

「煙感知器連動防火扉の
作動信頼性維持のための
点検方策に関する考察」

名古屋大学図書
和B 60647

名古屋大学工学部工学研究科 建築学教室

防災安全工学講座 辻本研究室

朴 哲也

目 次

第一章	序 論	
1. 1	防火区画の意義	..... 1
1. 2	既存の研究	..... 3
第二章	故障データの解析	
2. 1	故障データ	..... 5
2. 2	故障データの解析	..... 8
2. 3	解析結果	..... 11
第三章	点検・保全方策	
3. 1	システムの信頼性と保全性	..... 16
3. 2	最適予防保全方策	..... 21
3.2.1	時間点検	..... 22
3.2.2	状態監視保全	..... 25
第四章	システムの同定と点検・保全モデル	
4. 1	システムの構造	..... 27
4. 2	点検・保全モデル	..... 32
4.2.1	現行点検手法とその改変手法	..... 33
4.2.2	モデル1とその改変手法	..... 33
4.2.3	モデル2	..... 35
第五章	シミュレーション結果	
5. 1	シミュレーションの目的	..... 36
5. 2	現行・改現行点検手法	..... 38
5. 3	モデル1・改モデル1点検手法	..... 42
5. 4	モデル2点検手法	..... 54

第六章	結果の考察と今後の課題	
6. 1	結果の考察	..... 58
6.1.1	各モデルのアップタイムレシオに関する考察	.... 58
6.1.2	各モデルの修復回数に関する考察	.. 63
6.1.3	各モデルのコストに関する考察	..... 67
6. 2	今後の課題	..... 73
謝 辞		..... 74
参考文献		..... 75

第一章 序 論

1. 1 防火区画の意義

火災という事象をどのように定義し、或いは火災事象の始点としてどこを定めるかという問題には様々な見解があると思われるが、ここでは「人間の活動に支障を生じないような燃焼として制御できなくなること及びその時点」と定義しよう。こうした定義に基づいた場合、防火という概念は火災の成長段階に応じて以下の3点に要約して示すことができよう。

- (1) 火元の分散制御、可燃物量の制限等を通して火災事象そのものの発生確率を低減しようとする考え方、
- (2) 内装制限、スプリンクラーの設置等によって燃焼レベルを所謂「火種」という火災の初期段階に留めようとする考え方、
- (3) 感知器や防火扉によって、不幸にして「本格的」な火災にまで進展してしまった燃焼を、より早い段階で感知し他の区域への延焼や発生した煙による避難路への影響を防止しようとする考え方、

である。これらの3点は言い換えるならば(1)、(2)は如何に「物」を守るかということのための施策であり、(3)は如何に「人」を守るかという施策である。もしも前者の手法が奏効してその燃焼を抑止し得えたならば、火災による被害というものは概ね軽微なものに留るであろう。しかしながら現実には前者の手法を徹底するにはあまりに多くの不確定な要素が含まれており、後者の手法による制御に頼らざるを得ない場合が多い。そしてこの段階も突破した火災は非常に大きな被害をもたらすことが実例によっても明らかである。逆に建築空間が防火扉によって確実に区画されてさえいればかなりの被害がくいとめられていたはずであると言える。従って現状では防火区画を形成することが火災被害をできるだけ小さくするために最も有効で現実的な手法である。表1. 1は防火区画の形成に失敗したために起きた被害の一例を示したものである。

そこで本論文では構造躯体以外で防火区画形成に最も寄与すると予想される煙感知器連動防火扉を取り上げ、それが作動すべき時に作動する確率を高く維持するための点検方策を論ずることを目的としている。

表 1. 1 防火設備の性能不良がみとめられる火災事例

コード番号	発生年月日	用途	構造・階数	延床面積 (㎡)	死者数	設備の状態	防げたと考察できるもの
7	1957. 4. 2	劇場	耐火・4/1	7,137	0	防火扉の開放	延焼面積
15	1960. 8.15	店舗	防火・3/0 耐火・5/1	2,409	0	防火シャッターの開放	"
19	1961. 7. 2	百貨店	耐火・8/3	45,826	0	防火扉の開放	"
24	1963. 8.22	百貨店	耐火・8/2	69,350	7	防火シャッターの開放	"
25	1963.12.21	百貨店	耐火・5/0	7,076	0	"	"
26	1964. 2.13	百貨店	耐火・8/3	45,659	0	"	"
28	1964. 4.23	百貨店	耐火・5/1	4,362	0	"	"
34	1965.11.27	複合用途	耐火・5/1	3,579	0	"	"
36	1966. 2. 7	複合用途	耐火・4/1	3,085	2	防火シャッターの開放	延焼面積
37	1966. 3.11	ホテル	耐火・3/1	7,465	30	"	"
48	1968. 9.13	旅館	耐火・5/1	1,320	0	避難ラッパへの防火戸施錠 防火シャッターの開放	煙の伝播による死亡 延焼面積
49	1968. 9.14	ホテル	耐火・3/0	1,813	0	"	"
50	1968.11. 2	旅館	耐火・4/2	11,258	30	防火扉の開放	"
53	1969. 2. 5	ホテル	耐火・4/0	21,117	30	自火報のハベル停止 防火扉・防火シャッターの開放	煙による避難不能 延焼面積
56	1969. 5. 1	複合用途	耐火・5/1	6,314	0	防火シャッターが閉鎖せず	"
57	1969. 8. 6	旅館	耐火・5/0	7,045	0	防火シャッターの開放	"
62	1970. 2. 6	百貨店	耐火・8/1	3,493	0	"	"
65	1970. 9. 9	百貨店	耐火・7/1	21,955	1	防火扉の開放	煙による避難不能 延焼面積
67	1970.12.26	複合用途	耐火・8/2	12,112	2	自火報のハベル停止	避難の遅れ
68	1971. 1. 1	遊技場	耐火・4/0	3,200	2	"	"
75	1972. 2.25	ホテル	耐火・7/0	11,120	3	防火扉・防火シャッターの開放	煙による避難不能
76	1972. 3.30	店舗	耐火・6/1	1,125	2	防火シャッターの開放	延焼面積
77	1972. 5.13	複合用途	耐火・7/1	25,923	118	"	"
78	1973. 3. 8	病院	防火・5/1	6,270	13	"	煙による避難不能
81	1973. 6.18	ホテル	耐火・6/1	5,735	2	防火扉・防火シャッターの開放	"
83	1973.11.29	百貨店	耐火・9/1	19,074	103	防火シャッターの開放	延焼面積 煙による避難不能
84	1973.12. 7	百貨店	耐火・4/0 木造・2/0	2,045	0	"	延焼面積
89	1975. 2. 8	病院	耐火・8/1	16,744	0	防火扉の開放	煙による避難不能
90	1975. 3. 1	複合用途	耐火・7/2 簡耐・2/0	1,618	5	自火報のハベル停止 防火シャッターの開放	避難の遅れ
96	1976. 1.10	複合用途	耐火・6/2	935	1	自火報のハベル停止	"
97	1976. 8.31	ホテル	耐火・4/0	737	2	感知器配線の断線	"
105	1977.12.18	旅館	耐火・4/2 木造・3/0	2,576	4	防火シャッターの開放	延焼面積 避難不能による飛降り
107	1978. 5.29	物品販売店 舗	耐火・5/0	4,480	1	商品のため防火シャッターの閉鎖不能	延焼面積 煙による避難不能
108	1978. 6.15	ホテル	耐火・3/0	663	7	防火シャッターの開放	延焼面積
109	1978. 9.26	物品販売店 舗	耐火・4/0 木造・2/0	647	6	防火シャッターの開放	煙による避難不能 延焼面積
111	1979.11. 9	物品販売店 舗	耐火・6/0	3,301	0	自火報のハベル停止	全焼

1. 2 既存の研究

防火区画の重要性に鑑みて、既論文ではその主要な構成要素たる煙感知器連動防火戸を取り上げ、メーカーから入手した19棟の建物の定期点検記録を元に作動信頼性の解析とその結果に基づいた建築物の火災危険度評価を行ってきた。ここでは煙感知器連動防火戸を一まとまりの要素としてとらえ、その故障時間分布に指数分布を仮定して解析が行なわれた。そこで得られた結果のうち防火扉に関するものを表1. 2、表1. 3に示す。

建物毎の煙感知器連動防火扉全体の故障率、MTBFがかなりの幅でばらついていることが表1. 2から分かる。表1. 3からはダウンタイムレシオにそれほど大きなばらつきがなく、また平均点検間隔も200日～400日程度で共通していることが分かる。

表1. 2 MTBFと故障率

建物 No.	動作可能時間 (日)	故障数 (回)	故障率	MTBFの最尤値	MTBFの90パーセント両側信頼区間値 (日)	
1	26,246	5	1.905	5,249	2,500	13,323
2	16,668	3	1.947	5,137	2,151	20,327
3	13,992	2	1.462	6,841	2,221	39,357
4	11,427	3	2.634	3,796	1,474	13,935
5	32,331	11	3.386	2,953	1,779	5,265
6	51,153	27	5.277	1,895	1,370	2,692
7	25,456	15	5.225	1,914	1,102	2,752
8	22,941	2	0.877	11,399	3,642	64,533
9	40,390	2	0.510	19,620	6,411	113,615
10	11,933	2	1.681	5,950	1,904	33,736

表1. 3 平均点検間隔とダウンタイムレシオ (DTR)

建物 No.	点検期間合計 (日)	動作不能時間 (日)	平均点検間隔 (日)	DTRの実測値	DTRの予測値
1	27,027	780	178	0.029	0.057
2	18,440	2,228	559	0.096	0.083
3	14,480	488	155	0.034	0.019
4	12,100	673	186	0.056	0.041
5	33,830	1,499	205	0.043	0.058
6	58,993	7,840	204	0.133	0.108
7	35,075	9,619	369	0.274	0.167
8	23,660	719	395	0.030	0.029
9	40,770	380	194	0.009	0.008
10	12,372	379	221	0.031	0.032

点検方策を論ずる場合、基本的に与えられねばならない条件として設備・機器の故障特性があるが、ここで得られた結果のうち故障率とMTBFに大きなばらつきのあることは、この結果を用いた点検方策の解析に大きな障害となることが予想される。故障率、MTBFのばらつきの原因として、各建物の運用環境は点検間隔に大きな相違がみられないことから主たるばらつきの要因であるとは考えられず、むしろ物理・使用環境が非常に異なっているためと考えられること、及び煙感知器連動防火扉を一まとまりの要素としてとらえているためと考えられる。

故障特性のうち故障時間分布を明確に把握するために障害となる幾つかの要因は排除できない性質のものであるが、防火扉を複数の要素に分割しそれぞれの故障メカニズムを考慮したデータ解析を行なうことによって、防火扉全体の平均的特性をより正確に求めることは可能であると考えられる。そこで次章の故障データの解析では妥当と思われる幾つかの要素に分割した後それぞれの要素の解析を行なった。

第二章 故障データの解析

2. 1 故障データ

信頼性解析に用いられるデータは通常メーカー等による寿命試験によって得られるものである。その場合、試験サンプルが全数故障するまで試験を続けることがより正確な解析を可能とするがそれは長期間の有用寿命をもつ機器では実際上不可能である。

煙感知器連動防火扉に関しては全体としての寿命試験が行なわれておらず、耐久設備として数十年にわたって様々な環境下で使用され続けることを考えると寿命試験そのものが不可能な設備であるともいえる。そこで実際に取り扱うことのできるデータは現存の建物に設置された防火扉の定期点検記録が主要なものである。

表 2. 1 調査対象一覧

建物	用途	階数	防火扉	竣工年月	点検期間
No 1	事務所	8	20枚	1979.11	1981. 2.25~1983. 1.19
2	物販店	5	10	1975.10	1978. 6.26~1983. 7.14
3	事務所	8	8	1974. 4	1978. 5.25~1983. 5. 9
4	事務所	9	11	1974. 1	1978.12.15~1981.12. 9
5	事務所	8	17	1974. 5	1977. 9. 7~1983. 2.19
6	競艇場	6	35	1974. 9	1979. 5.14~1983. 3.19
7	ホテル	6	19	不明	1980. 5.28~1984. 6.18
8	物販・事務	9	20	1980. 4	1981. 4.12~1984. 7. 9
9	会議場	5	15	1975 .5	1977. 6. 1~1984.11.10
10	自治体庁舎	5	4	不明	1976. 2. 8~1984. 7.28

今回解析が行なわれた故障データは既論文において既に収集されたものと同じのデータであり、そのうち表2. 1に示す10棟の建物に設置された扉からのものである。既論文では煙感知器連動防火扉を一つの装置として扱って解析していたのに対して、ここではそれを性質が異なると共に使用状況が異なるため与えられるストレスも異なる、と予想される複数のユニットから構成されるシステムと考え、新たに故障モードを以下の3種類のユニットに対応させてそれぞれについて解析を行なった。

- (1) 扉枠・本体
- (2) 磁着・解放装置
- (3) (煙)感知器・連動制御器

表2. 2に防火戸に関する故障モードの一覧を示す。図2. 1は既論文において整理されたデータの一部であり、そのなかに示されている記号A、Bは上記の(1)に対応した故障であり、Fは(2)に、G、Iは(3)に対応している。

故障モード	異常モード
A) 枠・扉の変形損傷	C) 順位調整器の不良
B) 閉鎖トルクの不足	D) 召し合わせの不良
F) 磁着・解放装置の不良	E) 把手・錠の不良
G) 連動制御盤の不良	H) 閉鎖状況・速度の不適合
I) 煙感知器の不良	J) 作動線上に障害物を放置する

表2. 2 故障及び異常の種類

BUILDING NO. 5 SELECT MODE= 1

No.	SI	SCALE		P	REV	TIME FROM THE FIRST MAINTENANCE (=100 DAYS)																	
		WIDTH	HEIGHT			0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0							
601	D	1240	1890	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
602	D	1240	1890	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
603	D	1230	1888	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
701	D	1240	1888	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
702	D	1240	1888	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
401	D	1240	1888	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
402	D	1240	1888	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
501	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
502	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
401	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
402	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
301	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
302	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
201	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
202	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
101	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
811	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

図2. 1 防火扉の観測記録

データに記載されている情報は、以下のとおりである。

- 1) パネルの寸法、 2) 機種、 3) 片開きか両開きか、
- 4) 潜戸の有無、 5) 保守点検実施年月日
- 6) 点検時における扉の状態

○) 正常に作動した。

△) 異常が発見されて、即座に修理された。

×) 異常が発見されたが、即座には修理が不可能で修理するよう要請した。

このデータはメーカーによる定期点検記録から得られたものであることは既に述べたが、故障の発生時点が不明であることはもちろんのこと、故障発見後どの時点で修復がなされたかの記録が無くまた修復完了の時点も不明であること、竣工年が不明の建物が含まれていることなどデータ解析にとって致命的な記録の欠落を含んでおり、解析にあたっては幾つかの仮定がなされた。その一つは、故障発生は竣工から初回点検時点までの中間点であるかまたは点検時点の中間点であるとしたこと、二つめは、次の点検時点において修復が完了していると認められる場合修復は点検時点において即座になされたものとしたこと、三つめとして修復は完全に行なわれ使用初期状態と同様になるとしたこと、即ち各扉の各故障は全て独立として扱うこと等である。これらの仮定を模式化して図2. 2に示す。

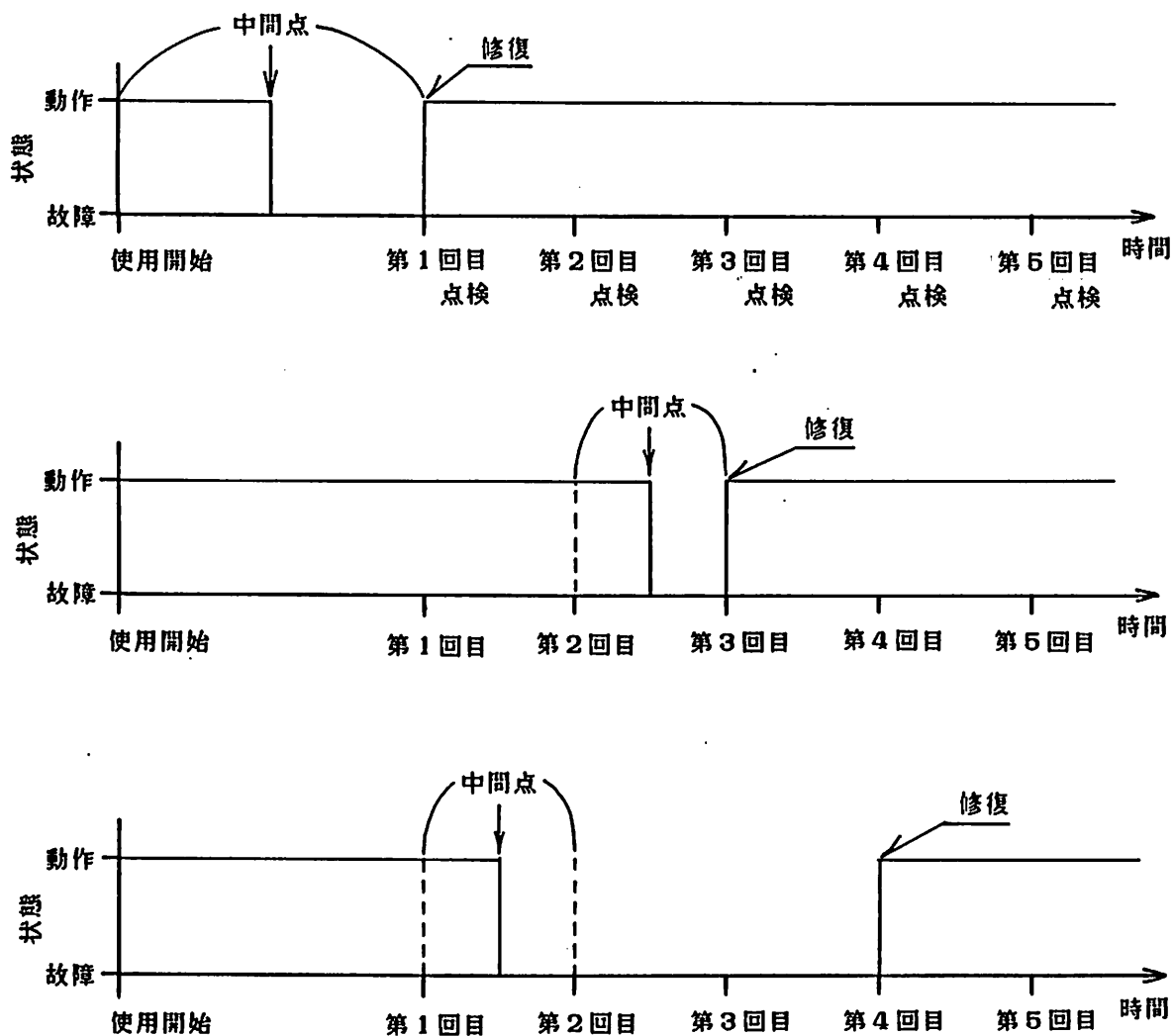


図2. 2 データ解析に対する仮定の模式図

2. 2 故障データの解析

設備・機器等の信頼性の評価は、それらの信頼度関数により表現されるが、経験分布関数から故障時間（非信頼度）、信頼度を求めようとすれば現実的でないほど多くの、長期間にわたる試験データあるいは実測データが必要となる。しかしながら物理的考察などにより $F(t)$ の関数形が1個か2個の未知パラメータを含む形で知られている場合には、データの統計的処理により未知パラメータを決定して対象とする全期間の信頼度関数を与えることができる。即ちパラメータの値を同定できれば信頼性評価がある程度可能になるということである。ただ一般に寿命試験ではそのデータがでるまで分布形が分からないのが普通であり、それ以前に特定の分布形を少数のデータにあてはめると大きな誤差を許すことになる。

そこで分布形が未知の場合でも、データからその分布によい近似を与えると予想される分布をまず求めて、それについてのパラメータ推定を行なうことは良い結果を得る可能性が高いと考えられる。そのための手法として W. Weibull によって提唱されたワイブル分布は、主に疲労破壊、真空管の故障等を記述するために用いられているが、この分布の故障率は時間に関し単調であり様々な故障形態に対応できるとされているので故障分布として最もよく利用される分布の一つとなっている。

前節で述べたように本論で扱うユニットに関しては故障分布が不明であるため、上述した特徴をもつワイブル分布を仮定して各ユニットの解析を行なうこととした。以下にワイブル分布を用いた累積ハザード法の手順と概要を述べる。

まず累積ハザード関数 $H(t)$ を以下のように定める。

$$\begin{aligned} H(t) &= \int_0^t \lambda(x) dx \\ &= \int_0^t \left[\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \{ r(t + \Delta t) - r(t) \} / n(t) \Delta t \right] dt \\ &\doteq \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{t/\Delta t} \{ r(t_i + \Delta t) - r(t_i) \} \Delta t / n(t_i) \Delta t \end{aligned}$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{t/\Delta t}{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} \{r(t_i + \Delta t) - r(t_i)\}} / n(t_i)$$

ただし $r(t)$: 時刻 t における故障数

$n(t)$: 時刻 t における残存数

ここで $r(t_i) = r_i$ とすると、 t_i から微小時間 Δt が経過するうちに故障が発生しなければ、 $r(t_i + \Delta t) = r(t_i)$ となり $r(t_i + \Delta t) - r(t_i) = 0$ となる。また t 時間経過した後に k 個故障したとすれば、

$$\{r(t_i + \Delta t) - r(t_i)\} / n(t_i) = 1 / n(t_i)$$

となる t_i が k 個あるはずである。今 $n_i = n(t_i)$ とすると、

$$H(t) = \sum_{i=1}^{k-1} 1 / n(t_i) = \sum_{i=1}^{k-1} 1 / n_i$$

として $H(t)$ を求める方法が累積ハザード法である。このことを図 2. 3(a) に示すようなデータが得られた場合を例として具体的に示す。

まずこのデータを図 2. 3(b) のように故障時間の短いものから順に並べかえる。ここではサンプル数が 5 個であるから

$$H(t_1) = 1 / n_1 = 1 / 5$$

・
・
・

$$H(t_4) = \sum_{i=1}^4 1 / n_i = 1/5 + 1/4 + 1/3 + 1/2 = 77/60$$

のように $H(t)$ が求まる。

次にワイブル型累積ハザード紙は、縦軸が $\ln H(t)$ 、横軸が $\ln t$ となっている両対数グラフで、前述した方法で求めた $H(t)$ をグラフ上に打点した場合その分布がワイブル分布に従うならばほぼ直線上にのることとなり、以下の式に示されるパラメータを定めることができる。

$$H(t) = \int_0^t \lambda(x) dx = t^m / t_0$$

$$\therefore \ln H(t) = \ln(t^m / t_0) = m \ln t - \ln t_0$$

また $\eta = t_0^{1/m}$ とすれば

$$\ln H(t) = m (\ln t - \ln \eta)$$

ここで

m : 形状パラメータ

故障分布の形状を示すパラメータで $m = 1$ のとき指数分布、 $m = 4$ のとき正規分布に近似できるとされている。

t_0 : 尺度パラメータ

寿命を表わすパラメータで、 $H(t) = t^m / t_0$ より $t = 1 / H(t)$ となるからデータにあてはめた直線が $t = 1$ の縦軸と交わる点の $\ln H(t) = 0$ の値から求める。

η : 位置パラメータ

時間を表わすパラメータでデータにあてはめた直線が $\ln H(t) = 0$ の横軸と交わる点の t の値で与えられる。

以上のパラメータから対象とする機器の M T T F が

$$M T T F = t_0 = \eta^m$$

で与えられることになる。

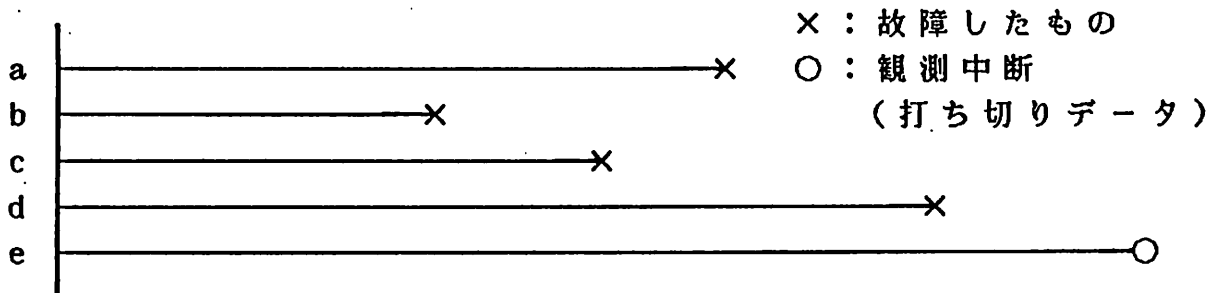


図 2. 3 (a) 実測データ

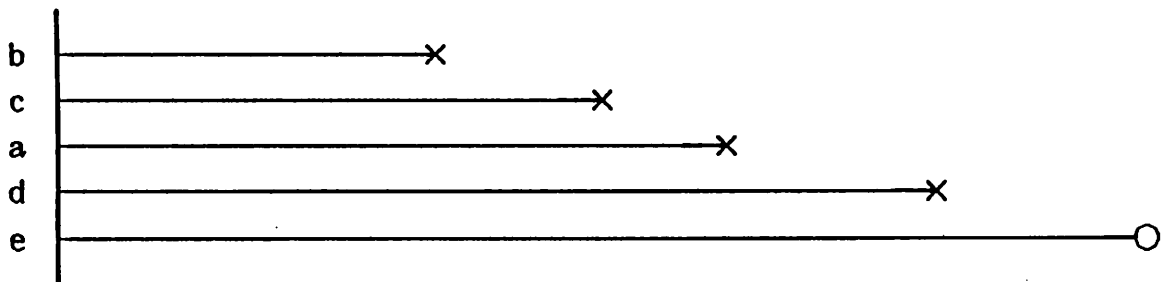


図 2. 3 (b) 整理されたデータ

2. 3 解析結果

各ユニットの故障時間についての度数分布図と、本章1節で一例を示した防火扉の点検データを竣工から2,800日間の時間打ち切りデータとして処理しワイブル型累積ハザード紙へのプロット結果を示したものが図2.4～図2.6である。累積ハザード紙から得られたそれぞれのパラメータと平均故障時間を表2.3に示す。

表2.3中故障モードA・Bは扉枠・本体の変形損傷・閉鎖トルクの不足に対応しており、Fは磁着解放装置の不良に、G・Iは煙感知器・連動制御器の不良に対応したものである。それぞれの m の値からA・B、G・Iに関しては故障率増加型の特性が、Fに関しては故障率減少型の特性が読み取れる。扉枠・本体の故障メカニズムとしては、扉の自重による回転軸の傾斜、ヒンジ部分の劣化といった経時的劣化特性と周辺環境から与えられる不規則な機械的ストレスの結合したものが考えられるので、ここで得られた m の値には十分妥当性があるといえる。しかしG・Iに関しては電子部品の劣化、配線の腐食等が故障原因と考えられるが、累積ハザード紙へのプロット結果からも分かるように非常に偏ったデータが含まれていること、一般的に主に電子部品からなるような機器の故障は正規分布に従う傾向が強いといわれていることからここで推定されたパラメータに若干の疑問が残る。磁着・解放装置の故障モードであるFは故障率減少型の特性を示した。これは、故障メカニズムがA・Bと同じくある定常的な劣化特性と不規則な機械的ストレスによって規定される故障率増加型の特性を示すであろうとの当初の推定に反していたが、人間の誤操作による故障発生が慣れにより減少するためと考えられる。このことは現場のメンテナンス責任者の言葉によっても確かめられている。

第四章で提案する点検・保全モデルへの適用を考慮して、ここで得られた結果を以下のように整理した。

- (1) 扉枠・本体のように常に不安定な機械的ストレスを支配的に受けると考えられるユニットは故障発生がランダムであると推定されること、及びデバッグを完了した後かなり長い有用寿命期間をもつ機器は故障率が時間に関して一定とみなしてもよいことの二点から故障率 λ が一定の指数分布

を仮定した。その場合の故障時間密度関数 (p. d. f) は、

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$$

と表わされ、 $\lambda = 1/6,200$ (MTBF = 6,200 日) とした。

- (2) 煙感知器・連動制御器は解析の結果からは指数分布を仮定してもよいと考えられるが、安定した電氣的ストレスを支配的に受ける機器の故障時間は主に劣化特性に規定されて固有の寿命特性で決まってしまうことから故障時点をかなり確定的に定め得る正規分布を仮定してもよいこと、さらに複数ユニットからなるシステムの解析に汎用性をもたせるためには異種の分布形を導入したいとの立場からここでは正規分布を仮定した。その p. d. f は

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

と表わされ、パラメータの値は $\mu = 2,200$ 日 (MTBF)、 $\sigma = 660$ 日とした。この場合故障時間として負の値が仮定されることになるが、この時の t の値は $\mu - 3\sigma$ より小さく、 $f(t)$ の値が十分小さくなるため實際上故障時間分布として用いることができると考えられる。また μ 、 σ の値が表 2. 3 に比べかなり小さくなっているが、この値は正規分布を仮定したことによって図 2. 6 の度数分布から故障発生だけに関して求めたものである。

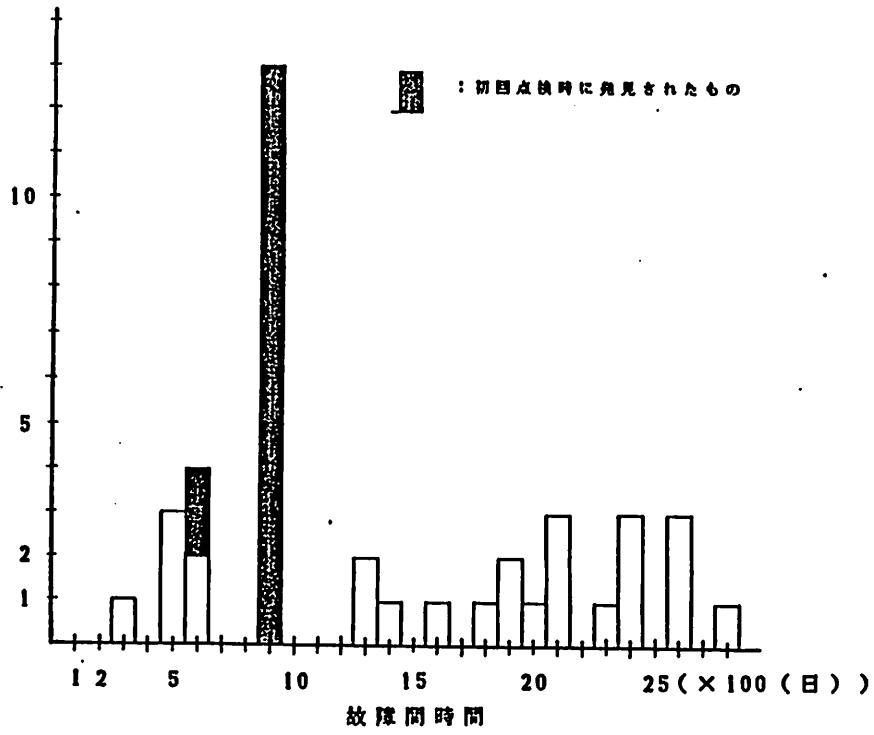
- (3) 磁着・解放装置に関して得られた結果とヒアリング調査の結果は、点検・保全活動に関して、特に事前保全を導入する場合にこのユニットを考慮することが無意味であることを示しており、第四章以降で論ずるモデルでは除外することとした。

上記の結果より、以降本論文において取り扱うシステムは [煙感知器・連動制御器] - [扉枠・本体] の 2 ユニット直列システムを構成するものとしての煙感知器連動防火扉とする。

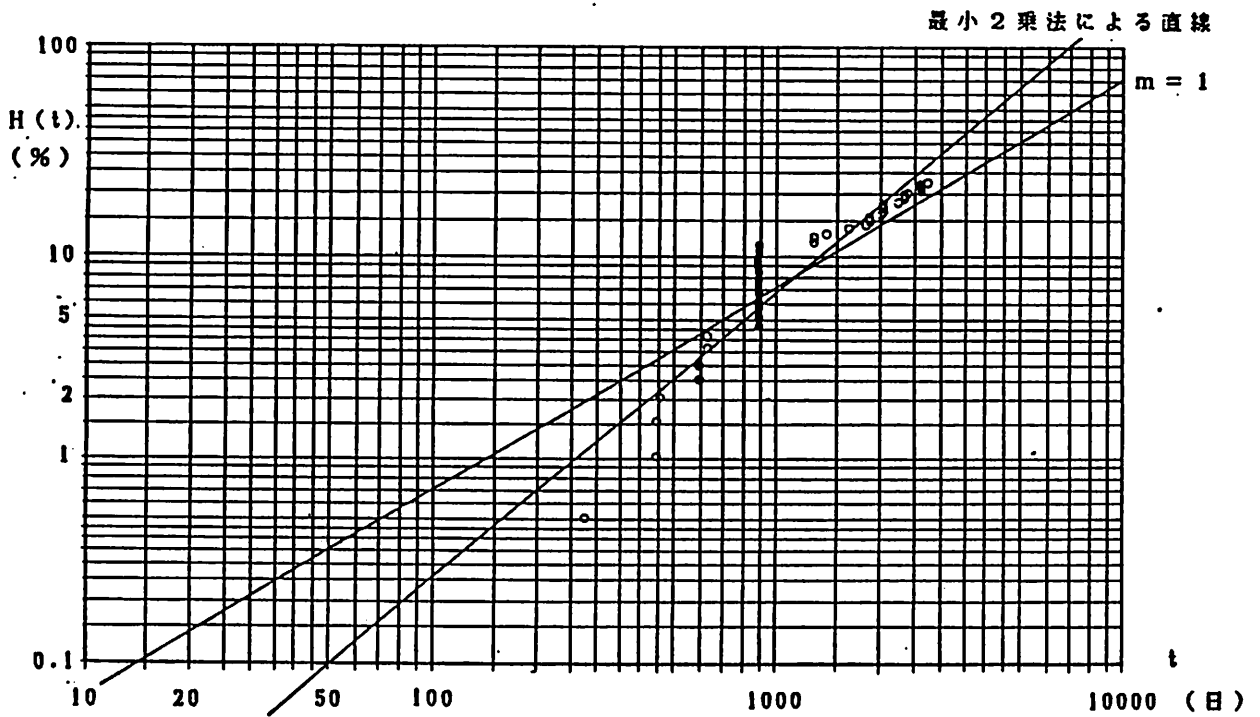
表 2. 3 ワイブル形累積ハザード紙による解析結果

故障モード	m	η	平均故障時間 (MTTF) (日)	標準偏差 (日)
A、B	1.41	6,832	6,224	4,468
F	0.82	29,986	33,584	41,681
G、I	1.30	19,354	17,883	13,877
E	4.28	3,955	3,603	937
H	0.67	14,098	18,609	28,478

相対度数
($\times 1/198$)



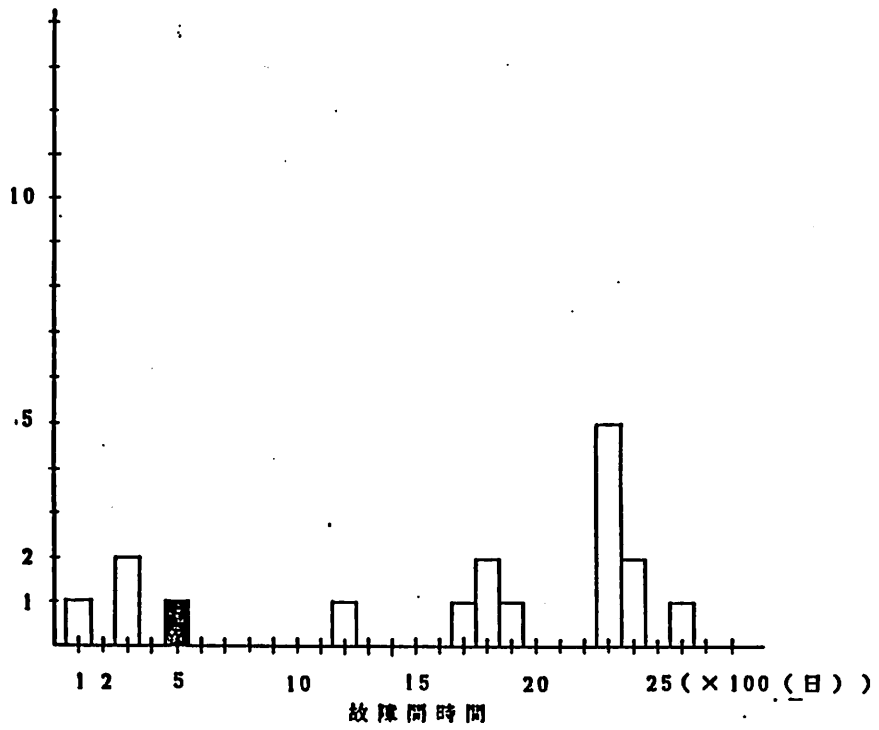
故障間時間の度数分布



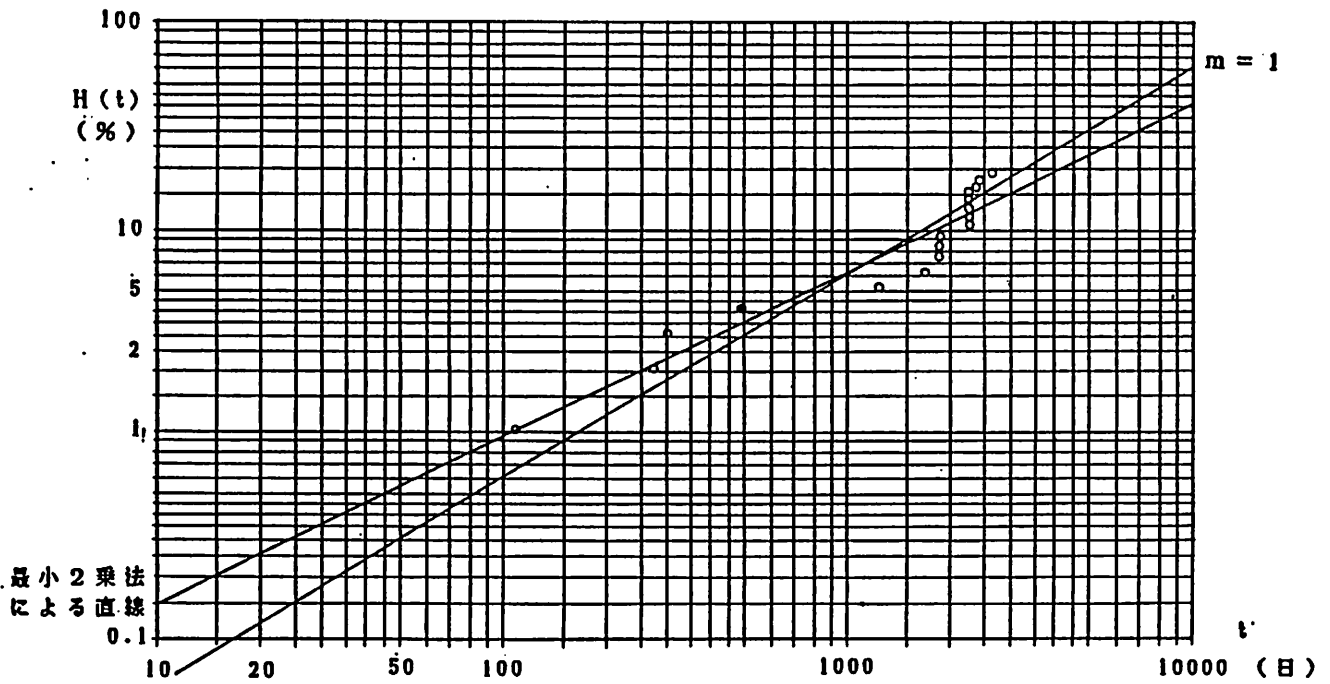
ワイブル形累積ハザード紙へのプロット

図2. 4 扉・枠部分の不良 (変形損傷、閉鎖トルクの不足)

相対度数
($\times 1/99$)

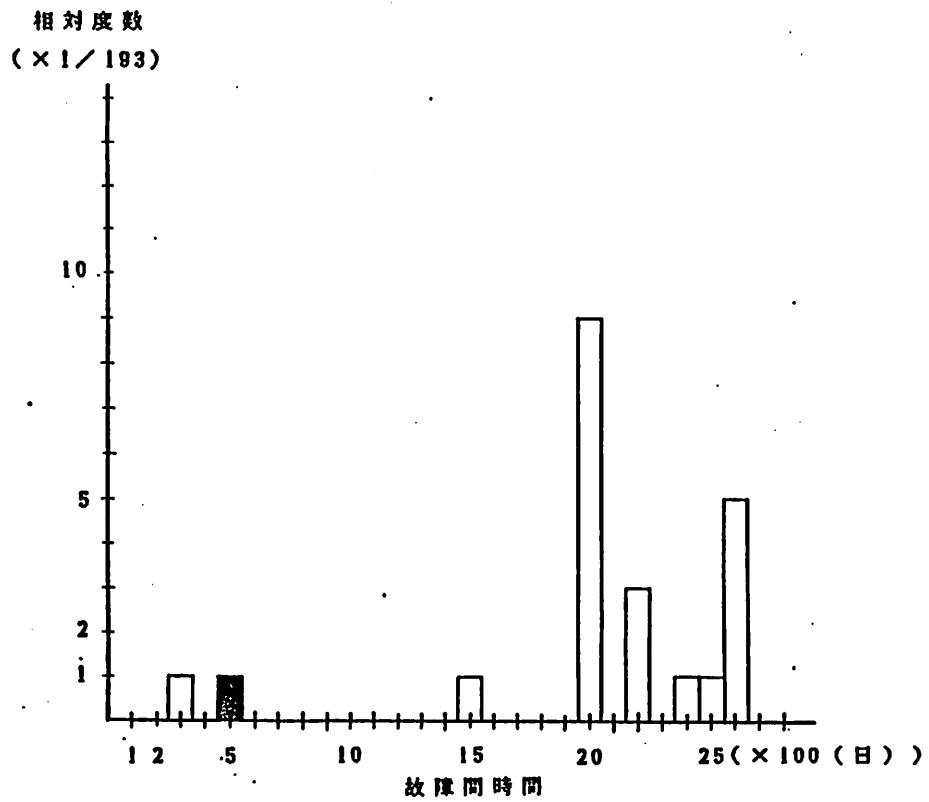


故障間時間の度数分布

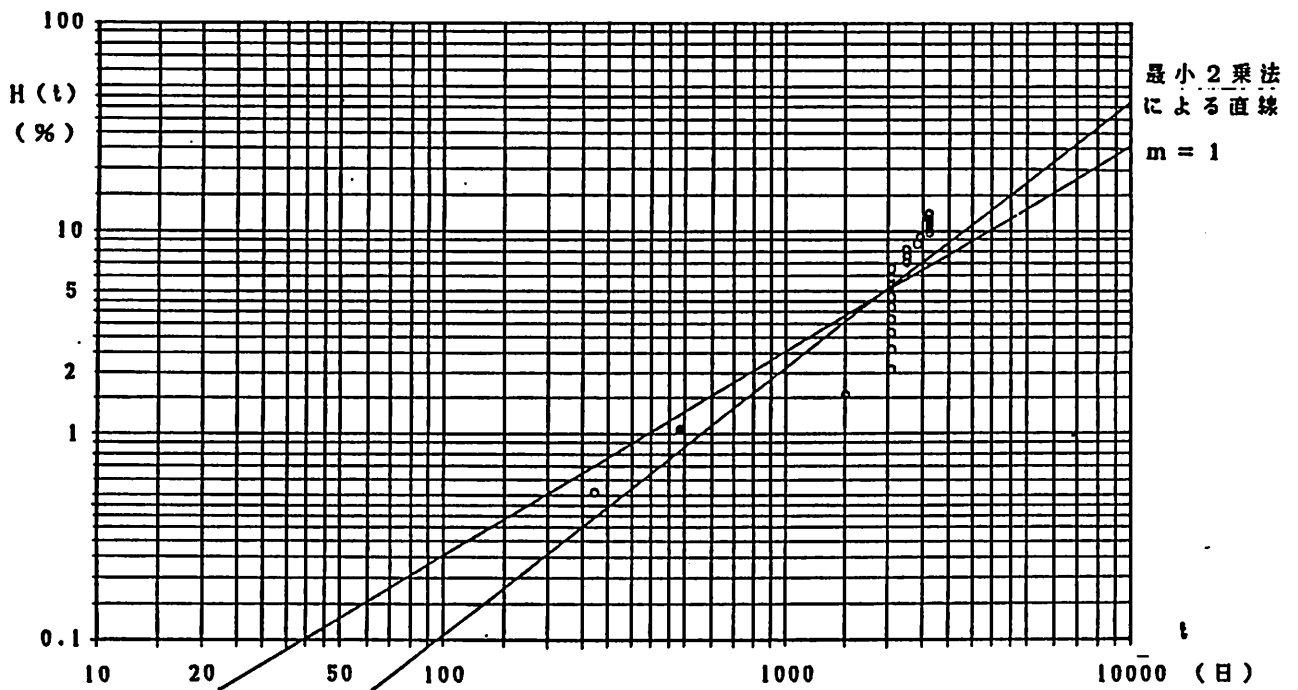


ワイブル形累積ハザード紙へのプロット

図 2. 5 磁着・解放装置の不良



故障間時間の度数分布



ワイブル形累積ハザード紙へのプロット

図 2. 6 連動制御盤・煙感知器の不良

第三章 点検・保全方策

3. 1 システムの信頼性と保全性

一般に複数の部品より構成される機器、装置を総称してシステムとよび、その構成部品をユニットとよぶが、各ユニットに修理、取り替えがなされない場合のユニットの信頼性とシステムの信頼性の関係は信頼性解析の基礎となるものでありそれを把握しておくことは重要なことである。そこで本章では前章で述べたような理由から直列システムを扱うのでその信頼性解析に必要な基本的関数を幾つか挙げると共に保全性の基本的解説をする。

直列システムとは、システムを構成するユニットのどのユニットが故障してもシステムとして故障しているとみなされるもので、ユニットの総数を n とするとシステムの信頼度は t 時間作動し続ける確率として、

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

で与えられる。またシステムのMTTF（平均故障時間）は上式を0から ∞ まで積分したもので与えられるが、 $F_i(t)$ （故障時間分布）が指数分布、すなわち故障率関数 $\lambda_i(t) = \lambda_i$ の場合には

$$T = \int_0^{\infty} R(t) dt = 1 / \sum_{i=1}^n (1 / T_i)$$

となる。とくに $T_1 = T_2 = \dots = T_n = T_0$ の場合には

$$T = T_0 / n$$

となる。

信頼度がシステムの故障の起こり方を表わす一つの指標であるのに対して、故障したシステムが正常な作動状態への復帰のしやすさを表わすものが保全性であり、それを定量的に表わしたものが保全度である。これは、「修理可能な系、機器または部品などが規定の条件において、保全が実施されるとき規定の時間内に保全が終了する確率」と定義されている。そこで、信頼度、保全度の両方を含んだシステム評価のために以下の諸量が定義されている。

・信頼度 $R(t)$: システムが規定の時間 t 故障せずに作動する確率

- ・ 瞬時アベイラビリティ：ある時刻 t でシステムが作動状態にある確率
- ・ 定常アベイラビリティ：長時間システムを使用したときの単位時間あたりの作動時間の期待値

以下、再生過程とよばれる保全に要する時間を無視しうる場合の単一ユニット・システムにおいて種々の信頼性に関する特性量を説明する。

[再生過程]

ユニット（システム）は故障すれば直ちに同じ故障時間分布 $F(t)$ をもつ新しいユニットと取り替えられるものとし取り替えに要する時間は無視しうるものとする。この場合、主たる問題は取り替え、或いは故障回数を評価することである。時刻 0 でユニットが作動を開始したときの時刻 t までの、すなわち $(0, t]$ 間の故障の回数を $N(t)$ とすると確率過程 $\{N(t); t \geq 0\}$ は再生時間分布 $F(t)$ をもつ再生過程とよばれる。

[故障回数、故障時刻分布]

X_i を i 回目に使用されるユニットの故障時間を表わす確率変数とする。 X_i はすべての i に対し同じ確率分布 $F(t)$ をもっている。 S_n を n 回目の故障の時刻を表わす確率変数とする。

$$S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

と表わされ、各 X_i は独立であるので、

$$\Pr\{S_n \leq t\} = F^{(n)}(t)$$

となる。ここで $F^{(n)}(t)$ は $F(t)$ 自身の n 重たたみこみであり、

$$F^{(1)}(t) = F(t)$$

$$F^{(n)}(t) = F(t) * F^{(n-1)}(t) = \int_0^t F^{(n-1)}(t-x) dF(x)$$

で与えられる。

明かに $N(t) \geq n$ と、 $S_n \leq t$ とは同じ事象であるので、

$$\begin{aligned} \Pr\{N(t) = n\} &= \Pr\{N(t) \geq n\} - \Pr\{N(t) \geq n+1\} \\ &= \Pr\{S_n \leq t\} - \Pr\{S_{n+1} \leq t\} \\ &= F^{(n)}(t) - F^{(n+1)}(t) \end{aligned} \quad \dots (3.1)$$

となる。ただし $F^{(0)}(t) = 1$ とする。 $N(t)$ の分布は式 (3. 1) を用いて n について順次計算することによって求まる。

[再生関数]

$N(t)$ の期待値 $M(t) \equiv E [N(t)]$ を再生関数とよび次のように与えられる。

$$M(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n \Pr\{N(t) = n\} = \sum_{n=1}^{\infty} n \{F^{(n)}(t) - F^{(n+1)}(t)\}$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} F^{(n)}(t) \quad \dots \dots (3. 2)$$

ここで $F(t)$ が密度関数 $f(t)$ をもつとして $M(t)$ を t で微分したものを $m(t)$ とすると、

$$m(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f^{(n)}(t)$$

となる。また

$$f^{(1)}(t) = f(t)$$

$$f^{(n)}(t) = \int_0^t f^{(n-1)}(t-x) f(x) dx$$

であり、 $m(t) dt$ は t と $t + dt$ の間で (何回目でもよいから) 故障が生ずる確率を示しており、 $m(t)$ は再生密度とよばれる。

[アベイラビリティ]

ここでは保全時間が無視できないものとして、故障率 λ の他に保全率 μ を与えた場合の瞬時アベイラビリティ、定常アベイラビリティを示す。

$$A(t) = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} \exp \{ - (\lambda + \mu) t \}$$

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{1 / \lambda}{1 / \lambda + 1 / \mu}$$

一方、保全に要する時間が非常に小さい、即ち保全率 $\mu \rightarrow \infty$ とすると

$$\lim_{\mu \rightarrow \infty} A(t) = \lim_{\mu \rightarrow \infty} A = 1$$

となり、瞬時アベイラビリティ、定常アベイラビリティの区別が、保全時間が無視し得ないほど大きい場合にだけ生ずることが示される。

[総動作時間、保全時間]

故障時間分布 $F(t)$ の他に保全時間分布 $G(t)$ を考慮した場合の時刻 t までの総動作時間 $U(t)$ 、保全時間 $D(t)$ を示す。

$$\Pr\{U(t) \leq x\} = \sum_{n=0}^{\infty} \{G^{(n)}(t-x) - G^{(n+1)}(t-x)\} F^{(n)}(x) \dots \dots (3.3)$$

$$\Pr\{D(t) \leq x\} = \Pr\{t-x \leq U(t)\} = 1 - \Pr\{U(t) < t-x\} \\ = \sum_{n=0}^{\infty} \{F^{(n)}(t-x) - F^{(n+1)}(t-x)\} G^{(n)}(x) \dots \dots (3.4)$$

式(3.3)、(3.4)から実際に $U(t)$ 、 $D(t)$ の分布を計算するのは容易ではないが、特に $F(t)$ 、 $G(t)$ が共に指数分布である場合 $U(t)$ は

$$\Pr\{U(t) \leq x\} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\{\mu(t-x)\}^n}{n!} \exp\{-\mu(t-x)\} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{(\lambda x)^k}{k!} \exp(-\lambda x)$$

で与えられる。

そこで次に、本論で扱うユニット・システムに関して仮定された分布と、データ解析から得られたパラメータを用いて、[再生関数] (=期待故障回数) に関して特に指数分布が仮定されたユニットを対象に算出例を示す。上式中保全度関数が組み込まれたものは、現在対象としているシステムの保全度が明確に定義できないため解を求めることが不可能である。

【算出例】 - 再生関数 -

扉枠・本体は $\lambda (=1/6,200)$ 一定の指数分布が仮定されていたので、

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

となる。この場合 $F(t)$ のラプラス-スチエルチェス(LS)変換 $F(s)$ は

$$\widehat{F}(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) dF(t) = \frac{\lambda}{s + \lambda} \quad \dots (3.5)$$

となる。また式(3.2)から

$$M(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^{(n)}(t)$$

よりそのLS変換は

$$\widehat{M}(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \{\widehat{F}(s)\}^n = \frac{\widehat{F}(s)}{1 - \widehat{F}(s)}$$

となり、ここに式(3.5)を代入すると

$$\widehat{M}(s) = \frac{\lambda}{s} \quad \dots (3.6)$$

が得られる。式(3.6)を逆変換するとその原函数M(t)は

$$M(t) = \lambda t$$

と与えられる。

このような形で再生関数(=期待故障回数)M(t)が得られるということは、分布関数とそのパラメータが同定できれば指数分布の場合容易に故障回数が評価できることを示しており、対象とする稼働期間が決まっていれば動作時間率(アップタイムレシオ)の下限値を与えることで点検間隔の解の1つが得られることになる。

3. 2 最適予防保全方策

3. 1ではユニットあるいはシステムの故障時にだけ保全が行なわれる場合（事後保全）についての基本事項にふれてきたが、保全は故障時のみに行なわれるばかりでなく、故障の発生を未然に防ぐため（予防保全）にも行なわれる。予防保全には、清掃、注油等の日常的に行なわれるものから部分修理、部品交換、システム交換等計画的に行なわれるものまで、システムをより高い効率で使用するための作業を全て指している。ここでは特に新品との取り替え、オーバーホールなど予防保全によりシステムが新品同様になるとみなせる場合についての基本的な予防保全方策に関して説明する。

予防保全には大きく分けて時間計画保全と状態監視保全がある。時間計画保全は、システムの内部状態、例えばシステム故障とはみなされない程度の部分故障とか摩耗による機能の低下などにはまったく無関係に立てられた時間的な計画によって行なわれるものである。従ってこの場合は、システムの状態としては、動作しているか、故障しているかの2つの状態だけが区別されることになり、保全計画はシステムの故障時間分布と動作時間に基づいて立てられることになる。一方、状態監視保全は常時、或いは予め定められた時刻でシステムの機能に関する何らかの特性値を監視し、それが異常、危険と規定された領域内に観測されたときに保全を行なうものである。

しかしながら、時間計画保全はその基本的仮定として、ユニットの故障は連続的な監視によって常時直ちに発見できるものとしているため、本論文で扱うような断続的な点検によってしか故障を発見できないシステムに直接には適用できない。従ってここでは最適点検間隔を設定するための手法の一つとして時間点検の手法をとりあげ説明するに留める。また状態監視保全に関しては、現在のところ本論文で扱うシステムの状態を明確に判別する理論も実測データもないことからこれはその概要を述べるだけとする。

3.2.1 時間点検

点検することによってはじめて故障が発見できるような点検方式を扱った時間点検は現行の定期点検制度と類似のものであり、その場合に重要な問題の1つは点検・保全に要するコストと故障放置による被害の期待値とを含めた総合的なコストを最小にするような点検間隔の設定である。以下に単一ユニット・システムの場合についての理論解の求め方を示す。

(1) 指数分布の場合

指数分布の無記憶性から、点検時点で故障が発見されなければユニットは使用初期状態と同じであると考えられるので、次の点検時点は過去の使用時間に無関係に定められる。従って常に一定間隔で点検すればよいことになり、その間隔を T 、点検・保全に時間はかからずそのコストをそれぞれ c_i 、 c_r 、故障放置による単位時間当たりの損失を c_d とし、保全（事後保全、或いは事後修復）から保全までを1サイクルと考えると、1サイクル当たりの期待コストは、

$$\begin{aligned}
 & c_r + \sum_{n=0}^{\infty} \int_{nT}^{(n+1)T} [c_i(n+1) + c_d\{(n+1)T - t\}] \lambda \exp(-\lambda t) dt \\
 & = c_r + c_i \frac{1}{1 - \exp(-\lambda T)} + c_d \left\{ \frac{T}{1 - \exp(-\lambda T)} - \frac{1}{\lambda} \right\} \\
 & \dots \dots (3.7)
 \end{aligned}$$

で与えられ、1サイクルの期待時間は

$$\sum_{n=0}^{\infty} nT \int_{nT}^{(n+1)T} \lambda \exp(-\lambda t) dt = \frac{T}{1 - \exp(-\lambda T)} \dots \dots (3.8)$$

となる。ここで長時間における単位時間当たりの期待コスト $C(T)$ は式(3.7)と(3.8)の比で与えられ、

$$C(T) = c_d + \frac{c_i + (c_r - c_d/\lambda)\{1 - \exp(-\lambda T)\}}{T}$$

となる。 $C(T)$ を T に関して微分しそれを0とおくと

$$(c_d - \lambda c_r)(1 + \lambda T) \exp(-\lambda T) = c_d - \lambda c_r - \lambda c_i \dots \dots (3.9)$$

が得られる。式(3.9)をみたす最適な T を T^* とすると

(i) $c_d \leq \lambda(c_r + c_i)$ のとき $T^* = \infty$

(ii) $c_d > \lambda(c_r + c_i)$ のときは T^* は有限であり、式(3.9)の解として一意に定まる。

また T^* で与えられるコストは

(i) の場合 $\dots C(T^*) = c_d$

(ii) の場合 $\dots C(T^*) = c_d - (c_d - \lambda c_r) \exp(-\lambda T^*)$

となる。

一例として指数分布が仮定されたユニット(扉枠・本体)に関して、第二章で推定されたパラメータとここで仮定するコストで計算する。

まず点検・保全に要する費用をそれぞれ2、15とし、7,200日間(約20年間)に必ず1回だけ火災が発生するとして防火扉の故障放置がもたらす被害を300とする。この場合単位時間を1日とすると単位時間当たりの損失は300/7,200となる。また λ は1/6,200であり、これらの値を式(3.9)に代入すると、

$$T^* = 580 \text{ 日}$$

と求まる。

(2) 一般分布の場合

ユニットの故障時間が一般分布の場合、特に時間とともに劣化するもの(IFR、IFRA等)に対しては、時間とともにしだいに故障しやすくなるわけであるから、点検間隔は順次小さくしておくべきであると考えられる。そこで故障が発見されるまでの期待コストを最小にするという意味で最適な点検時刻列の決定を論ずる。

今点検時刻を $0 = X_0 < X_1 < X_2 < \dots$ とするとコスト C は

$$C = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} \{c_i(k+1) + c_d(x_{k+1} - t)\} dF(t)$$

与えられ、 $F(t)$ が密度関数 $f(t)$ をもつとして、上式を x_k で偏微分して0とおくと

$$x_{k+1} - x_k = \frac{F(x_k) - F(x_{k-1})}{f(x_k)} - \frac{c_i}{c_d} \quad k=1, 2, \dots$$

となる。これをもって最適な x_k の列 $\{x_k\}$ を定めるのは一般に困難であり、定性的な面から以下のことが示されるにすぎない。

(i)もし $f(t)$ が P F 2 (Pólya frequency function of order 2) をとるならば、最適な $\{x_k\}$ においては $x_{k+1} - x_k$ は k に関し非増加となり、最適点検間隔はユニットの年齢の増加に伴い小さくなる。

(ii)もし、 $t \geq T$ に対し $F(t) = 1$ 、即ち時間 T 以内に必ず故障する場合には、少なくとも時刻 T では点検しなければならない。

3.2.2 状態監視保全

前節で取り上げた時間点検においては、ユニット或いはシステムは、その状態が動作状態と故障状態だけが仮定され、システムの信頼性に関する特性量は年齢と故障時間分布だけが考慮されており保全方策もこれらの量だけに基づいてたてられた。それに対して状態監視保全ではシステムの動作状態をもう少し詳しくみて、例えば、十分正常に機能している状態、故障とはみなされないが異常の発生している状態など、故障に至るまでの中間的な状態を考慮した保全（取り替え）方策を考えている。

いま n 個の同一のユニットからなる並列システムを考え、システムの状態を故障ユニットの数に対応させると、システムは $n + 1$ 個の状態をとることになる。状態 0 は正常な状態、1、2、 \dots 、 $n - 1$ はシステムとしては劣化している状態、 n は故障状態とみなせる。各ユニットは独立に故障し、故障時間は指数分布に従うとすれば、このシステムの故障時間分布は $\{1 - \exp(-\lambda t)\}^n$ で与えられるが、これは IFR であることは容易に分かる。また n ユニット冷予備システムは各ユニットが指数分布で故障する場合は、その故障時間はガンマ分布をしており、これも IFR (increasing failure rate) となる。従ってこのようなシステムの保全において、システムの情報としてその動作時間（年齢）だけを採用すれば、前節に述べた時間点検方策も十分な意味をもっている。しかしながら、年齢取り替え（一定時間間隔でユニット全てを取り替える保全方策）を考えると予防取り替え時刻においても n 個全てのユニットが動作している場合もあり、そのときにはシステムは新品同様なので（指数分布の無記憶性）取り替えを行なう必要はない。

このように、もし状態の観測、識別が可能ならば保全方策は年齢だけでなく状態にも依存した形で、またもし常時システムの状態変化が観察し得るならば状態にだけ依存した形で決めるべきであろうことを意味している。このような状況を反映しているモデルの一つがマルコフ的劣化モデルである。これはシステムを一般に、その機能の劣化の程度、損傷の軽重などによりいくつかの状態に分類し、観察された状態をみて予防的に保全を行なうか、行なわずにもう少し様子を見るかなどを決定するものである。このモデルはシステムに関する

情報をより利用している点で時間計画保全よりすぐれていると思われるが、先にも述べたように実際への応用という点では次のような欠点をもっている。即ち、システム状態の決定が通常は困難となる、観測による状態の識別に大きな費用を要することが多くそれが必ずしも正確であるとはいえない、特に状態の推移は多くのパラメータに依存するため推移確率等の推定が困難となる、保全計画は確率的に推移する状態に依存しているので予防保全の時期が不定期に生ずることとなり前もって保全計画を立てにくい、等である。

第四章 システムの同定と 点検・保全モデル

4. 1 システムの構造

本論中ここまで使用されてきた信頼性用語の多くは、品質管理 J I S 用語等によって厳密に定義されている専門用語である。本節の主旨はそれらの用語の定義をいくつか列挙し、本論で扱うシステムの状態がそれらの用語を定義している概念からどのように構成されているかを示すこと、およびここで扱うシステムの状態を関数系を用いて簡潔に表現することである。

まず信頼性用語のうち、本論で定義し扱うシステム状態推移の時間内訳に密接に関連している用語の定義を示す。

① アベイラブル・タイム (Available Time)

使用しうる時間から予防保全の時間を差し引いた時間

② ダウンタイム (Down Time)

機能不良のため機器が有効な動作をすることのできない時間。これはアクティブ修理時間、補給時間、予防保全時間および監理時間からなる。

③ 監査時間 (Administrative Time)

アクティブ修理時間および補給時間を除外したダウンタイムの部分。必要な監査時間（例えば点検に要する時間）ならびに不必要なむだ時間（例えば故障した後それが発見されるまでの時間）を含む。

④ 補給時間 (Logistic Time)

ダウンタイムのうち、システムの部分品や取り換え部品の到着を待つために修理がおくれる時間部分。

⑤ アクティブ修理時間 (Active Repair Time)

ダウンタイムのうち、修理のためシステムにおいて一人あるいはそれ以上の技術者が実際に働いている時間部分。

第二章でのデータ解析および本論全体を通して考察しようとしている点検・保全方策において、上記の時間部分それぞれの関係と、そのうちのダウンタ

イムの内訳を図4. 1に示す。

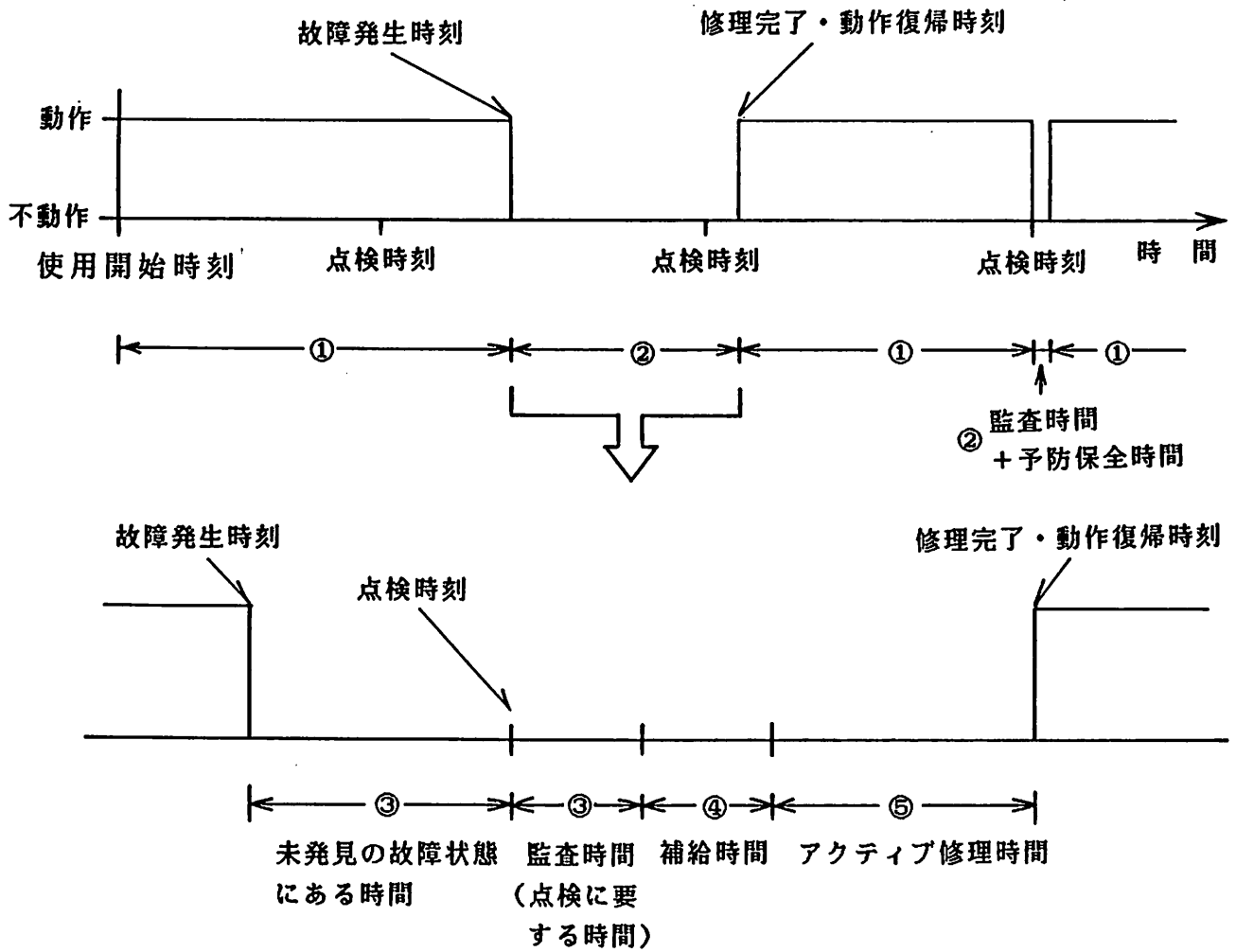


図4. 1 点検・保全活動に関する時間内訳の詳細

信頼性理論において、ある時刻まで機器が作動しうる確率を表現するものとして信頼度が用いられることは第三章において述べたが、機器が作動し続ける時間や保全に要する時間といったものもまたシステム評価の指標の一つとして広範に用いられているものである。そこで評価される時間としては例えば、機器の使用開始から故障するまでの時間の平均値 MTTF（平均故障時間）、或いは故障・修復を繰り返しながら使用するような場合の各故障間の使用可能平均時間 MTBF（平均故障間隔）、さらに保全に要する平均時間である MTTR 等が代表的なものである。

これらの時間を上図から求めると、

MTTF = 「使用開始時刻」から最初の「故障発生時刻」までの時間

MTBF = ①の時間の平均値

MTTR = ②の時間の平均値

で与えられるが、これらの時間から得られる

$$U = \frac{\text{MTBF(or MTTF)}}{\text{MTBF(or MTTF)} + \text{MTTR}}$$

は時間アベイラビリティ、Incommission Rate、Uptime Ratio と呼ばれる指標を表している。ここで、もしも修復（=保全、修理）活動というものが機器を完全に使用初期と同一の状態に戻しうるものならば、各故障は全て独立の事象と考えられるので MTTF と MTBF は一致することになる。

そこで、一般の機器を対象とするような信頼性理論においては、上図に示した各時間部分に妥当と考えられる分布とその推定パラメータが与えられ解析される。しかしながら本論で扱うような防災設備に関しては、現在のところ④補給時間、⑤修理時間に関して明確な所要時間あるいは分布形が与えられていないわけではない。また「第二章. 故障データ」でみたように、防火戸は建物の耐用年数に匹敵するほど長い供用期間をもち、その間に有限回の点検期間をもつのが普通である。もしも上記③のうちの点検に要する時間および④、⑤ならびに予防保全に要する時間が一つの点検間隔に比してかなり小さい値をとるのであれば、ダウンタイムと考えられる時間においてそれらの時間は實際上無視しうると考えられる。その結果、数百日毎の点検体制が通常とられるような防災設備に関する作動信頼性解析に最も大きな意味をもつ時間は、①のアベイラ

ブル・タイム (=アップタイム) と③のうちの「未発見の故障状態にある時間」(キダウンタイム) の二つであるとみなしてさしつかえない。従って全供用時間とそこから②の時間を引いた時間すなわち①の時間との比をここではアップタイムレシオと考え、その値を評価することが必要かつ十分であると考えている。

第二章の故障データ解析において採択された仮定も上述した考えに基づいたものであったが、本章以降でとりあつかう点検・保全モデルに対する仮定も同様な考えに基づいたものである。ただし、前章「点検・保全方策」においても述べたように、現状では状態観測理論が未確立であるので、本論ではシステムの状態判別を「正常」、「故障」の2状態だけで行なうこととしており、そのことは関数系で以下のように表現される。

まずここで扱うシステムは上述した2ユニットを最小単位とするコヒーレントシステムである。即ちユニットはこれ以上分割できないものと考えユニットの故障は即座にシステムの故障につながる。ここではユニット及びシステムは正常か故障かの2状態だけをとるものとする。このことを関数形で表現すると、ユニット i の状態を表現する変数として

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 \cdots \text{ユニット } i \text{ は正常} \\ 0 \cdots \text{ユニット } i \text{ は故障} \end{cases} \quad (i = 1, 2)$$

という2値変数が与えられる。また直列のコヒーレントシステムであることから、ユニットの状態が決まればシステムの状態は一意に定まるのでシステムの構造関数を ϕ とすると、

$$\phi = \begin{cases} 1 \cdots \text{システムは正常} \\ 0 \cdots \text{システムは故障} \end{cases}$$

と表わされるユニットと同様の2値変数を取り

$$\phi = \phi(\alpha)$$

という表現が可能である。ここで

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$$

である。

その時刻 t における故障確率はそれぞれのユニットの故障率の和であたえられ、

$$\text{Pr} \{ t + \Delta t, \phi = 0 \mid t, \phi = 1 \}$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\lambda + \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx} \right] \Delta t$$

と表現される。

このような状態推移特性をもつシステムとして次節以降煙感知器連動防火扉の点検モデルを提案していくこととする。

4. 2 点検・保全モデル

現在、一般建築設備（ボイラー、エレベーター、空調機器、配電設備等）や防災諸設備に対してその作動を確保するために定期的に検査・調整を行なう定期点検制度が推奨或いは義務付けられている。その特徴は

- (1) 固定された点検間隔
- (2) 点検時点における作動・故障の2状態だけの判別
- (3) 点検時点で故障であった場合のみの保全

の3点に要約できる。しかしながら日常使用される一般設備においては、使用することそのものが点検活動の一環として捉え得るのに対して、動作時点を予測できずまた動作時間も極めて短時間である特質をもつ防災設備の作動信頼性のある水準以上に維持しようとする場合、一般設備と同様な点検・保全体制が合理的なものであるかどうかには大きな疑問が生ずる。

即ち、現行点検・保全手法を防災設備に適用した場合以下のような問題が提起される。

- ・点検時点前後の状態推移にかかわらず、点検時点での作動・不作動だけを考慮するという方法では点検と点検の間の故障発生をより高い確率で許す可能性がある、
- ・予め決められる点検間隔（周期）が各設備の信頼度推移特性を考慮していない場合、それが防災設備の作動信頼度を許容水準に維持するに不適切なほど長期間となる可能性がある、
- ・システムを構成する全てのユニットを同等の特性をもつものと考えて同一時点にそれら全てを点検することは多くの無駄を産むとともに、それが原因で点検が確実に履行されない可能性がある、等々。

そこで本論では上述した現行点検手法の特徴のうち(1)と(3)に関して、それらをどのように変更することがより高い作動信頼性を約束するのかを明らかにするためにいくつかのモデルを提案し、表4. 1にまとめたような条件に従ってシミュレーションする。ただ点検・保全方策を論ずる場合、状態観測理論（故障診断技術）の確立が不可欠であるが、第三章に述べたように(2)に関して現状では確立された理論が無いため本論では取り扱わない。

4.2.1 現行点検手法とその改変手法

この手法においてはA（故障時間に指数分布が仮定された「扉枠・本体」）、B（故障時間に正規分布が仮定された「感知器・連動制御器」）両ユニットとも点検・修復対象となる。

まず点検間隔を200日、400日、800日に設定してシミュレーションを行なう。ここで設定された200日は概ね1年2回の点検を想定したものであるが、実際の定期点検データを観察すると2年以上の点検間隔をもつものもあり、400日、800日を設定することによって点検間隔の長短がシステムの稼働率（アップタイムレシオ）の変化に与える影響を調べる。

次に現行点検手法では点検時に故障が発見された場合に修復を行なうが、その改変手法としての改現行点検ではユニットB（「煙感知器・連動制御器」）の信頼度が点検時点において許容下限値（0.5、0.6、0.7、0.8）を下回る場合、完全に初期状態に戻し得るような予防保全をユニットBに行なうこととした。即ち、信頼度を考慮しかつ予防保全を取り入れた点検・保全方策の得失を明らかにしようとするものである。

但しここで許容下限値として与えた値は何らかの妥当性に基づいて決定したのではなく、第五章で行なった現行点検のシミュレーションより得られた信頼度の範囲から設定したものに過ぎない。次節以降で述べるモデル1、改モデル1、モデル2における許容下限値も全て同じものである。

4.2.2 モデル1とその改変手法

このモデルでは各点検時点において点検・修復を受けるユニットはA、Bの両ユニットのどちらか一方だけである。即ち各ユニットの信頼度を比較し、点検時点で信頼度の低いユニットが点検対象となり、点検の結果故障していれば修復される。また点検ユニットがBでありかつその信頼度が所与の信頼度下限値を下回る場合には予防保全を行なって初期の状態に戻すとしていることは先の改現行点検と同じである。但し予防保全決定の条件の与え方でモデル1とその改変手法である改モデル1とに分けている。モデル1においてはユニット

Aの信頼度を、故障が起きない限り連続した時間で算定して用いる。改モデル1では、ユニットAの故障分布として指数分布が仮定されていることより指数分布の無記憶性から、点検対象ユニットがAである場合には点検時点での故障の有無に関わらずそれ以降は再生過程をなすものと考えて、点検時点を使用開始時点として信頼度を算定して用いている。

この二つのモデルの点検・修復の条件を簡略に示すと、

【モデル1】

- $R_A > R_B \rightarrow$ ユニットBを点検
- $R_A < R_B \rightarrow$ ユニットAを点検
- $R_A = R_B \rightarrow$ 前回の点検時点での信頼度比較で決定
 - $R_A > R_B \rightarrow$ ユニットAを点検
 - $R_A < R_B \rightarrow$ ユニットBを点検
- 点検対象ユニットBの場合
 - $R_S < R_C$ あるいは $R_B < \sqrt{R_C} \rightarrow$ ユニットBに予防保全

【改モデル1】

- $R R_A > R_B \rightarrow$ ユニットBを点検
- $R R_A < R_B \rightarrow$ ユニットAを点検
- $R R_A = R_B \rightarrow$ 前回の点検時点での信頼度比較で決定
 - $R R_A > R_B \rightarrow$ ユニットAを点検
 - $R R_A < R_B \rightarrow$ ユニットBを点検
- 点検対象ユニットBの場合
 - $R_S < R_C$ あるいは $R_B < \sqrt{R_C} \rightarrow$ ユニットBに予防保全

但しここで

R_A 、 R_B : ユニットA、Bの信頼度

$R R_A$: ユニットAが点検された場合、その時点で $R R_A = 1$ として算定したユニットAの信頼度

R_S : システムの信頼度

R_C : 信頼度の許容下限値 (0.5, 0.6, 0.7, 0.8)

(ユニットBとの比較に $\sqrt{R_C}$ とあるのは2ユニット直列システムであることから $R_S = R_A * R_B$ となり、ユニット

A、ユニットBとも同水準の下限值を設定するために許容
 下限値の平方根をとったものである)

ここで明らかにしようとするのは、システムの信頼度をある一定値以上
 に維持しようとする場合の信頼度推移特性が異なるユニットの点検系列である。
 予防保全が考慮されないならば各ユニットの信頼度関数から点検系列は容易に
 推定し得るが、一方のユニットだけに予防保全を行なう場合そのプロフィールは
 相当変化することが予想される。ここで得られる結果は対象とするシステムの
 特性のうち時間に関して弱点となるユニットを明らかにすると考えられる。

4.2.3 モデル2

前二節の点検手法が固定した点検間隔をもっていたのに対して、本節で提
 案するモデルは点検間隔が可変のものである。但し各点検時点においてはA、
 B両ユニットとも点検・修復の対象となることは4.2.1の現行点検・改現行点
 検と同様である。またユニットBにだけ予防保全を行なうこととその決定条件
 は4.2.2の改モデル1と同様である。

このモデルの目的とするところは、システムを構成するユニットの信頼度
 関数が明確な形で与えられたならば、それを積極的に活用しより少ない点検・
 保全回数（即ちより少ないコスト）で高いシステム作動信頼度或いはシステム
 ・アップタイムレシオを達成しようとするのである。

今後、故障診断技術やそれを支える状態の検出技術がある程度の水準に至
 るならば、第三章で述べた状態監視保全への方向が可能となり、この種のモデ
 ルが最も合理性が高く総合的コスト（点検・保全コストや故障放置による火災
 被害の期待値等を含めたコスト）の低い方策となる可能性をもっていると考え
 られる。

以上述べた各点検・保全方策モデルのシミュレーション結果を次章に掲げ
 るが、点検・修復の条件一覧を表4.1に示す。

表4.1 シミュレーション条件一覧表

	点検間隔	点検する ユニット	点検ユニットを 選択する条件	予防保全 の有無	予防保全 実施条件
現行点検	定期	A and B	$\begin{matrix} < \\ > \\ = \end{matrix}$ RA RB	無	
改現行点検				有	RS, RB
モデル1		A or B		有	
改モデル1					RS, RA, RB
モデル2	不定期	A and B			

第五章 シミュレーション結果

5. 1 シミュレーションの目的

信頼性理論で与えられる故障時間分布関数 $F(t)$ 、信頼度関数 $R(t)$ 、平均故障時間 $MTTF$ 等に対する理論解は、故障率関数 $\lambda(t)$ 、故障時間密度関数 $f(t)$ が明確に与えられれば定性的な解析を可能にしている。しかしながら $\lambda(t)$ が一定で $f(t)$ が指数関数であるような場合を除き、一般分布が仮定されるとその計算は初等函数をもちいて解析的行なうことが不可能である。ここまでしばしば述べてきたように本論で扱うシステムは、指数分布を仮定したユニットと正規分布を仮定したユニットが直列に配置されたシステムであるため、これらのユニットの $p. d. f$ からシステムの信頼度、アップタイムレシオを計算する場合、点検・保全に時間を要しないこと、保全によって完全に使用初期状態に戻ること等計算を簡略にできる仮定を取り入れても解析的に解を求めることは非常に困難である。例えばここで仮定されたシステムに関して $MTTF$ を求めようとする

$$MTTF = \int_0^{\infty} \left[\int_t^{\infty} \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left\{ -\lambda x - \frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} dx \right] dt$$

を解くことが必要となる。

本論の目的とするところは、實際上ある程度長期間の間隔をもつ点検活動によってしか故障を発見し得ない防災設備のアップタイムレシオを向上させる点検・保全方策あるいはそのために最適と考えられる点検間隔を探ろうとするものである。その場合非常に長期の供用期間をもつという対象設備の性質上、アップタイムレシオを左右する最も大きな部分は故障発生から故障発見までの時間である。この時間の期待値をいわゆる紙と鉛筆だけで求めることは、上述した理由からほとんど不可能であり、計算機を利用した数値計算あるいはシミュレーションに頼ることになる。

以下本章で示すものは第四章で提案・説明した各モデルの各条件毎に30のシミュレーションを行なった結果である。これらのシミュレーションにおいて故障の発生という事象は、ユニットAとユニットBそれぞれに対して予め発

生させた [0 , 1] の一様乱数列と各ユニットの故障率とで決定している。なおシミュレーション期間は建物の平均的な社会的耐用年数を約 20 年と想定して 7,200 日間とした。

5. 2 現行・改現行点検手法

表5. 1は、現行点検手法をシミュレーションした結果のうち、各ユニットとシステムのアップタイムレシオ（表中UTR）、システム全体での修復回数を30のシミュレーションの平均値として点検間隔別に示したものである。また図5. 1は点検間隔200日におけるシステム信頼度の変化の様子と、ユニットA、ユニットB及びシステムの状態推移の一例を示したものである。

表5. 2、図5. 2 図5. 3は現行点検手法の結果と同じ形で改現行点検手法の結果をシステム信頼度許容下限値毎に示したものである。図5. 2は信頼度許容下限値0.5の場合、図5. 3は0.8の場合の例であり、そして表5. 2にも新たに、システム信頼度許容下限値の項を加え分類している。

表5. 1 現行点検手法による結果

点検間隔 (日)	ユニットAの UTR	ユニットBの UTR	システムの UTR	システムの 修復回数
200	0.9845	0.9636	0.9491	3.57
400	0.9669	0.9373	0.9058	3.47
800	0.9336	0.8821	0.8226	3.34

表5. 2 改現行点検手法による結果

点検間隔 (日)	システムの信頼度 許容下限値	ユニットAの UTR	ユニットBの UTR	システムの UTR	システムの 修復回数
200	0.5	0.9845	0.9854	0.9699	11.03
	0.6	〃	0.9921	0.9766	16.43
	0.7	〃	0.9938	0.9783	21.63
	0.8	〃	0.9976	0.9821	27.73
400	0.5	0.9669	0.9762	0.9431	8.90
	0.6	〃	0.9785	0.9454	10.00
	0.7	〃	0.9910	0.9579	12.27
	0.8	〃	0.9959	0.9628	15.17
800	0.5	0.9336	0.9396	0.8767	5.60
	0.6	〃	0.9522	0.8894	6.73
	0.7	〃	0.9887	0.9226	8.20
	0.8	〃	0.9897	0.9236	8.33

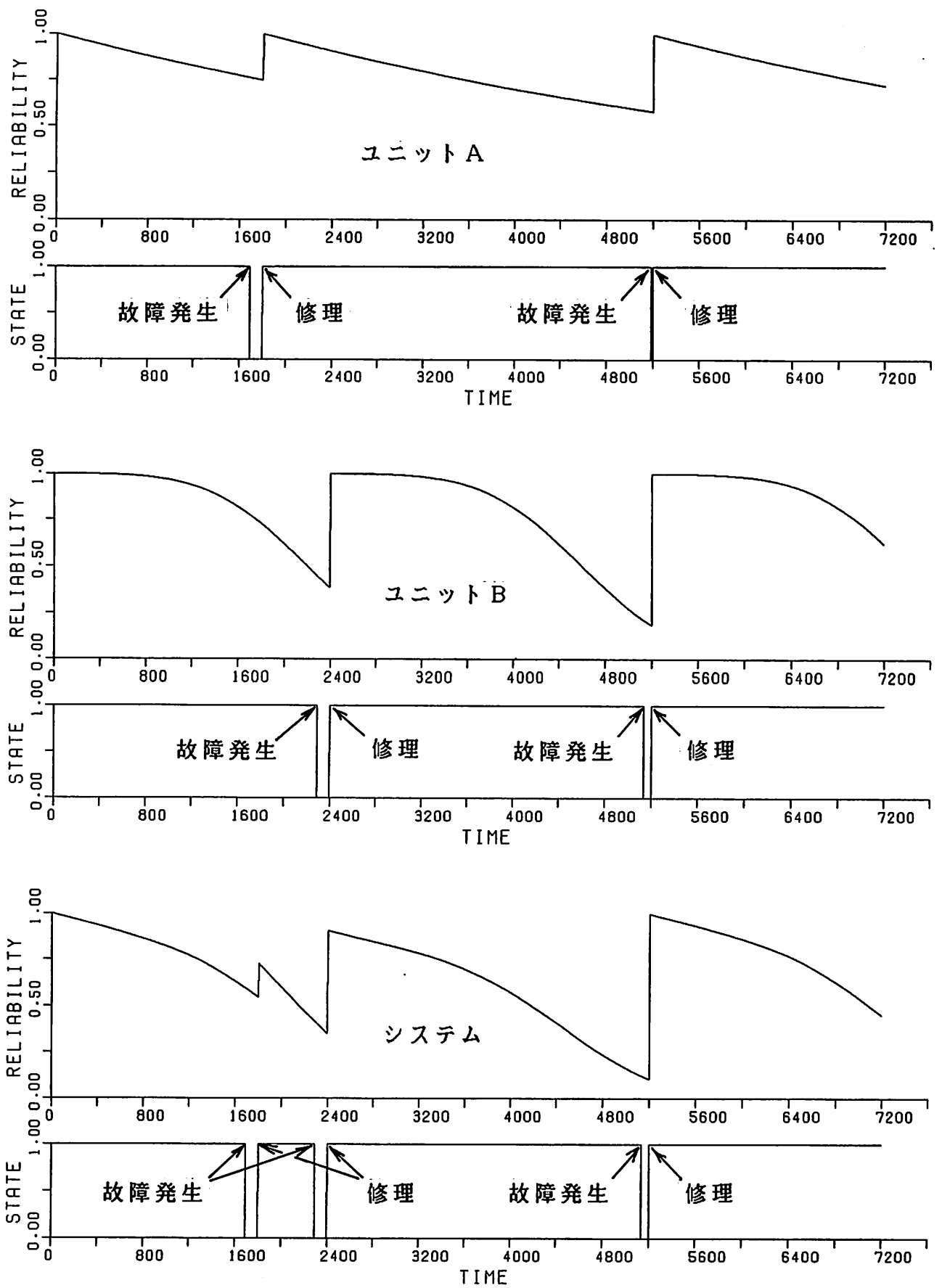


図5. 1 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移（現行点検）

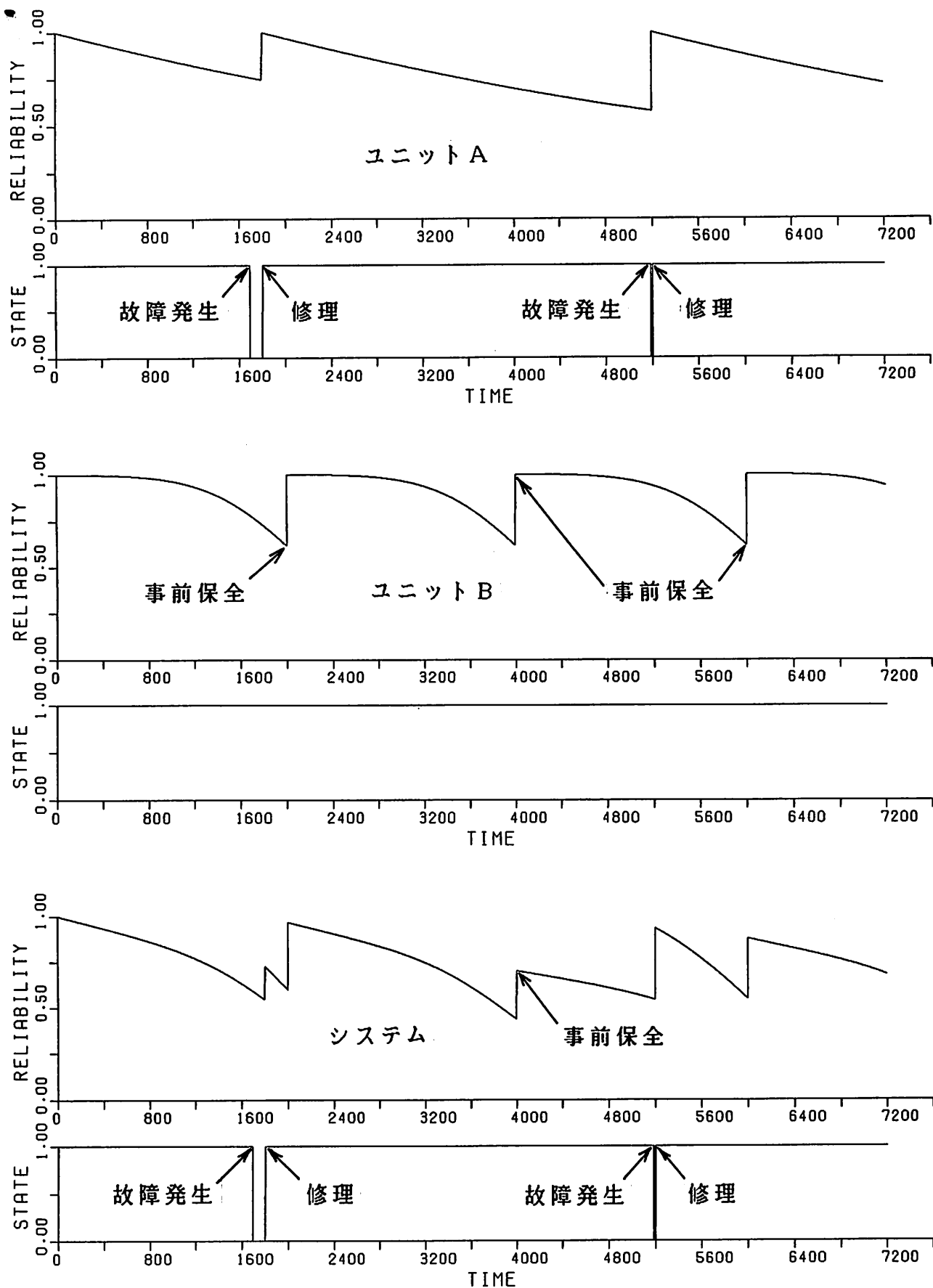


図 5. 2 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(改現行点検 $R = 0.5$)

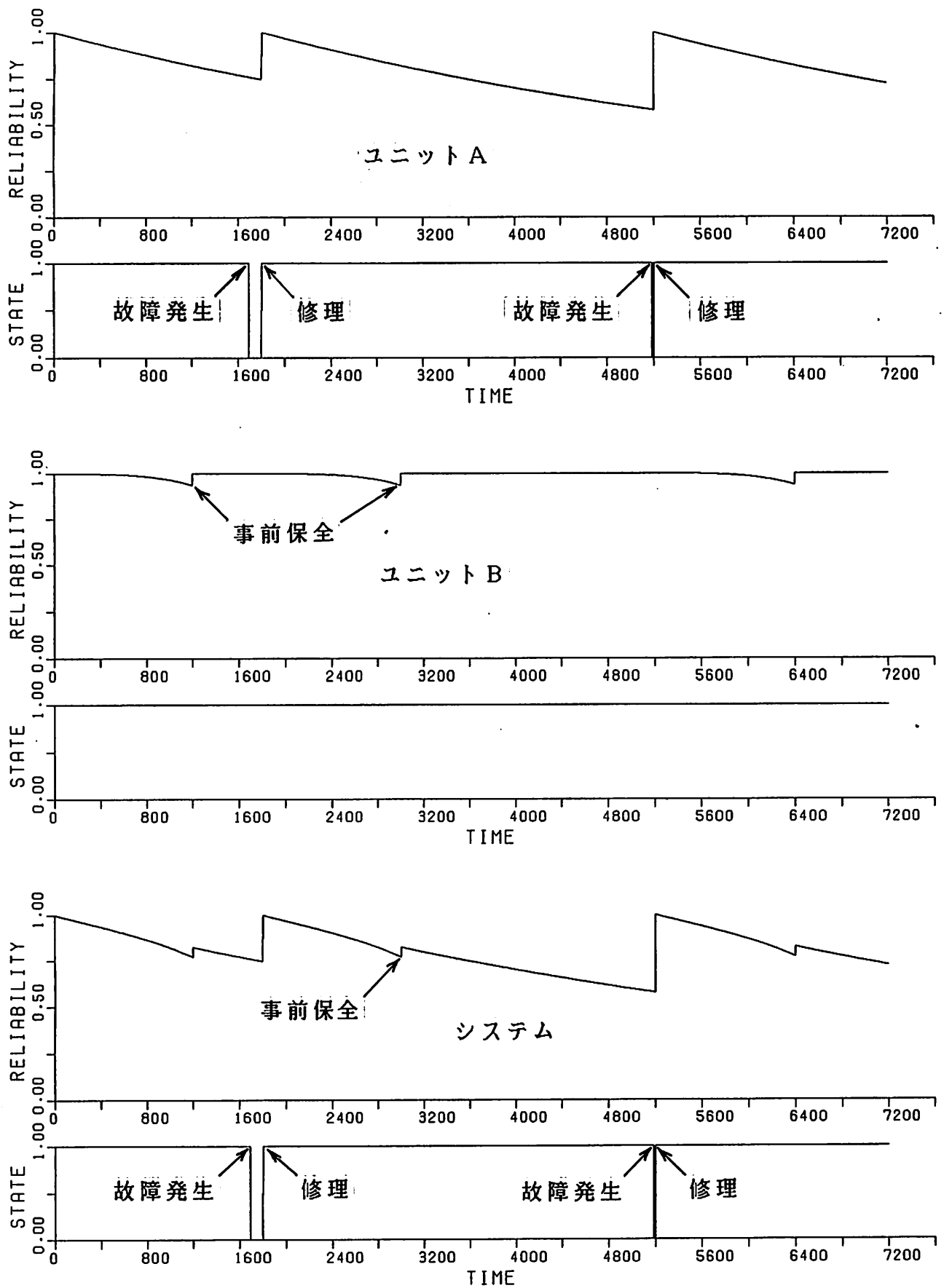


図 5. 3 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(改現行点検 $R = 0.8$)

5. 3 モデル1・改モデル1点検手法

表5. 3、図5. 4、図5. 5はモデル1に関して、表5. 4、図5. 6、図5. 7は改モデル1に関して前節で示したものと同様にまとめたものである。

表5. 3 モデル1による結果

点検間隔 (日)	システムの信頼度 許容下限値	ユニットAの UTR	ユニットBの UTR	システムの UTR	システムの 修復回数
200	0.5	0.9807	0.9116	0.8944	4.07
	0.6	0.9834	0.9145	0.8996	4.07
	0.7	0.9834	0.9148	0.8999	4.20
	0.8	0.9834	0.9168	0.9019	4.23
400	0.5	0.9520	0.8749	0.8324	4.03
	0.6	0.9520	0.8749	0.8324	4.03
	0.7	0.9557	0.8868	0.8478	4.07
	0.8	0.9557	0.8868	0.8478	4.07
800	0.5	0.8762	0.8633	0.7518	3.63
	0.6	0.8762	0.8633	0.7518	3.63
	0.7	0.8799	0.8703	0.7619	3.77
	0.8	0.8799	0.8703	0.7619	3.77

表5. 4 改モデル1による結果

点検間隔 (日)	システムの信頼度 許容下限値	ユニットAの UTR	ユニットBの UTR	システムの UTR	システムの 修復回数
200	0.5	0.9538	0.9791	0.9329	5.43
	0.6	0.9677	0.9879	0.9556	6.17
	0.7	0.9658	0.9892	0.9550	6.83
	0.8	0.9742	0.9903	0.9645	7.33
400	0.5	0.9205	0.9731	0.8937	5.20
	0.6	0.9297	0.9722	0.9020	5.37
	0.7	0.9390	0.9899	0.9289	6.37
	0.8	0.9353	0.9778	0.9347	6.40
800	0.5	0.8796	0.9360	0.8207	4.37
	0.6	0.8796	0.9360	0.8207	4.37
	0.7	0.8705	0.9717	0.8445	5.07
	0.8	0.8705	0.9717	0.8445	5.07

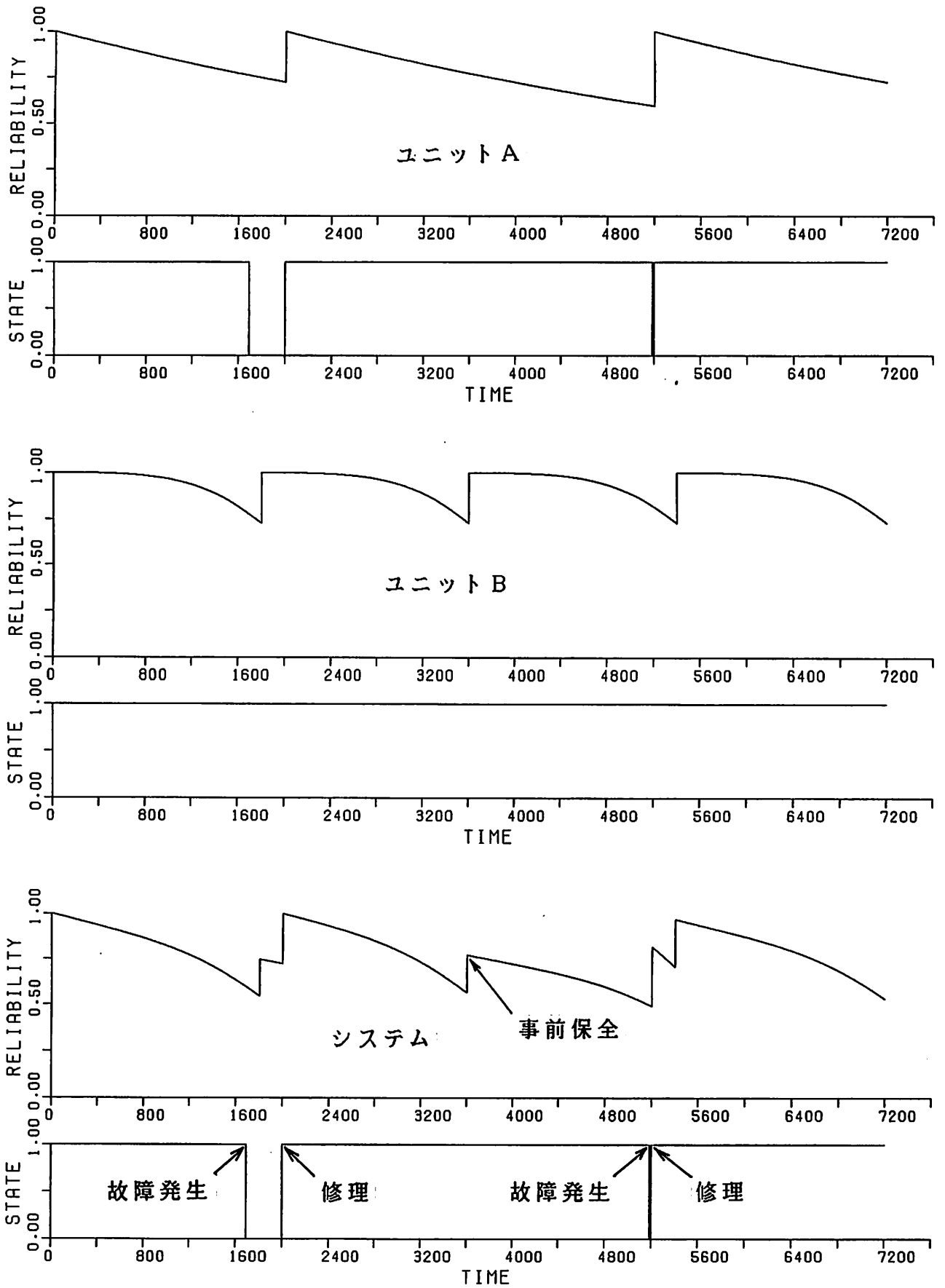


図 5. 4 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(モデル 1 $R = 0.5$)

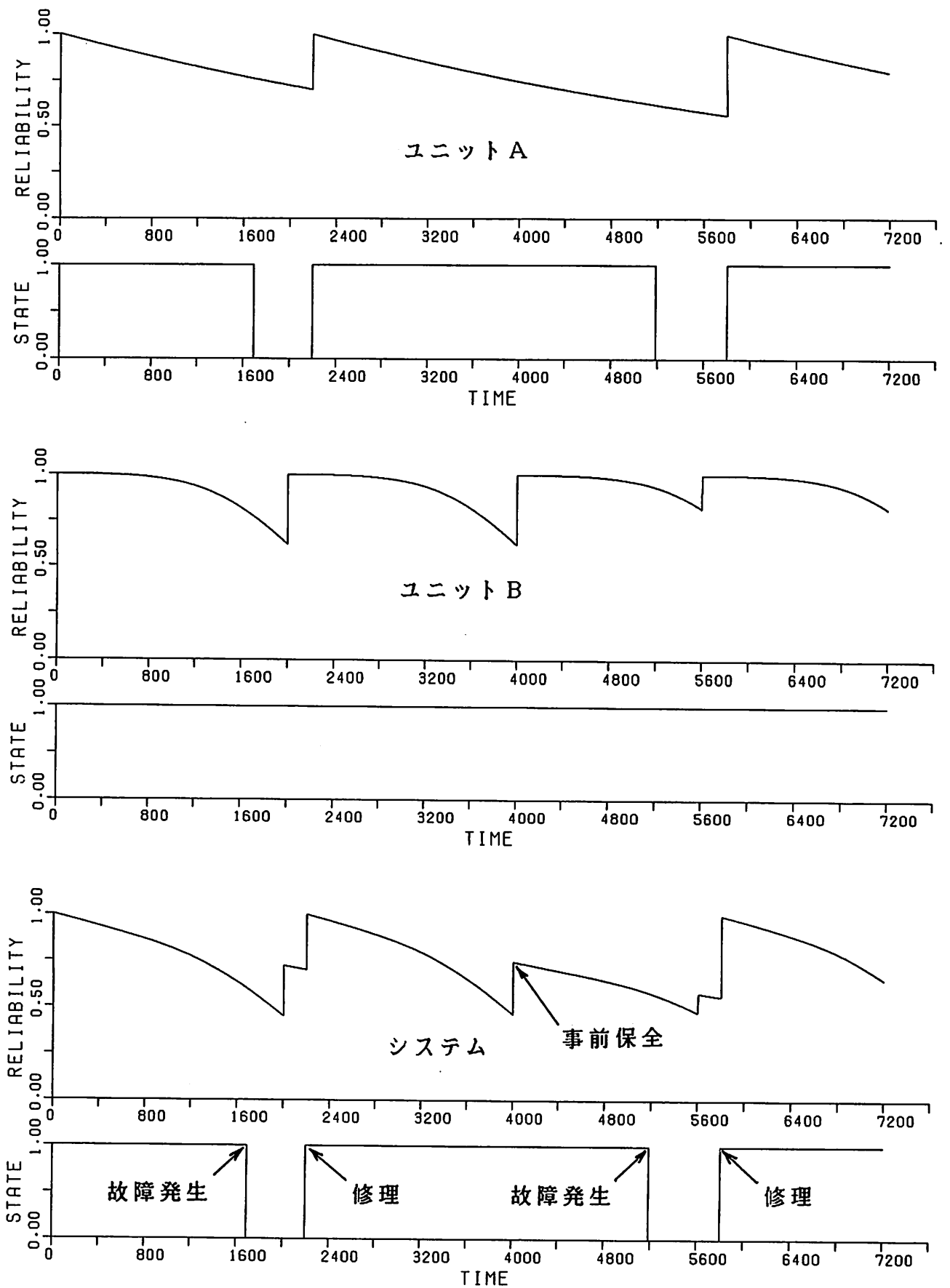


図 5. 7 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(改モデル 1 $R = 0.8$)

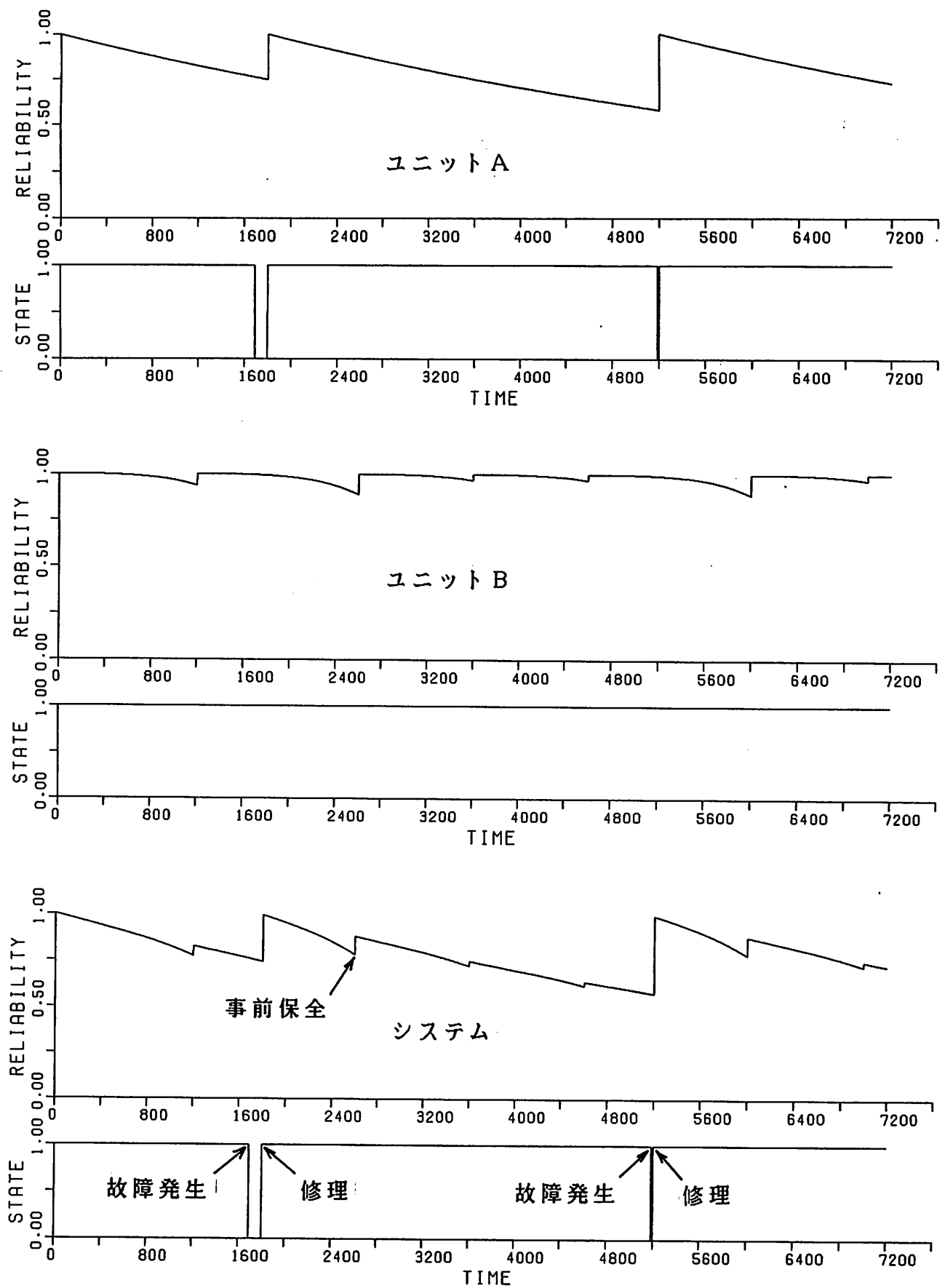


図 5. 5 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(モデル 1 $R = 0.8$)

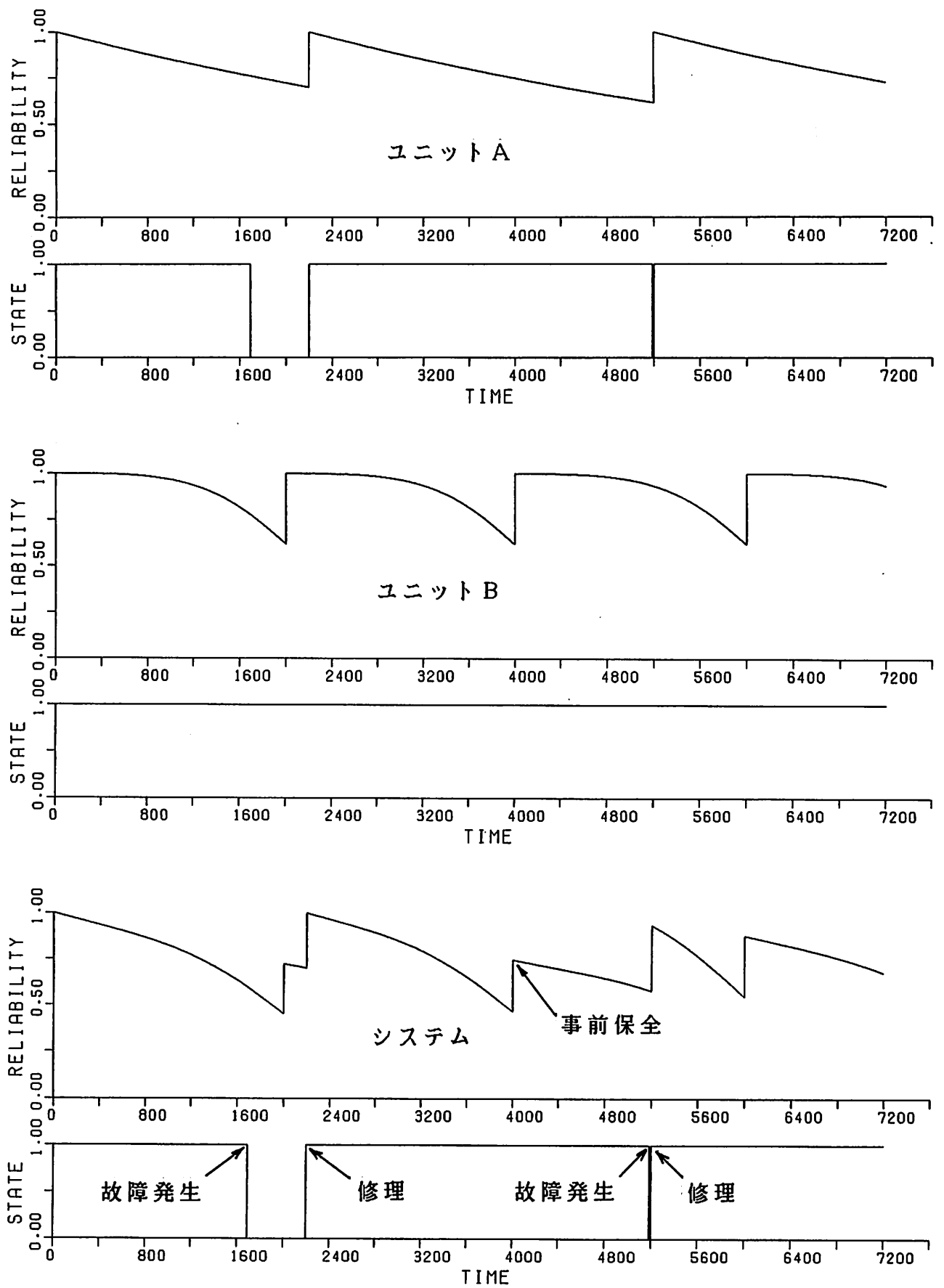


図 5. 6 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(改モデル 1 $R = 0.5$)

モデル1と改モデル1のシミュレーションから得られた点検ユニット系列のうち、点検間隔200日のものをそれぞれ図5.8と図5.9に、点検間隔400日のものを図5.10、図5.11に、点検間隔800日のものを図5.12、図5.13に示す。

ここで点検ユニットとは、各モデル30回のシミュレーションにおいて同一の点検時点でA、Bどちらのユニットが点検されたかの割合を点検時点全てに関して求めたものである。即ち、点検時点 t_i において、30シミュレーションのうちユニットAが18回、ユニットBが12回点検されたとするとその割合は $18/30 = 0.6$ となり、ユニットBを0、ユニットAを1として0.6の点に打点する。図5.8～図5.13の各点は上記の方法で求めたものである。

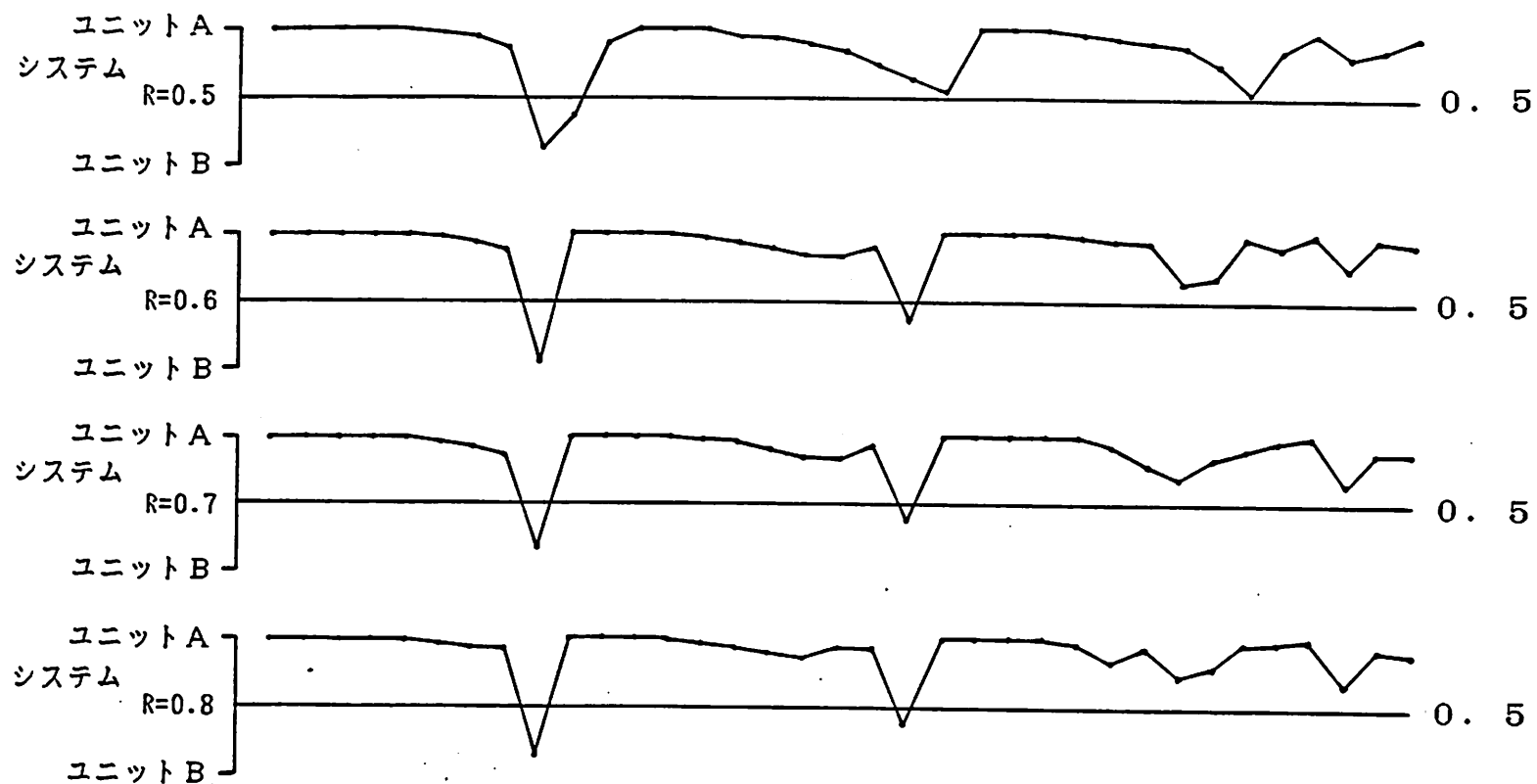


図 5. 8 点検ユニット系列 (モデル 1 点検間隔 200日)

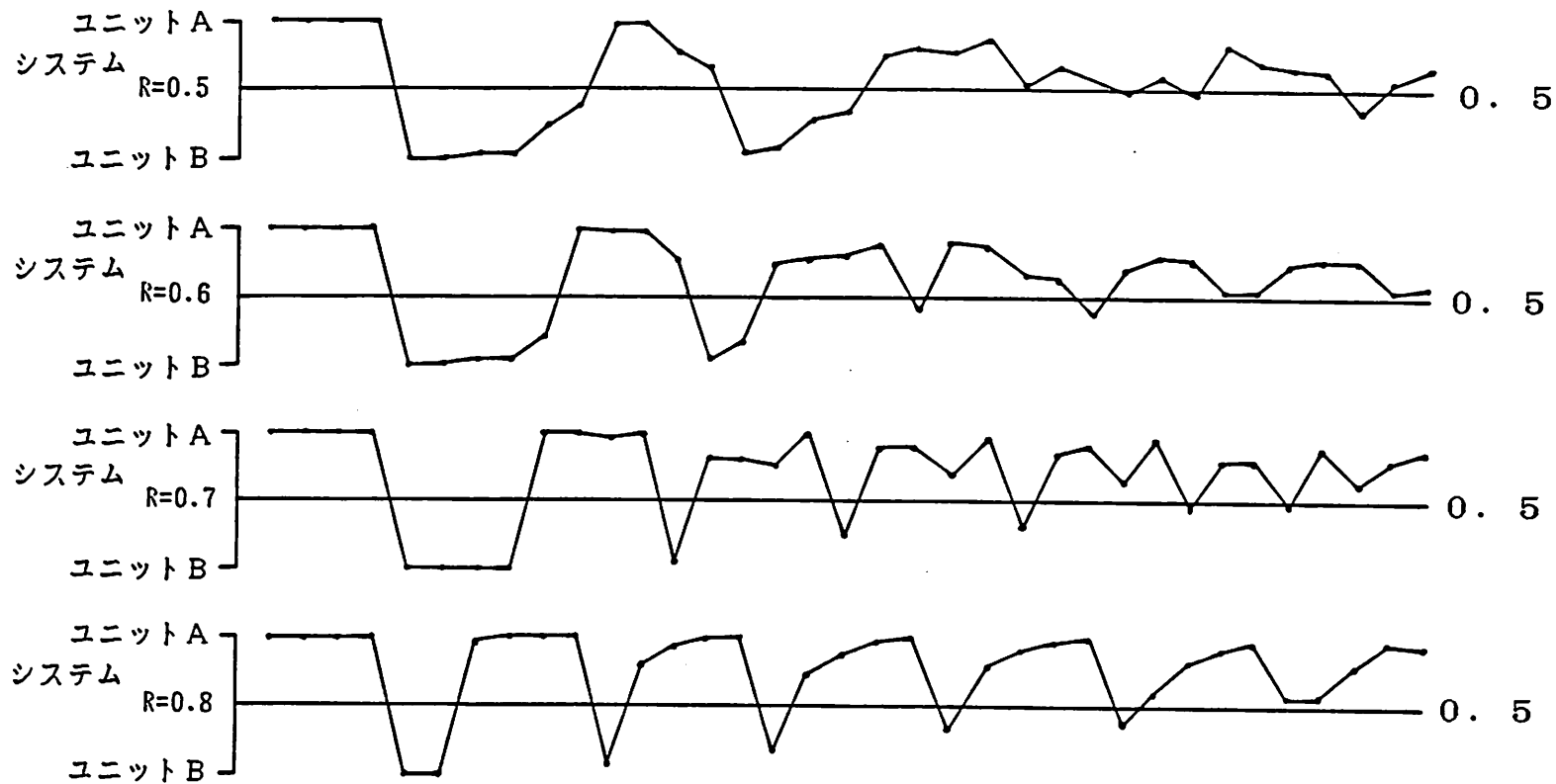


図 5. 9 点検ユニット系列 (改モデル 1 点検間隔 200日)

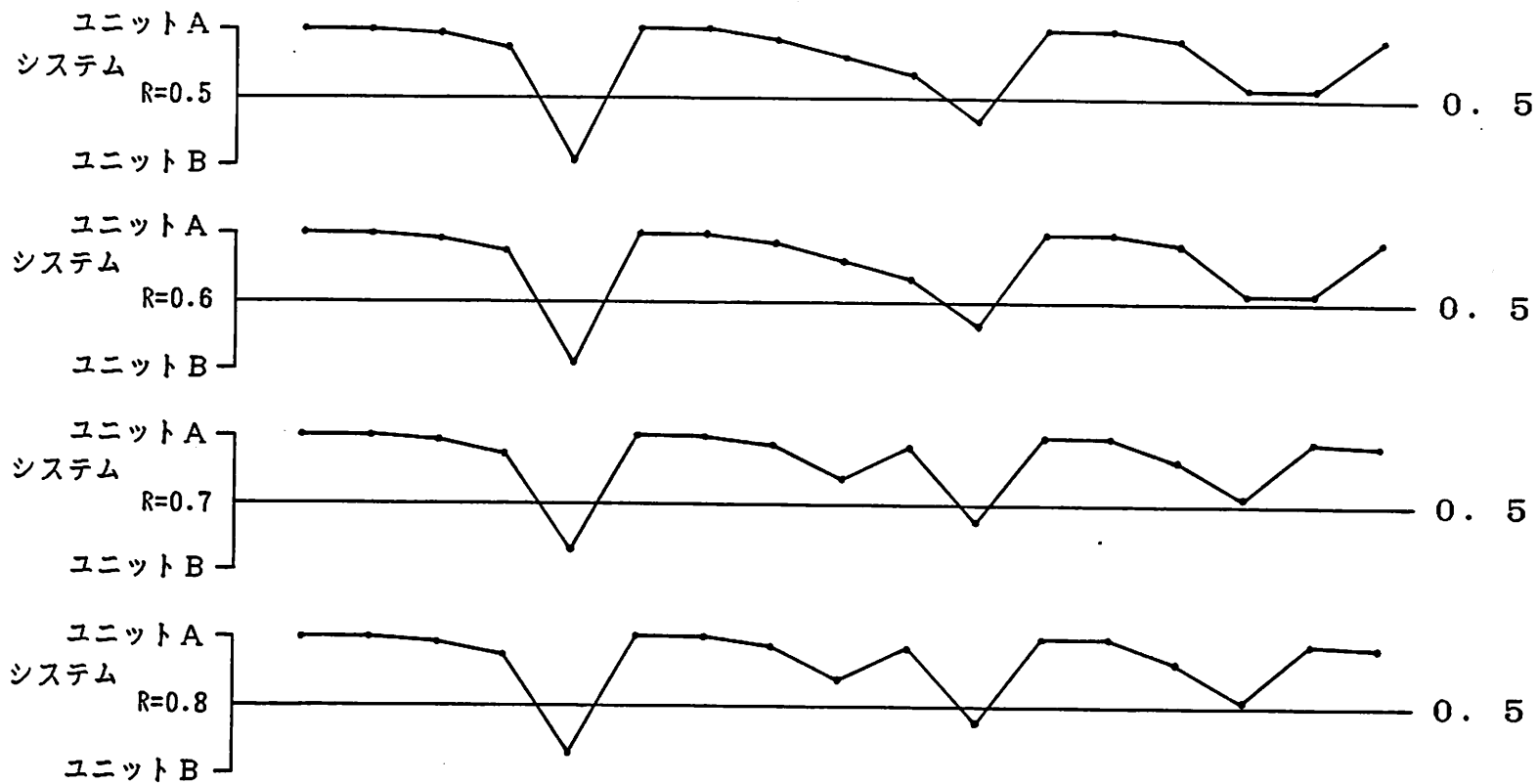


図5. 10 点検ユニット系列 (モデル1 点検間隔 400日)

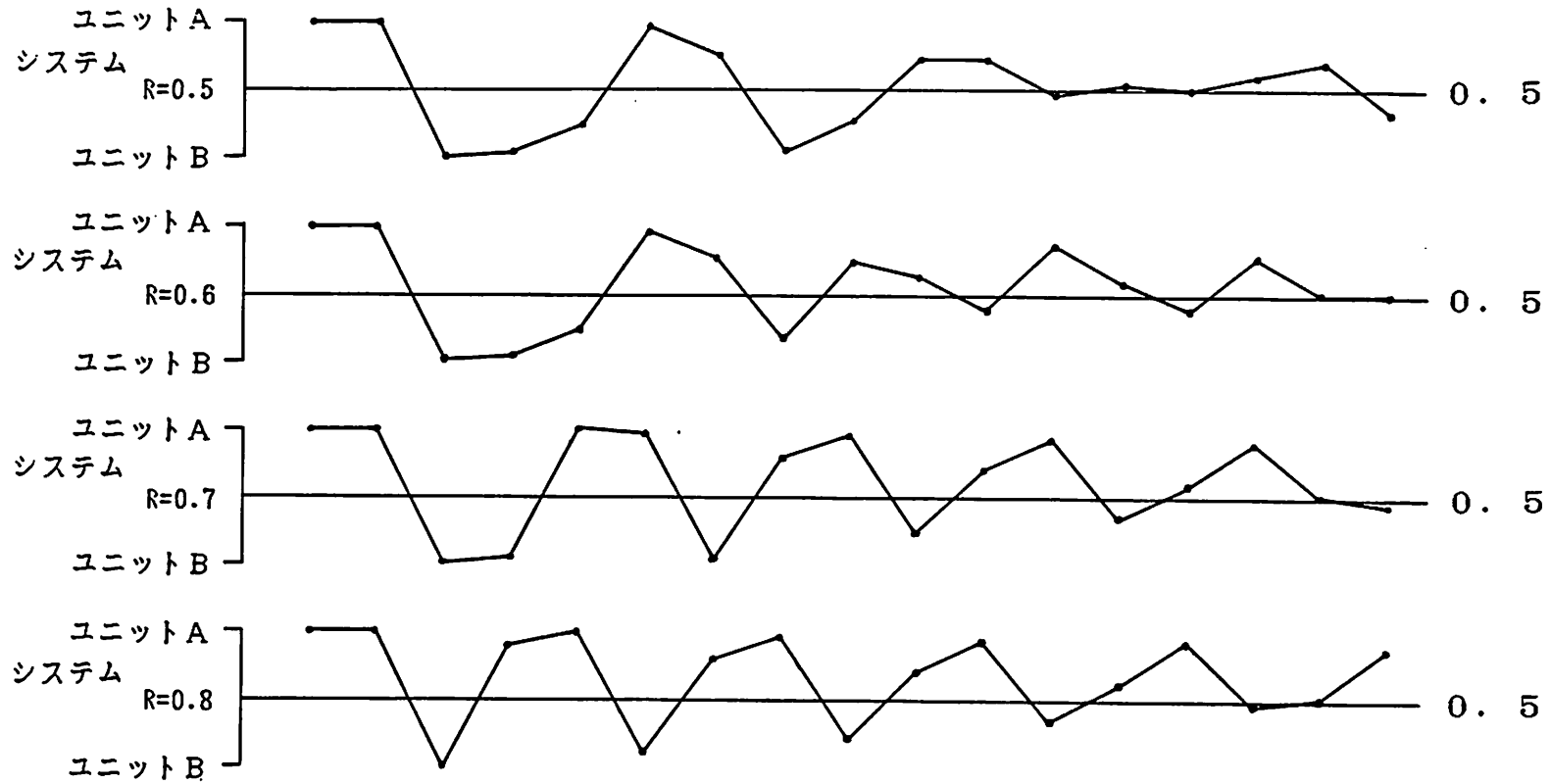


図5. 11 点検ユニット系列 (改モデル1 点検間隔 400日)

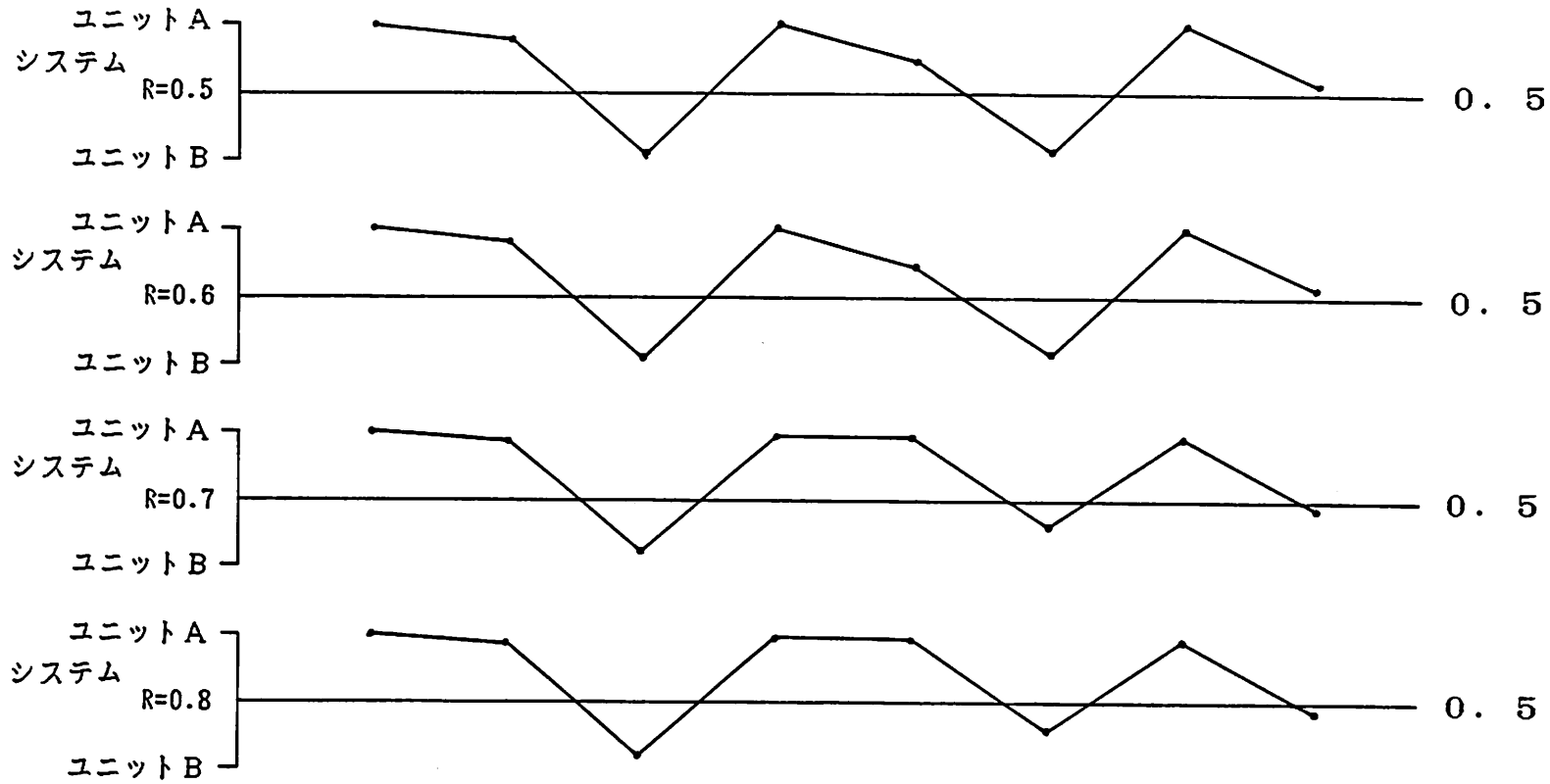


図 5. 12 点検ユニット系列 (モデル 1 点検間隔 800日)

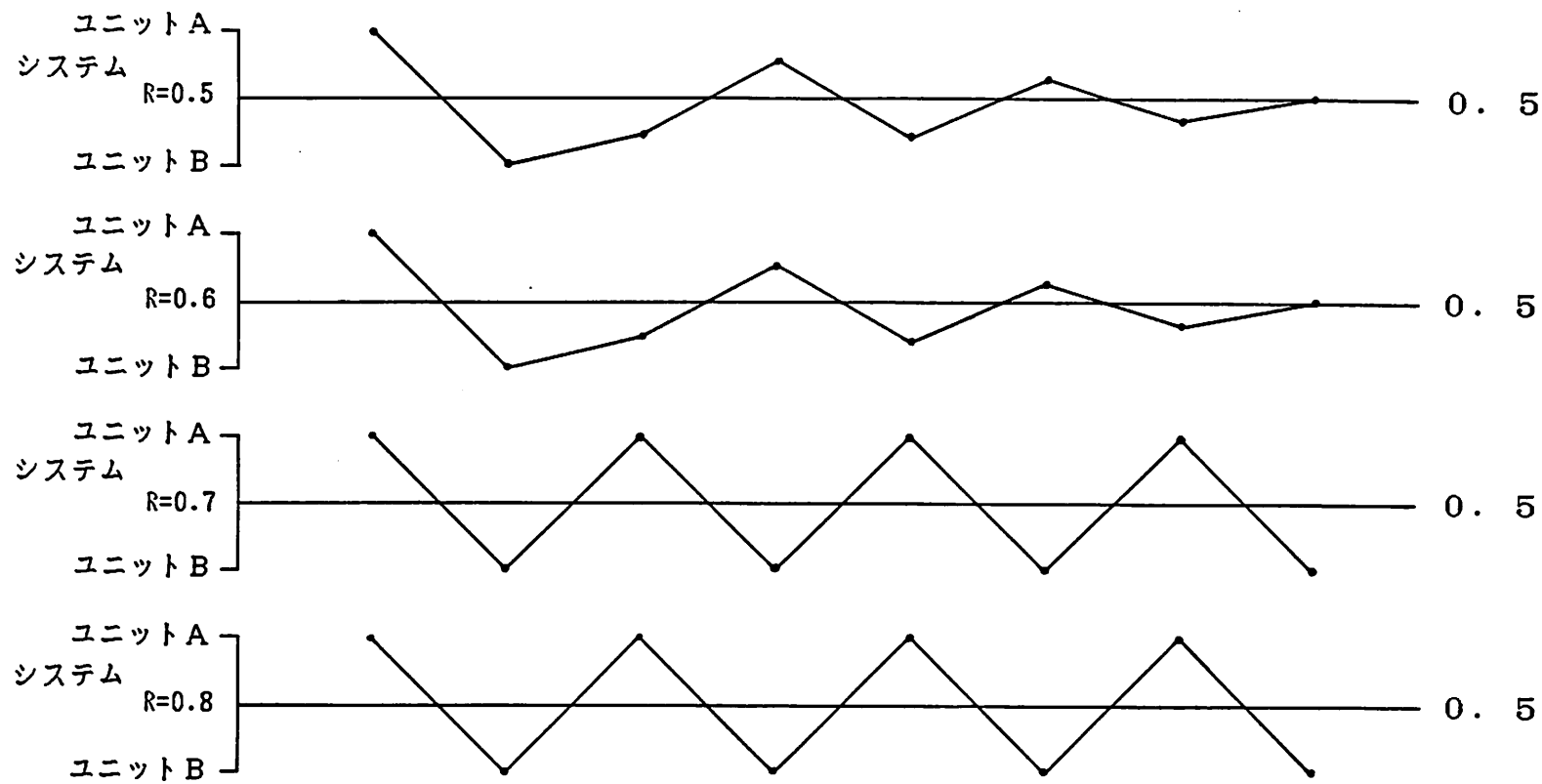


図5. 13 点検ユニット系列 (改モデル1 点検間隔 800日)

5. 4 モデル2点検手法

表5. 5はモデル2の点検手法の30のシミュレーション結果の平均値を示したものであり、図5. 14 図5. 15はシステム信頼度許容下限値毎のシステム信頼度、状態推移の例である。また図5. 16にそれぞれの許容下限値で得られた平均点検時点を示した。

表5. 4 モデル2による結果

システムの信頼度 許容下限値	ユニットAの U T R	ユニットBの U T R	システムの U T R	システムの 点検回数	システムの 修復回数
0.5	0.9042	0.9388	0.8510	6	3.80
0.6	0.9110	0.9731	0.8895	8	4.90
0.7	0.9433	0.9834	0.9290	10	4.93
0.8	0.9531	0.9824	0.9361	15	6.07

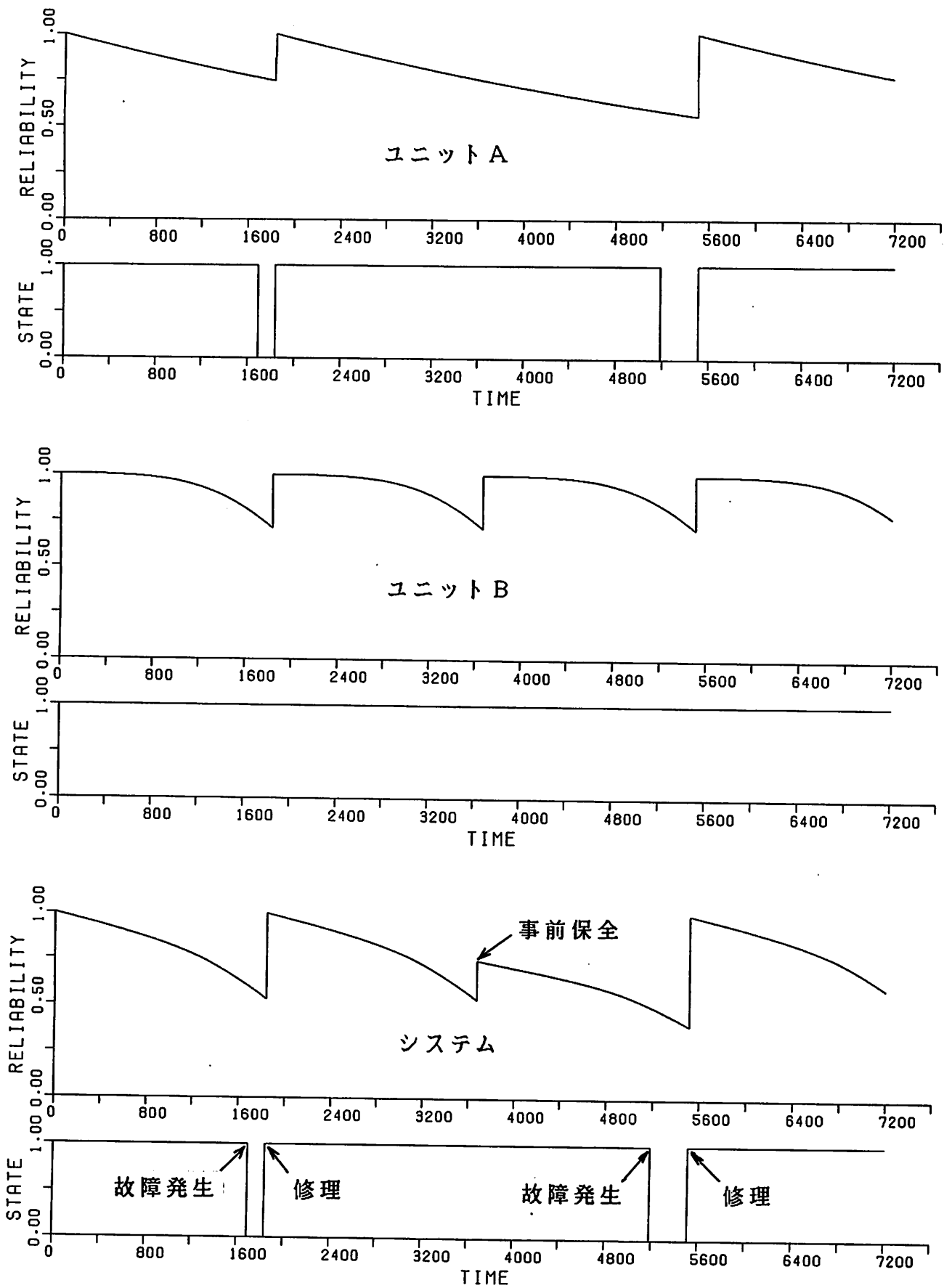


図 5. 14 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(モデル 2 $R = 0.5$)

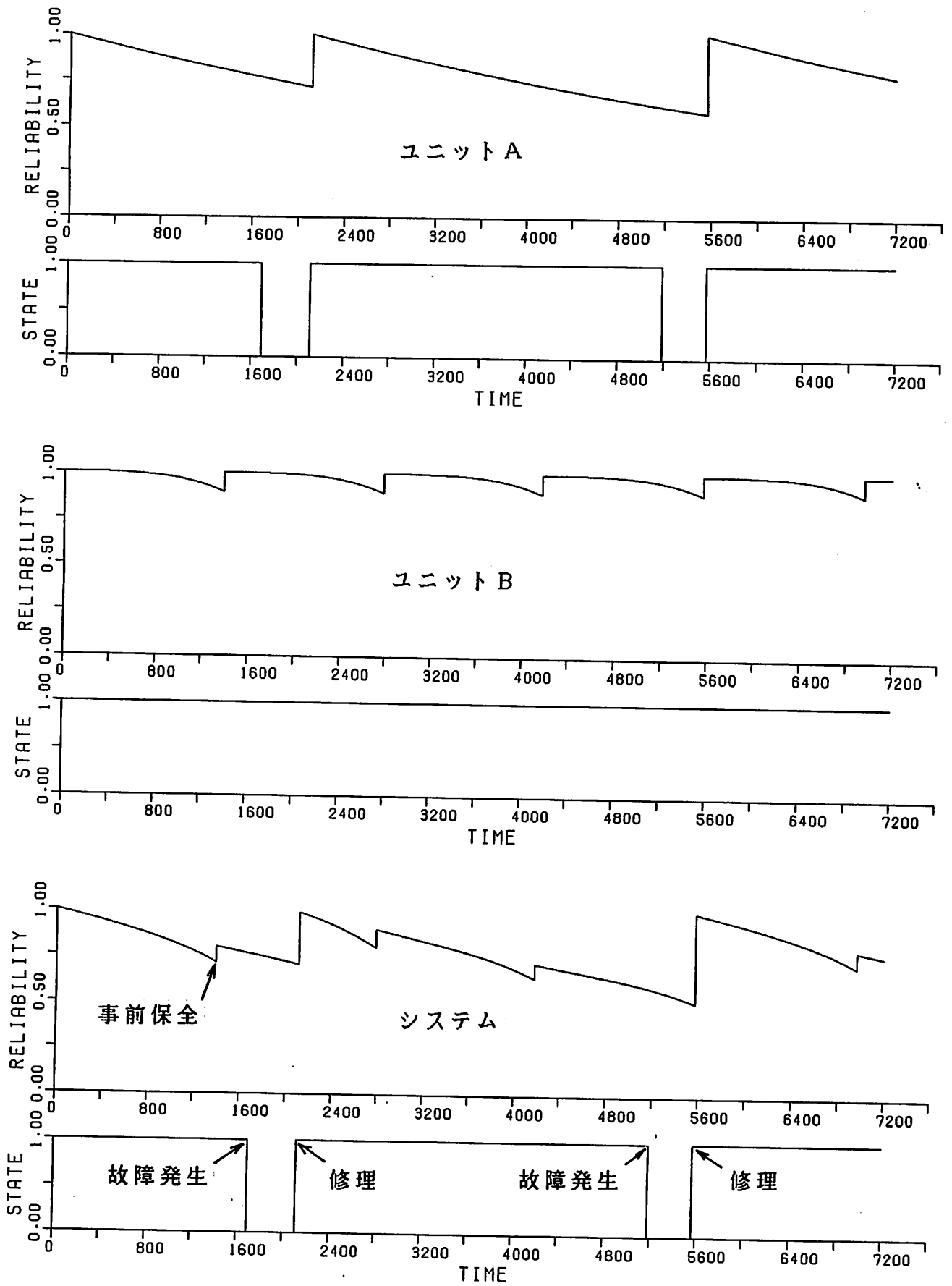


図 5. 15 ユニット、システムの信頼度及び状態の推移
(モデル 2 $R = 0.8$)

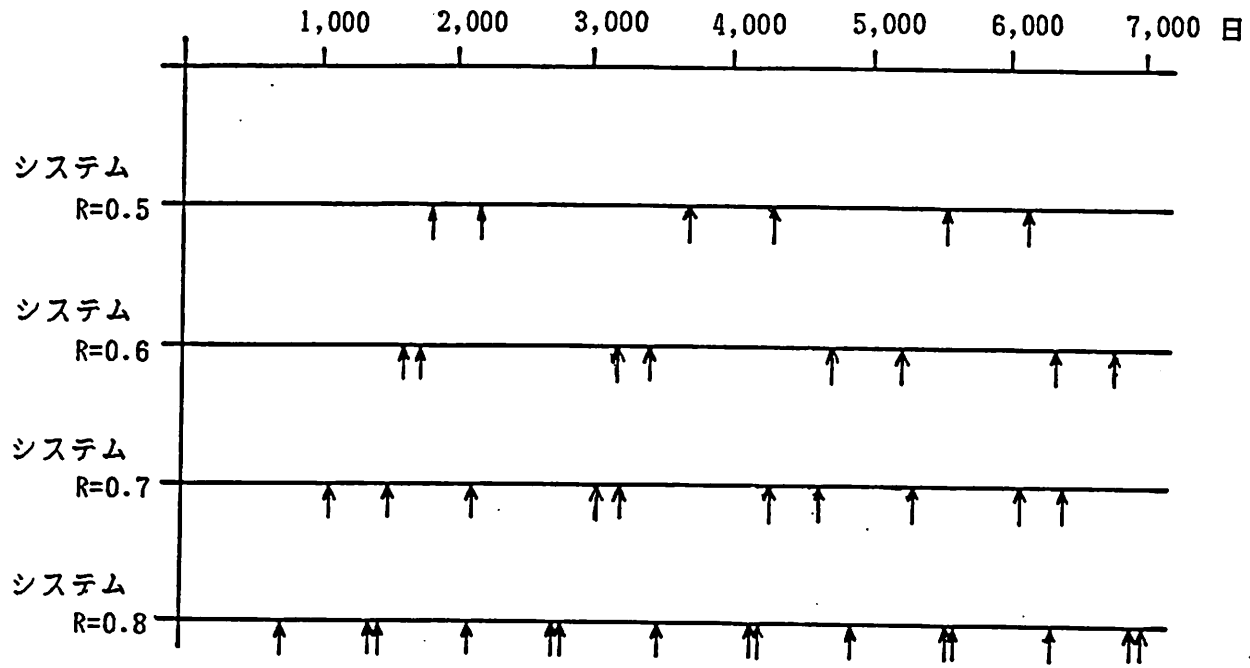


図 5. 16 モデル 2 から得られた平均点検時点

第六章 結果の考察と今後の課題

6. 1 結果の考察

本節では、第五章に示したシミュレーション結果を基に「システムのアップタイムレシオ」、「システムの修復回数」、「全体コスト」の三点に関してまとめ考察する。6.1.1～6.1.3の各項に点検間隔 200日、400日、800日の3枚の図が示されているが、それぞれの図は各モデルのシステム信頼度許容下限値の変更による推移を示している。

6.1.1 各モデルのアップタイムレシオに関する考察

各図中、それぞれの点検間隔での現行点検手法で得られたアップタイムレシオを破線で示してあるが、一応この値を基準として各モデルのアップタイムレシオを比較してみると、改現行点検のアップタイムレシオがどの場合にもかなり高いことが示される。現行点検と改現行点検の違いは、ユニットBに対する予防保全の有無であったから、予防保全を行なう条件が今回仮定したようなものであった場合、予防保全によるシステムのアップタイムレシオの向上は5.2の表5.1と表5.2から約0.02～0.10と算定される。また点検間隔別の差は200日の場合約0.02～0.03、400日で約0.04～0.06、800日で約0.05～0.10となり、点検間隔が長くなるほどアップタイムレシオの差が大きくなる傾向にあり、予防保全の有無と併せて理論的に矛盾のない結果が得られている。

モデル1と改モデル1のアップタイムレシオの差は、5.3節の表5.3と表5.4の同一許容下限値間で比較すると、点検間隔200日で約0.04～0.06、400日で約0.06～0.09、800日で約0.07～0.08となり、点検間隔が長くなるほど大きくなる傾向が保存されているが、この二つのモデルが基本的には同一の構造からなっていることを考慮すると、ここで得られた差はかなり大きいと考えるべきである。この差をもたらす最大の要因はモデル1と改モデル1におけるユニットAの信頼度の扱い方であると考えられるが、結局故障分布として指数分布が仮定された場合、表5.3、表5.4のユニットA、ユニットBそれぞれのアップタイムレシオを比較しても分かるように、点検時点を再生点とみ

なして予防保全を加えることでシステム内の各ユニットのアップタイムレシオをバランスよく保つことができ、同時にシステム全体のアップタイムレシオを高く維持することが可能となることが示される。

図6. 1よりモデル2のアップタイムレシオが、現行点検の点検間隔 200日のアップタイムレシオと比べて約 0.01~0.10 低く、その差はモデル2の許容下限値を引き上げることで縮まっている。モデル2は他のモデルとその基本的構造が異なっているため、各モデル間の優劣をアップタイムレシオの比較だけで論ずることはできないが、表5. 5に示されたモデル2の点検回数、及び図6. 2、図6. 3にモデル2のアップタイムレシオをあてはめてみれば分かるように点検回数の差即ち点検間隔の長短がアップタイムレシオに強く関係していることが読み取れる。

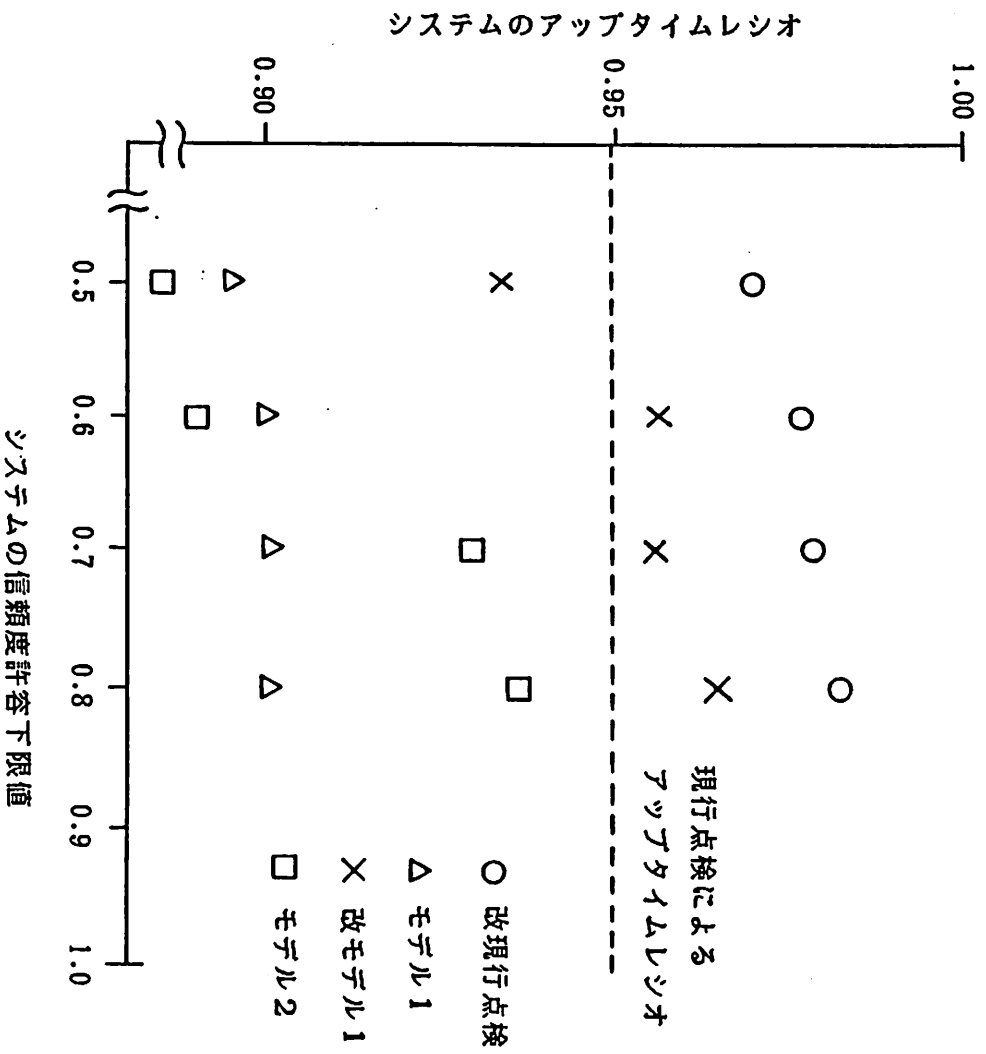


図 6. 1 各モデルより得られたアップタイムレシオ（点検間隔 200日）

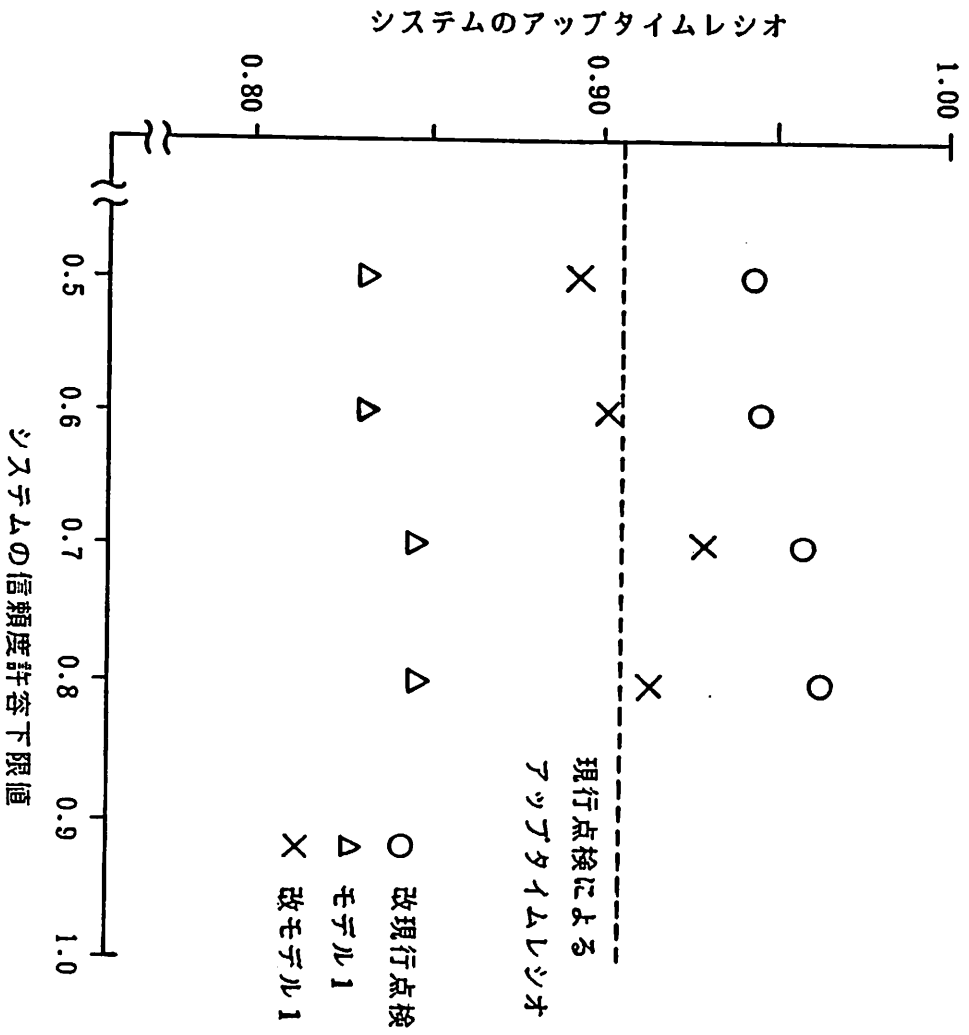


図 6. 2 各モデルより得られたアップタイムレシオ (点検間隔 400日)

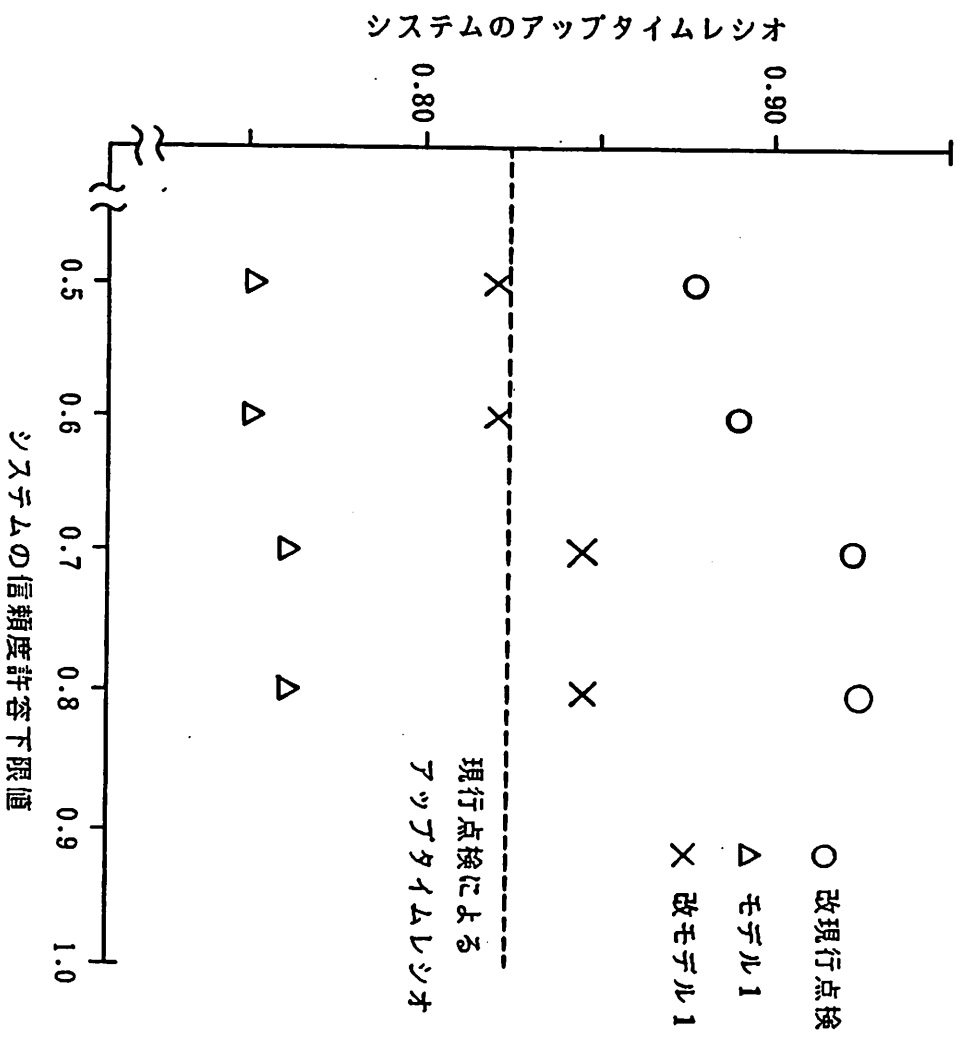


図 6. 3 各モデルより得られたアップタイムレシオ (点検間隔 800日)

6.1.2 各モデルの修復回数に関する考察

延点検回数（1ユニット1回の点検を延点検回数1とする）と修復回数は総コストを計算する際に必要な情報であって、本来これだけでは何の判断も下せないものである。しかしながら、図6.4、図6.5より改現行点検の修復回数が極端に大きく、特にシステム信頼度許容下限値0.8の場合には点検間隔400日、800日で点検回数が17回、8回であることを考えると、ほぼ毎回の点検で故障修理、予防保全といった何らかの修復活動が行なわれていることになり、この結果をみる限り改現行点検が非現実的な手法であることになる。

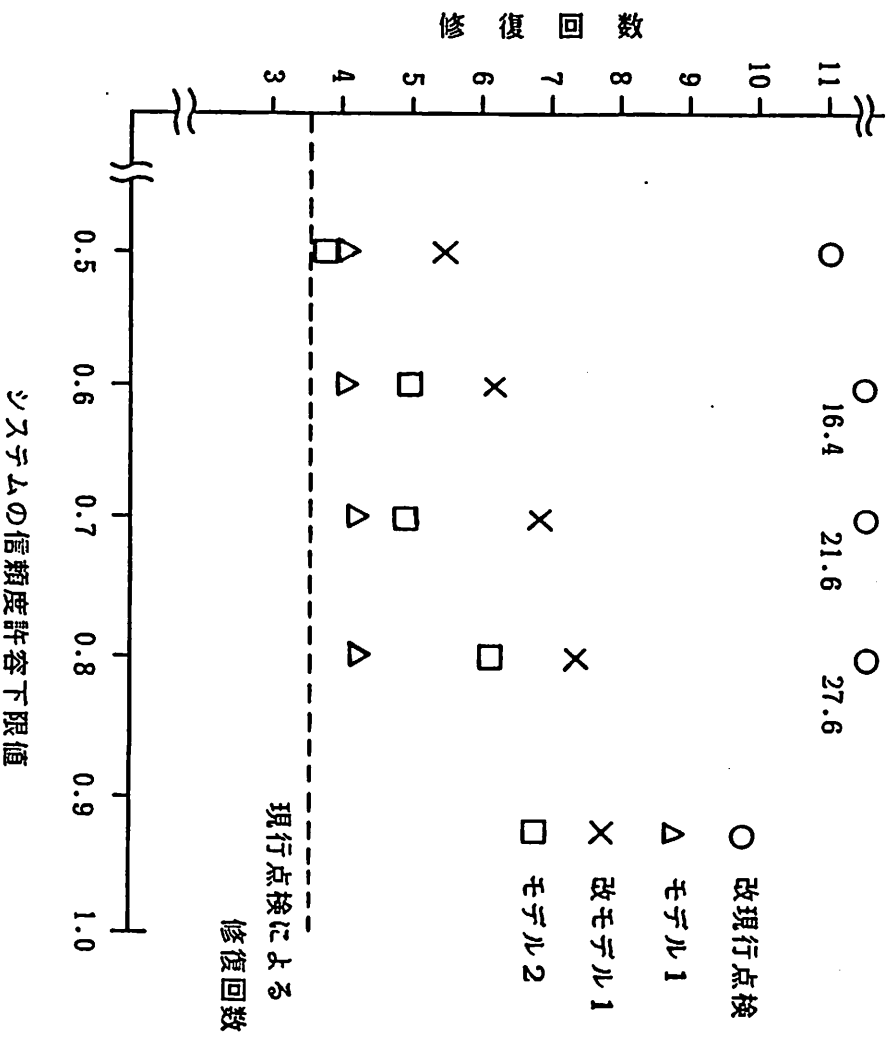


図 6. 4 各モデルより得られた修復回数 (点検間隔 200日)

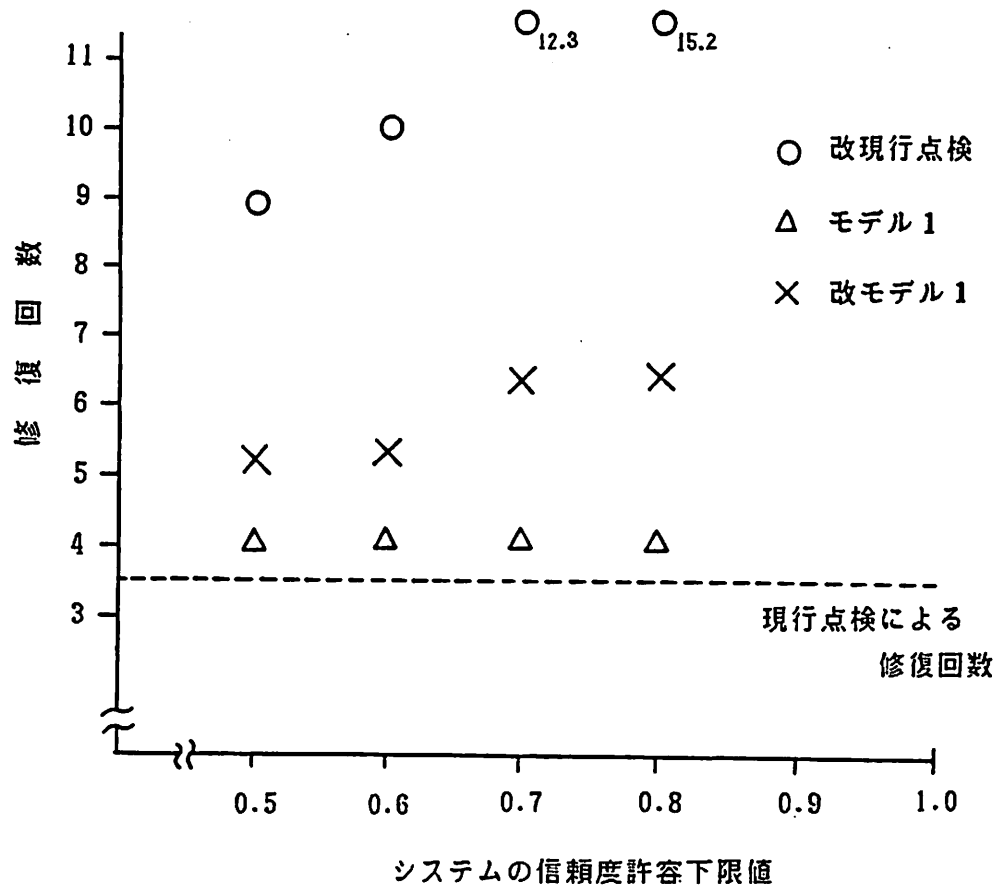


図 6. 5 各モデルより得られた修復回数 (点検間隔 400日)

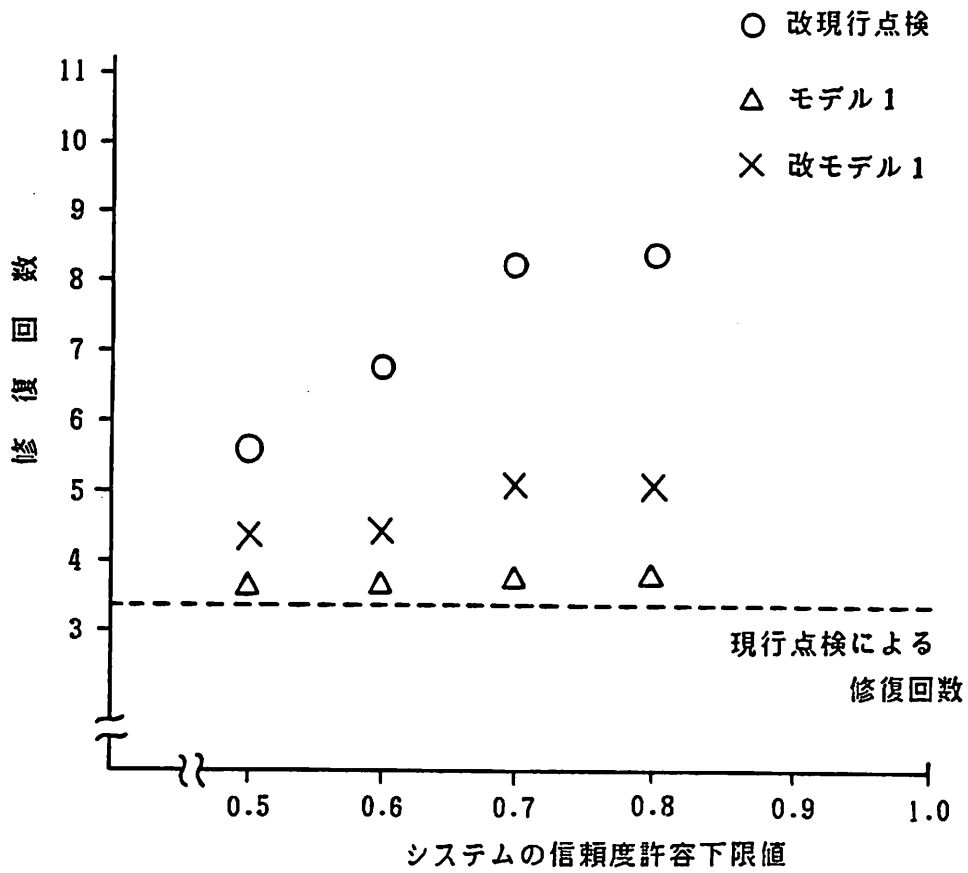


図6. 6 各モデルより得られた修復回数 (点検間隔 800日)

6.1.3 各モデルのコストに関する考察

ここで算出した各モデルのコストは3.2.1 で最適点検間隔の算定例に示したと同様の仮定に基づいている。即ち1ユニット1回の点検に1、1ユニット1回の修復に15、全期間7,200日に必ず1回火災が発生するとして、故障放置による被害が300と重みづけて算定したものである。現在のところこれらの重みの妥当性を証明するような資料は存在していないが、もし仮にそれぞれの正確なコストが与えられたとしても、点検、修復、被害にわりあてられる日数がコストの一種と考えられるならば、ここで得られた絶対的な値はともかく、相対的な順位や間隔はそれほど大きく変化しないと考えている。

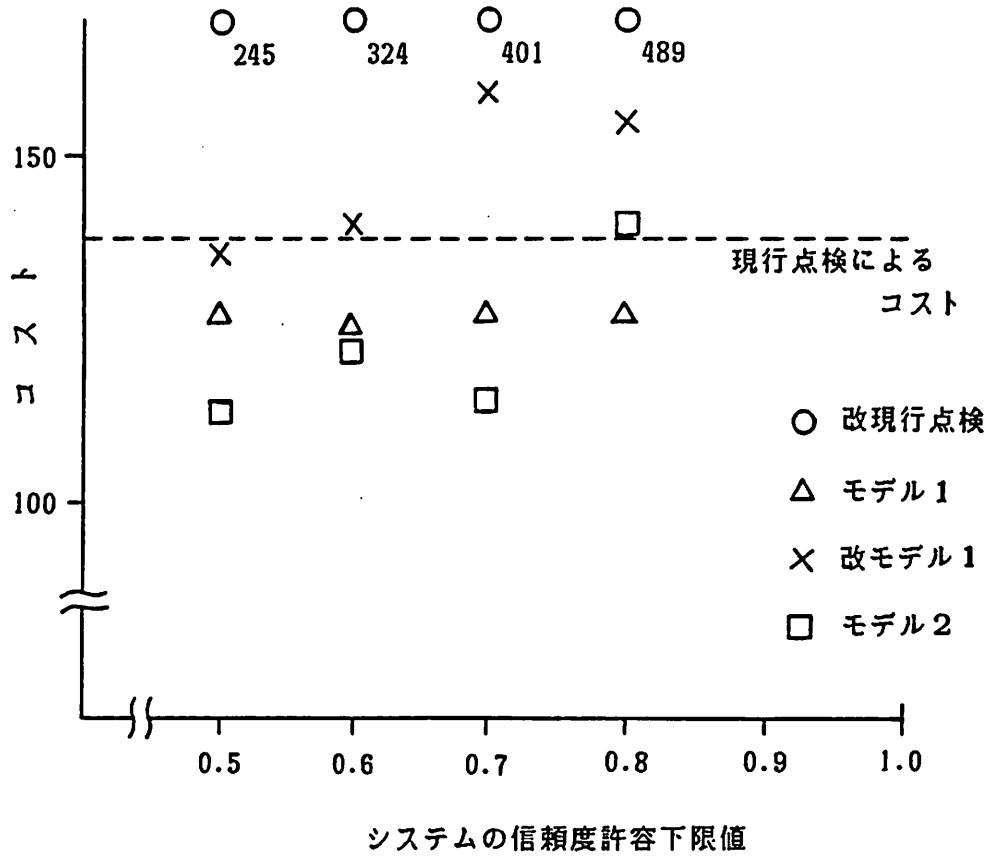


図 6. 7 各モデルより得られたコスト (点検間隔 200日)

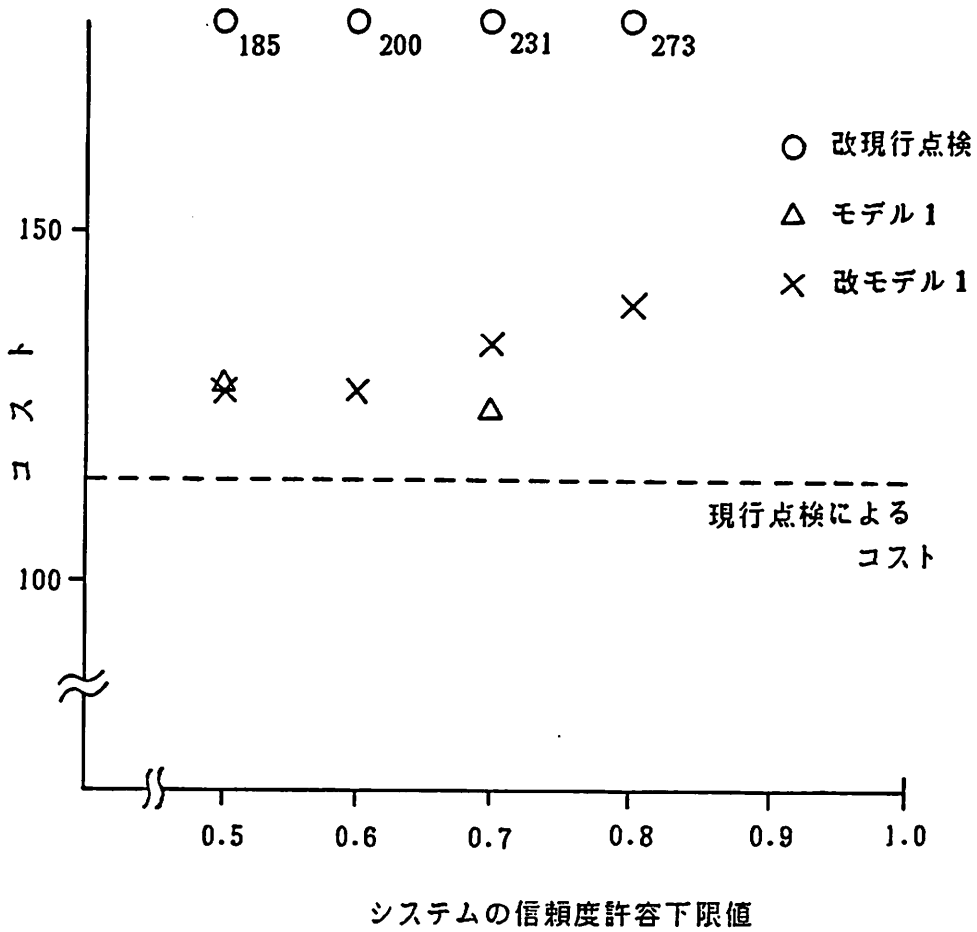


図 6. 8 各モデルより得られたコスト（点検間隔 400日）

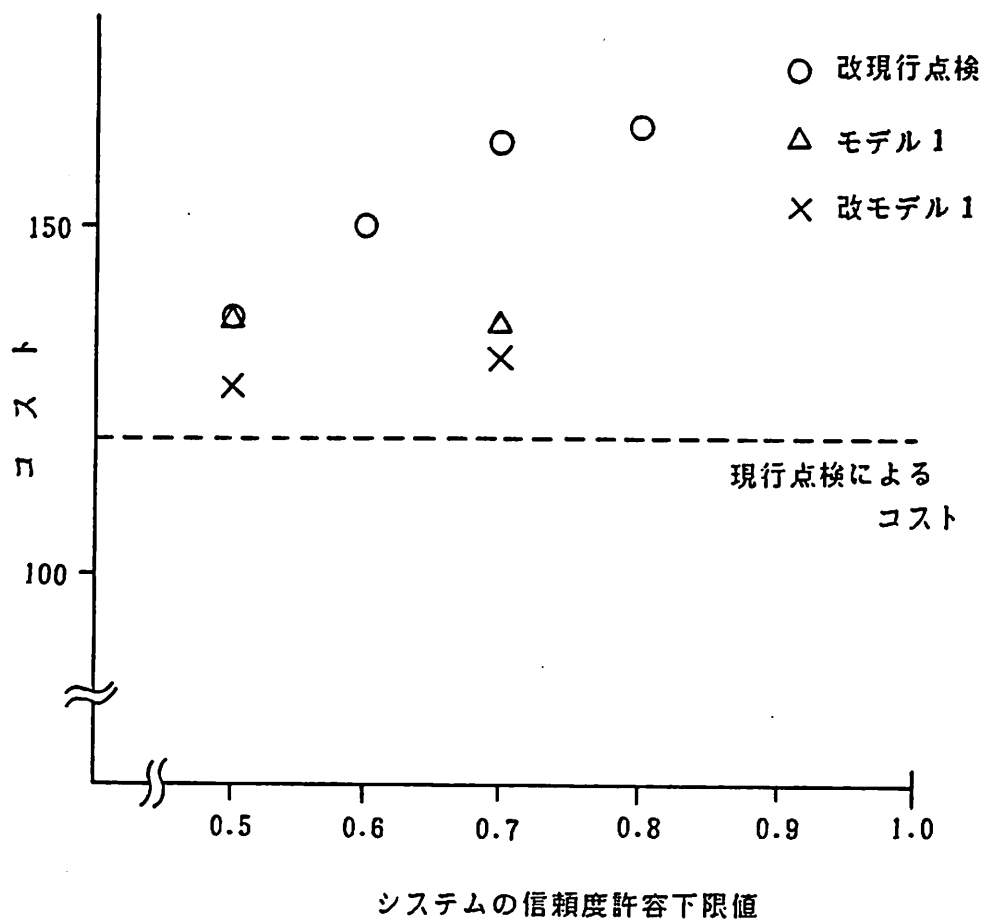


図 6. 9 各モデルより得られたコスト (点検間隔 800日)

この結果をみると、修復回数でみたのと同様に点検間隔が 200日、400日においては改現行点検の非現実性がはっきりしてくる。その他のモデルでは点検間隔 200日において総じて現行点検より低いコストとなっており、特にモデル 2 と現行点検とを比較すると、モデル 2 は最大 18% のコスト低減となる。一方この両者をアップタイムレシオで比較するとモデル 2 は最大 10% の低下に留る。アップタイムレシオの差とコストの差を関連させて評価するには社会的評価基準が明確に定まっていることが必要であるが、現在そのような概念も手法も一般には知られていない。そこで単純にそれぞれの値を足し引きして判断し得るものならば、モデル 2 は現行点検より優れた手法であるといえよう。

以上結果の考察から概ね次のように結論できる。

- ・「4. 2点検・保全モデル」で述べたような理由から、現行点検手法に替わるよりよい点検手法を探ることが本論の主要な目的であったが、シミュレーションから得られた結果は現行点検体制が点検間隔 200日、即ち半年に 1 回程度確実に点検・保全が為れるならば、必ずしも不利な状況をつくりだしているとはいえないと結論できる。これは 6.1.3 で現行点検よりすぐれているかもしれないとしたモデル 2 の、点検時刻系列を示した 5. 4 節の図 5. 16 中、許容下限値 $R=0.8$ の場合の系列がほぼ 600日間の固定周期に近いことから確かめられる。
- ・上記の結論を勘案しても、アップタイムレシオの向上に予防保全が大きなメリットをもつことは現行点検と改現行点検のアップタイムレシオの比較から明らかである。現行点検に予防保全を取り入れた改現行点検はコスト面から非現実的であると判断されたが、改モデル 1 のように指数分布を仮定したユニットの点検時点を再生点とみなすことで余分な修復を避けコスト増加が抑えられると予想できる。このことからシステムを構成する各ユニットの故障分布を的確に把握した点検・保全方策の決定が重要であることが再確認された。
- ・5. 3 節の図 5. 8 ~ 図 5. 13 で示された点検ユニット系列は、本論で仮定された故障分布が指数分布と正規分布であることから、信頼度だけによる判断では指数分布の方が状態が不明確にしかとらえられないことを示してい

る。この結果は、信頼度の低下が指数分布はほぼ一定であり、正規分布は明確に変化する点をもつことから理論的にも矛盾しない。しかしここで設定された条件のように、正常か故障かの2状態しか考慮しないならば理論的な解析もそれほど困難を伴わないと考えられるが、状態観測の概念が導入された場合には故障分布からだけでは点検ユニット系列を定性的にも定めることが困難となることが予想される。

6. 2 今後の課題

以上本論では防災設備をより有効に機能させるための点検・保全方策に関して、ごく初歩的な解析を行ってきたに過ぎないが、本章シミュレーション結果を通じて明らかになってきたことは、防災設備にとどまらず設備・機器の故障特性、即ち故障のメカニズムや故障時間分布等の正確な把握がどのような点検・保全方策においても最も重要であるということである。従って今後さらに正確な情報の集積とその解析が強く望まれる。

さらに正常か故障かの2状態だけしか判別しないあるいはできない方法では、システムのアップタイムレシオ向上が、現実的にはコスト等の制約から限界があると考えべきである。それに対して、状態監視保全方策は状態監視理論の確立、保全技術の向上を条件とするが、極めて有効な手法となる可能性があるので、状態観測理論の確立が望まれる。

本論で扱った主題の根本にある思想は、建物内に居住する人間の火災安全を如何に確保するかであるが、その実現にはまず火災物理の解析が行なわれているべきである。また誤報に対する耐性が機械に比べて非常に低く、火災といった稀にしか起きない事象よりも日常活動が優先されるはずの人間の心理、行動の解析も重要なテーマである。さらに6.1.3項で少し触れたように安全とコストを、日常生活と防災設備の位置付けの考察も含めて、どのように均衡させるかの社会的基準に関する考察が実際上大きな問題となろう。

将来にわたって、上述したような問題の解決と統合による総合的な火災安全確保の理論への統一が不断に進められていくべきであると考えている。

謝 辞

本論題の選択にあたってゼミ時間等を通して理論的な礎を教授していただいた坂本 順教授・小浜 芳朗助教授に感謝いたします。また本論で用いたデータを収集し、多忙な中来名し収集データの解説をしていただいた渡辺 郁夫氏に感謝いたします。また卒業論文作製で忙しいさ中私の要求に応じて様々なデータ解析を行なってくれた石川 朝弘君、本論文中に掲載した図の多くを作製してくれた題六講座M1の増茂 貞君、多くの助言・助力を惜しむことのなかった第六講座、防災安全講座の諸兄に感謝の意を表します。最後ではありますが、時には厳しい師として、時には優しい兄として常に適切な助言・指導と暖かいはげましとを与えてくださった、指導教官である辻本 誠助教授に感謝の意を表して本論の完結としたいと思います。

《 参 考 文 献 》

- ・ 稲垣 敏之・井上 紘一・明石 一、不十分な情報に基づくシステム保全方策、システムと制御、V o l . 2 1 , N o . 1 0
- ・ 火災の実態からみた危険性の分析と評価 - 特異火災事例 112 -、東京消防庁行政研究会
- ・ 故障 - 機械設備の異常と安全 -、安全工学協会編
- ・ 塩見 弘、信頼性工学入門、丸善
- ・ 信頼性管理便覧、日刊工業新聞社
- ・ D. R. コックス・P. A. W. ルイス、事象系列の統計解析（浅野他訳）、森北出版
- ・ 三根 久・河合 一、信頼性・保全性の数理、朝倉書店
- ・ 渡辺 郁夫、防災設備の作動信頼性が火災安全性に及ぼす影響に関する研究、昭和59年度名古屋大学工学研究科建築学専攻修士学位論文