

5 . 2 稼働時間の算出

ある区間 t_1 から t_2 の間の信頼度関数 $R(t)$ を持つアイテムの期待稼働時間は

$$L_1 = \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt \quad (3)$$

故障の起きることを考える。信頼度の変化からは故障は信頼度の低下分に比例すると考えられる。いったん故障したアイテムは対象期間中には故障しないから、時刻 t_i に故障するアイテムの信頼度関数は

$$\Delta R(t_i) \int_0^{t_e - t_i} R(t) dt \quad (4)$$

となる。対象とする期間を 0 から t_e とするとその個々の時点で上記の信頼度関数が故障するアイテムについて成り立つから全部の故障する部分の期待稼働時間は

$$L_2 = \sum_{i=0}^n \Delta R(t_i) \left(\int_{t_i}^{t_e} R(t) dt \right) \Delta t$$

$$\xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \int_0^{t_e} r(t_i) \left(\int_{t_i}^{t_e} R(t) dt \right) dt \quad (5)$$

この関係を図-4 に表した。

§ 6 . パラメータ変化による稼働時間の変化

故障の分布が様々に変化していても上記で求めた計算法を適用してみる。故障の分布を汎用性の高いワイブル分布で表して m (形のパラメータ), (尺度のパラメータ) 等のパラメータの変化に対する稼働時間の変化を3例、図-5 に表した。ただし横軸は対象期間を表し、縦軸は期待稼働時間を表している。対象期間を延ばせば寿命の2倍に近づく。 m が増えれば曲線は立ち上がり、 m が増えれば寝る傾向がある。全体の時間は時間の経過とともに段々に増加が減り飽和してくる。これは故障を1回だけすることを考えて計算しているからである。実際には時間が経ち故障回数が増えてきて曲線とは違って来るから注意が必要である。

修理を行った後の復元状態はオーバーホールすな

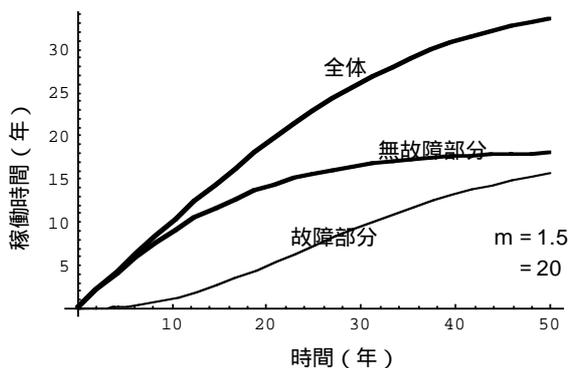
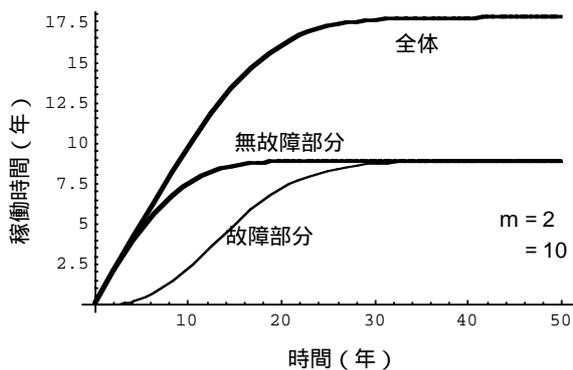
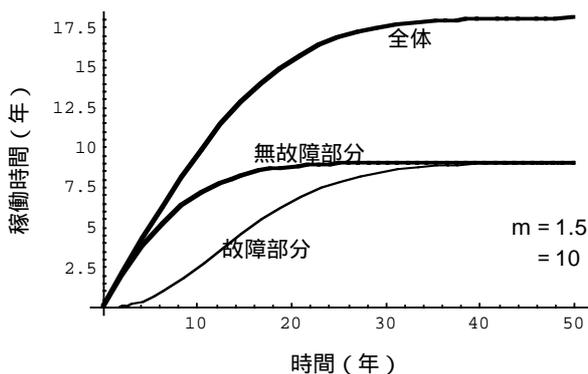


図-5 期待稼働時間の変化

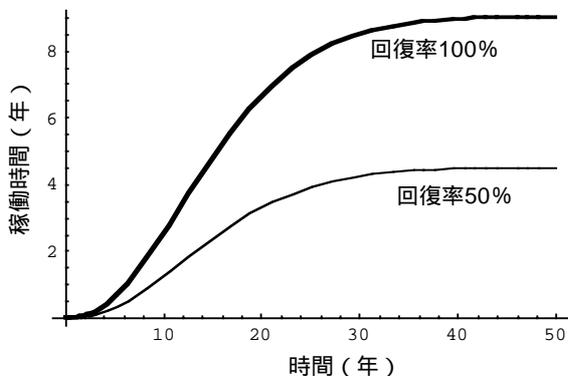


図-6 回復率の変化による故障部分の期待稼働時間の変化

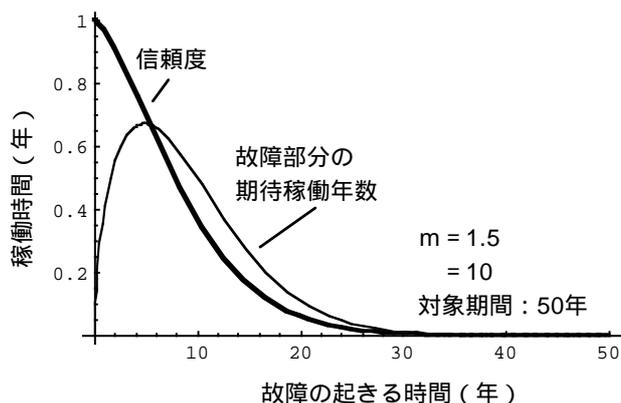


図-7 故障時対故障ある時/無い時の信頼度変化

わち全く当初と同じ(回復率 = 100%)と仮定してこれまでの計算は行ってきた。実際には修理には色々な段階があり、回復率を変えて修理することが考えられる。そこで回復率を50%に下げて計算してみると図-6に示すように期待稼働時間は減る。

故障の起きる時とその時に起きた故障を保全したことによる信頼度の関係を示したのが次の図-7である。7年目くらいに故障部分の期待稼働年数の分布がもっとも大きくなっている。30年くらいを過ぎるとほとんどアイテムが故障し尽くしてしまい、信頼度0に近づく。

§7. オーバーホールの時期

オーバーホールを行えば悪い箇所は無くなるから出来るだけ行ったほうが稼働年数は延びるだろう。ただしオーバーホールを行うには様々な機材、部品も必要になるであろうし、高度な技術者が必要になることもある。いずれにしても準備が必要である。経済的な観点から、費用に見合うだけの効果があるか否かを判断しなければいけない。また準備するのは何時にするのがいいかが求められる。そこまでの必要があるかという判断も常に求められる。

そこで取り組み方としてある程度の時間の枠(例えば1年)を決めておいてその間ではオーバーホールの準備をしておき、そこで故障が起きれば対応することが考えられる。

このような考えで増加する期待稼働年数を求めたのが図-8である。1年間のオーバーホール期間を設けて、その始まりを0年から移動し、20年目での期待稼働年数を求めている。形は図-6とほぼ同じ形になる。形のパラメータmと尺度のパラメータを変えてその時の稼働年数を描いている。

mが大きくなると最適な時期が段々に後ろに行く。

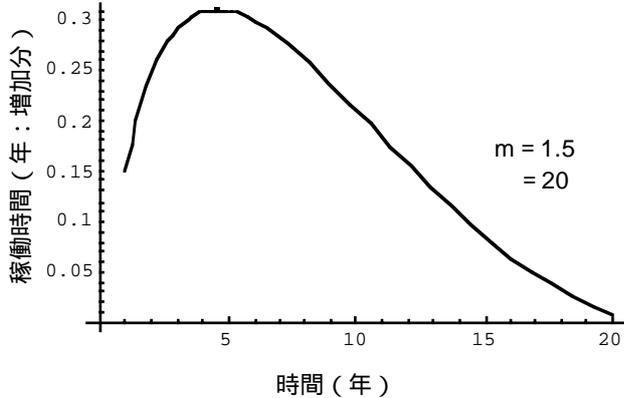
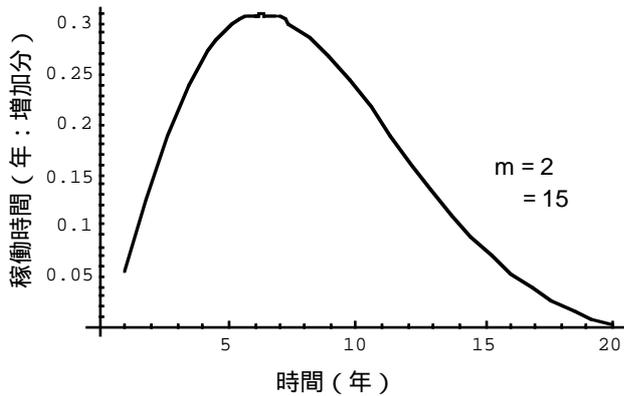
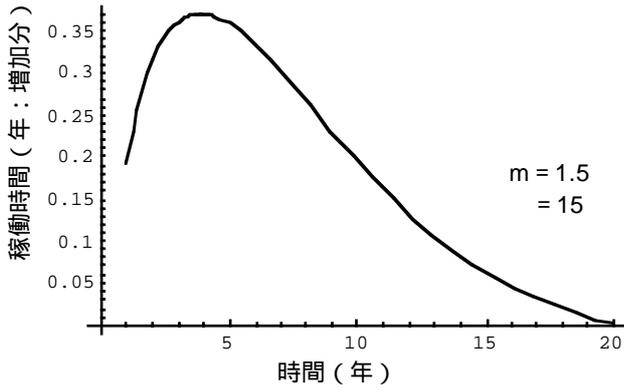


図-8 オーバーホールの時期対稼働時間の増加

§ 8 . 事例の検討

事後に行う保全の変化を検討したが、実際の修理を行う際には故障を見てどのような対策が必要かを判断し、最良の修理ができるようになるのが望ましい。保全の善し悪しは、通常は期待稼働時間かあるいは収益・損失を含んだ総合費用を保全を行う場合とそうでない場合で比較して判断する。

収入は以下のように表せる。

収入 = (収益 - 維持費) × 期待稼働時間 - 修理時間 × (損失 + 修理費)

各記号を以下のようにする。

- 収益： C_p (円/年)
- 修理費： C_m (円/時)
- 維持費： C_r (円/時)
- 損失： C_l (円/時)
- 修理時間： t_r (年)

式(5)に基づいて f_t を以下のようにおいて時間の比(時間率: T_r)と費用の比(収益率: I_r)はそれぞれ次のようになる。

$$f_t(t_e) = \int_0^{t_e} R(t) dt$$

$$+ \int_0^{t_e} r(t_i) \left(\int_0^{t_e-t_i} R(t) dt \right) dt_i$$

$$I_r = \frac{(C_p - C_m) f_t(t_e) - t_r (C_r + C_l)}{t_e} \quad (6)$$

$$T_r = \frac{f_t(t_e)}{t_e} \quad (7)$$

実際に計算してみる。収益 C_p が 200 万円/年、維持費 C_r が 120 万円/年、修理費 C_m が 10 万円/日、損失 C_l が 1 万円/日、修理に平均 3 日かかるとしよう。対象とする設備の分布のワイブルパラメータ $m = 1.5$, $\theta = 10$ とする。

表-1 年数経過と収益率、時間率

	年	収益率 (万円/年)	時間率
1	10	180	0.94
2	20	146	0.77
3	30	111	0.58

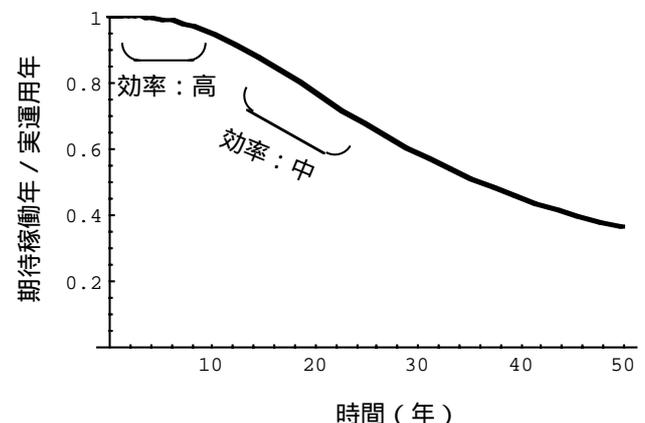


図-9 時間率の変化

10年、20年、30年での収益率と時間率を求める。ただし保全はオーバーホールすなわち回復率100%として行う。(6),(7)式を用いて求めた値を表-1に示した。費用については年数が経つほど収入が下がる。経営判断等の他の要因で決めた収入の水準と比較して判断すべきであろう。

時間率は10年程度まではほぼ1で実際の年数とほぼ同じ期待稼働年数である。期待稼働時間は、時間が長くなるに従い図-7で示すように実際に使用している横軸の時間より少なくなってくる。全期待稼働時間が実際の運用時間をあまり下まわらない部分の保全が有効であると考えられる。

図-5のように修理の回復率を下げれば稼働時間は減ずる。そして収益も減ずる関係がある。この関係を使って、逆に必要な稼働時間あるいは収益を仮定してそれに対する必要な修理程度を判断することができれば、実際の保全の適用にも極めて有用であろう。今後の課題となる。

§ 9 . まとめ

信頼度曲線から稼働時間を予測計算する方法を考案し、この計算により以下の様なことが分かった。

1) 保全を行うことで稼働時間は延びる。延び方は故

障分布により違う。

2) 保全した後の稼働時間の期待値を用いて保全の効果を判定できる。また優劣を判定できる。すなわち保全方策を選択できる。

3) 保全の方法(程度)の変化に対して収益あるいは稼働時間の変化が求められる。したがって求める収益あるいは稼働時間が判れば保全の程度を決めることができる。

4) 事後保全を行う時期により稼働時間の延び方が違う。この関係を使い保全の方策を決めておいて(オーバーホール等)保全の開始を効率の良い時期に決めることができる。

§ 10 . おわりに

提案した手法を用いて、事後保全の結果を稼働時間の変化で計算・予測した。また実際の適用に近づけた例を考察した。今後、更に実際の使用に近づけていくように努力したい。

謝辞

元信頼性学会会長現広島商船高専校長堀籠教夫先生には貴重なアドバイスをいただきました。紙面を借りて御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 日本工業調査会編、“JIS Z8115 ディベンダピリティ(信頼性)用語2000”、日本規格協会
- 2) R.E. Barlow, L. Hunter, “Optimum Preventive Maintenance Policies”, Operations Research, 8, 1, pp.90-100(1960)
- 3) 例えば三根、河合、“信頼性・保全性の基礎数理”、日科技連出版社、1984
- 4) 梶原、堀籠、“最適保全点検周期の研究”、29回信頼性保全性シンポジウム発表報文集、p.275,1991,7,日科技連
- 5) 梶原、“オーバーホールと小修理の比較”、建築学会大会講演論集環境系 p.1455, 日本建築学会、2004,10