

防火設備の信頼性に関する研究

— 煙感知器連動防火扉の信頼性 —

名古屋大学工学部建築学科 防災安全工学講座

15800758

石川朝弘

【目次】

序論

§ 1. 防火扉における故障

§ 2. 信頼性理論の基礎

2-1 信頼性の概念

2-2 信頼性理論の基礎事項

2-3 信頼度関数の分布形と故障率のパターン

§ 3. 故障データの解析

3-1 データの分類

3-2 故障データの解析

3-2-1 データの取り扱い

3-2-2 ワイブル分布のパラメータ推定

3-2-3 故障間時間の度数分布

3-2-4 システム全体のMTBF

3-2-5 解析結果と考察

3-3 補足

補遺

結び

謝辞

参考文献

序論

建築物は人間の重要な生活の場であり、そこでは、人命や財産の安全が確保されなければならない。しかし、人間の力ではどうすることもできない地震・台風・洪水などの自然現象だけでなく、火災などによっても安全がおびやかされ、数多くの人命や財産の損失を招いた。本報に関連する火災についてだけに話を絞れば、国内での比較的歴史の新しいところだけでも、明暦の大火に代表される江戸時代の数多くの大火、関東大地震による2次的な火災などの大規模なものから、所々で発生する小規模なものまで含めると、その件数・被害額は莫大なものになるはずである。人間はこうした体験を重きごとに對処法を考え、被害を最小限にくい止めようと努力してきた。出火に関しては、多くは人間の不注意であるために、個人の日常の心掛けが大きく左右するが、出火後の火災の拡張を抑えようとすることに関しては、石膏ボードなどの難燃・不燃という性質を持つ建築材料の使用、防火・消火設備（火災感知器、スプリンクラー、消火器、防火扉 etc.）の設置など、法的な制限も手伝って、設計時からそれなりの対応がなされている。竣工後も、日常的には、防災センターからの監視、警備員の巡回など、また定期的には、行政の監察、防火設備の点検などが行なわれている。

ここで問題なのは、建物の所有者がどれだけ積極的にそうした対応を行なっているかである。建物内には可燃物が散在しており、いつ出火してもおかしくない状態にある。特に宿泊施設や物販店（デパート、スーパー etc.）のように、所有する側、利用する側がともに注意を払わなければ、思わぬ惨事を招くことにもなりかねない。このように維持管理状況によって火災の起こりやすさが変わってくる。

また、火災の拡張を抑える防火設備に関しては、ごく稀にしか起こらない火災時に規定の機能を遂行することが最大の目的であり、日常的に使用されることがなくても、常に作動できる状態にしておかなければならないにもかかわらず、所有者側には、機器を過剰に信頼するきらいがあり、半年もしくは1年以上の間をおいてメーカーとか行政によって点検されるだけで、故障したものは、たいがいそのままの状態での次の点検時まで放置されてしまうというように、管理状況によって信頼性の変動の仕方が変わってくる。

そこで、本報では、防火設備の中でも煙感知器連動防火扉を対象

を絞って、その故障状況を示すデータから、その信頼性を解析する。そして、この結果を利用し、点検・修復作業の意義、また火災危険度への影響へと話を進めるための糸口を探る。

§ 1 防火扉における故障

事物の働きが損なわれることを故障と言うが、それについて様々な区別の仕方がある。例えば、その発生の仕方によって、突然発生する故障（突発故障）と、経時変化や摩耗などによって機能が次第に低下して起こる故障（劣化故障）という区別ができ、また、発生した場合に危険な状態になるものとならないもの（危険故障と安全故障）という区別もできる。

防火扉の場合、設置される目的は、火災時に開口部をふさぐことによって防火区画を形成し、火・煙の拡張を抑制することである。従って、閉鎖を妨げるような現象の発生が問題であり、例えば、煙感知器連動扉では、大別して、①部品や機器の機械的故障、②作動線上に障害物を設置することや、くさびによる固定などの人間的要素を原因とする閉鎖障害、の2種類がある。この2つの現象については、火・煙の拡張が建物の内外をより危険な状態にするため、危険故障と扱える。まず、①についてであるが、具体的に述べると次のようになる。

扉・枠…扉の自重によって回転軸が傾いて枠・床にあたる、人為的に変形が起こる、ヒンジ部分の劣化による閉じ力の低下

磁着・解放装置…錆びなどによる永久磁石の磁着能力の低下、人為的にラッチの変形が起こる

連動制御盤・煙感知器…電子部品の故障

一方、把手や錠の不良、閉鎖速度が適性でないことなどは望ましくないことではあるが防火扉に要求される機能に対して支障を与えることがほとんどないため、上記の安全故障と見なすことができ、これらの異常は故障とは見なさない。

②については、前述のとおり危険故障と扱える現象であるが、防火扉自体、もしくはそれを閉鎖させる周辺の機器の異常ではないため、①とは別の扱いをする。

防火扉の異常についての扱いは以上のとおりであるが、これまでに文献(4.)によって、②の割合は23%程度であり、一方、2年に1回の点検を行なうと本報で扱う①の程度も22%程度に達することが予測されている。本報では、まずは①としてとりあげた閉鎖を妨げるシステム自体の異常だけを故障として取り上げ分析し、さらに②及び安全故障とみなしたものの分析を加えることにした。

§ 2 信頼性理論の基礎

2 - 1 信頼性の概念

信頼性に関する研究が本格的に行なわれるようになってからまだ歴史が浅く、第2次世界大戦中に合衆国で電子機器に対して行なわれたものが最初である。そのころの電子機器の故障の多くは真空管の故障が主たる要因であり、また、外地の自軍に向けて長距離輸送する際に気候条件の変化により故障が多発するという問題が生じたため、その品質が問われるようになり、対応策として、信頼性の高い製品を作るために各界で研究が始まったというわけである。以後、電気通信の分野ではもちろんのこと、システム工学、機械工学など他の工学の分野にも大いに活用されている。

信頼性とは、「系、機器、部品などの機能の時間的安定性を表わす度合、または性質」と定義される概念である。これを定量的に表わしたものが信頼度であり、JIS Z 8115では、「系、機器、部品などが規定の条件下で、意図する期間中、規定の機能を遂行する確率」と定義されている。

この信頼度の定義には、以下の5つの要素がふくまれている。

- (I) 系、機器、部品などの対象
- (II) 規定の条件… 周辺環境、使用状況、点検・保全活動の状況
- (III) 意図する期間… 時間、距離、回数、サイクル数
- (IV) 規定の機能… どういった機能の喪失が故障となるか
- (V) 確率

対象には、故障したら修復しながら使用していく一般のシステムや機器のようなものと（これらを修理系と呼び、一般的に、修復された時点で新品と同程度の信頼性をもつものに再生されるという扱いがなされている）、人工衛星のように修理不可能なものや、ボルト・ナットなど故障したら新しいものと交換されてしまう消耗品がある（これらを非修理系と呼ぶ）。修理系では、修理する人の技量といった人間的要素も考慮の対象となる。ここで扱う煙感知器連動防火扉は故障したら修復したり、個々の部品を交換したりして使っていくもので、修理系として扱うことができる。システムや機器は、様々な部品が結合して構成されているため、どの箇所はどういった異常が生じた場合をシステムや機器の故障とみなすかを明確にしておく必要がある。

確率については、扱う対象について（Ⅱ）～（Ⅳ）の要素を明確にしたうえで観測した際に、規定の機能を遂行している割合として表現する。また、対象がシステムである場合には、システムを構成している要素（ユニット）に分解して、それらの機能的関係を基に各要素の信頼度を合成して評価する。

修理系として扱えるものに関しては、故障した場合に、技術面やコストを考慮して修復や部品交換が行なわれる。例えば、船舶のような製品コストの膨大なものは、故障しても簡単には廃棄するわけにはいかず、可能であれば修復を行なって再び良好な状態に戻される。信頼性が物の故障しにくさを示すのに対し、このように故障したものの正常な状態への回復のしやすさを示すのが保全性である。保全性とは、「修理可能な系、装置または機器に備わる保全の容易さを表わす性質」と定義され、これを定量的に表わしたものが保全度であり、JIS Z 8115では「修理可能な系、機器、部品などの保全を、規定の条件下で要求された期間内に終了する確率」と定義されている。非修理系では、故障が起こらないように部品や機器の品質（信頼性）を高めておく必要があり、修理系では信頼性だけでなく修復の容易さ（保全性）も重要になる。

2-2 信頼性理論の基礎事項

系、機器、部品などの信頼性を評価する場合、それらの信頼度関数 $R(t)$ が用いられる。ある対象について、母集団から n 個のサンプルを無作為抽出し、その n 個を規定の条件下で一斉に作動させるとする。 t での残存数を $n(t)$ 、 t までの全故障数を $r(t)$ とすると

$$n(t) = n - r(t) \quad (2-1)$$

信頼度は、時刻 t において動作している個数の割合であるから、信頼度関数 $R(t)$ は次式となる。

$$R(t) = n(t) / n = \{n - r(t)\} / n \quad (2-2)$$

次に、ある時点 t における単位時間 Δt あたりの故障確率 $f(t)$ を考える。故障数を $\Delta r = r(t + \Delta t) - r(t)$ とすると、

$$\begin{aligned}
 f(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta r / r \Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [\{ r(t+\Delta t) - r(t) \} / n \Delta t] \\
 &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [- \{ n - r(t+\Delta t) \} + \{ n - r(t) \}] / n \Delta t \\
 &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [\{ -R(t+\Delta t) + R(t) \} / \Delta t] \\
 &= - [dR(t) / dt] \qquad (2-3)
 \end{aligned}$$

一方、 $R(t)+F(t)=1$ となる不信頼度関数 $F(t)$ を考えると、式(2-4)に示すように、 $F(t)$ の分布関数に対して、 $f(t)$ は確率密度関数の関係となっている。 $f(t)$ を、特に故障確率密度関数という。

$$f(t) = dF(t) / dt \qquad (2-4)$$

次に、時点 t における残存数 $n(t)$ に対する単位時間 Δt あたりの故障確率 $\lambda(t)$ を考えると、式(2-5)となり、 $\lambda(t)$ を故障率関数という。

$$\begin{aligned}
 \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [\Delta r / n(t) \Delta t] \\
 &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [\Delta r / (n \Delta t)] / [n(t) / n] \\
 &= f(t) / R(t) = - [dR(t) / dt] / R(t) \qquad (2-5)
 \end{aligned}$$

$\lambda(t)$ は人間の死亡に例えれば、40歳なら40歳まで生きてきた人のうち、次の1年(単位時間)にどれだけの割合が死亡するかを表わし、ある年齢での死亡率に相当する。また一般的には、使用開始からある時点 t まで故障しなかった部品や機器、すなわち年齢 t の部品や機器が t と $t+\Delta t$ の間で故障する確率に相当する。

故障率関数 $\lambda(t)$ が与えられた時、信頼度関数 $R(t)$ は $\lambda(t)$ を t で積分したものをを用いて求め、式(2-6)として表わされる。

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) dx\right] \qquad (2-6)$$

以上は非修理系の場合で、 t として部品の寿命をとったが (Time to Failure: T T F)、修理系の機器では t として故障間時間 (Time between Failure: T B F) をとる。極端な場合、観測期間を長くすれば、1台の機器で T B F を観測できる。機器中の部品が故障すると修復して新品同様の状態に戻すという条件の下で運転を続けていくと、機器の T B F はランダム化し、故障率が一定値に近づくものもあり、その場合にはたいてい指数分布に従うと言われている。

保全性における保全度は、保全のしやすさを表わす確率であり、保全度関数 $M(\tau)$ は信頼度関数と同様に、 $\tau=0$ で全部故障であったものが τ 時間経過するうちに何パーセント正常状態に修復されているかを表わす累積確率として定義される。形のうえでは、 t 時間経過するうちに累積何パーセント故障しているかという不信頼度関数 $F(t)$ に対応している。

また、 $R(t)$ の特徴をとらえる指標の1つとして、 $R(t)$ を積分して求められる平均値があり、非修理系では平均故障寿命 (Mean Time to Failure: M T T F)、修理系では平均故障間時間 (Mean Time between Failure: M T B F) とそれぞれ定義されている。

$$M T T F \text{ (or } M T B F) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2-7)$$

2-3 信頼度関数の分布形と故障率のパターン

部品や機器の故障率が一定でない場合、容易に信頼度の関数形を定めることができないが、そういう場合でも信頼度関数に適用できると言われているのがワイブル分布である。文献によると、スウェーデンの物理学者ワイブル (W. Weibull) は、1939年に材料の破壊強度の分布を表示するために、この分布を提唱し、その後真空管 (Kao, 1959)、ボールベアリング (Lieblein & Zelen, 1956)、絶縁体 (Nelson, 1972) など、広範囲にわたる寿命データへの適用が示され、今日では寿命モデルを代表するものであるとされている。信頼度関数 $R(t)$ と故障密度関数 $f(t)$ は以下のように表わせる。

$$R(t) = \exp[-t^m/t_0] \quad (2-8)$$

$$f(t) = m(t^{m-1}/t_0) \exp[-t^m/t_0] \quad (2-9)$$

($t \geq 0, t_0 > 0, m > 0$)

m を形状母数といい、その値によって以下のような性質が示される。

$m < 1$ のときが故障率減少形で、複数の部品を一斉に使い始めた当初、故障の原因となるような欠陥をもったものが故障を起こし、時間の経過とともにその数が減少し、故障しにくい高信頼のものだけが残るような場合である。このような部品には、使用に先だってスクリーニング (screening)・エージング (aging) やならし動作を行ない、初期の高故障率のものを取り除き、良品だけを選び出すことが有効である。この安定化の過程を、デバッキング (debugging) と呼ぶ。またこの場合、事前取り換え (予防保全、Preventive Maintenance: PM) を施すことは無意味である。

$m = 1$ のときが故障率一定形で、このときの故障の分布を指数分布と呼ぶ。デバッキングを完了して、機器が安定期にはいると、故障率関数が時間に関して一定とみなしてよく、また非常に多くの構成要素をもち、そのうちのどの1つの故障も機器としての故障を招くものも、部品の故障の度に修復や交換を繰り返すと、やはり故障率関数が一定とみなされることがよく知られている。この場合、いつ、どの時点で故障が起こるかは、全く偶発的であって予測できない。

また、 $m > 1$ のときは故障率増加形で、ボールベアリングなどの機械部品の摩耗、人間の老化現象に見られる。いわゆる物の寿命が来るといのは、この形を指している。この形の故障は、摩耗や老化により、あるところで集中的に故障する特徴をもっており、正規分布が使われることもある。故障が集中的に起こる前に事前取り換えを施すことが有効である。

長期間にわたる故障率の変化を表わすものとしてbath-tub curveがある。初期の故障率減少形の時期を初期故障期、その後の故障率一定の時期を偶発故障期、故障率増加形の時期を摩耗故障期と呼ぶ。人間の死亡率がこれに当てはまる。それぞれの時期については前述のとおりである。

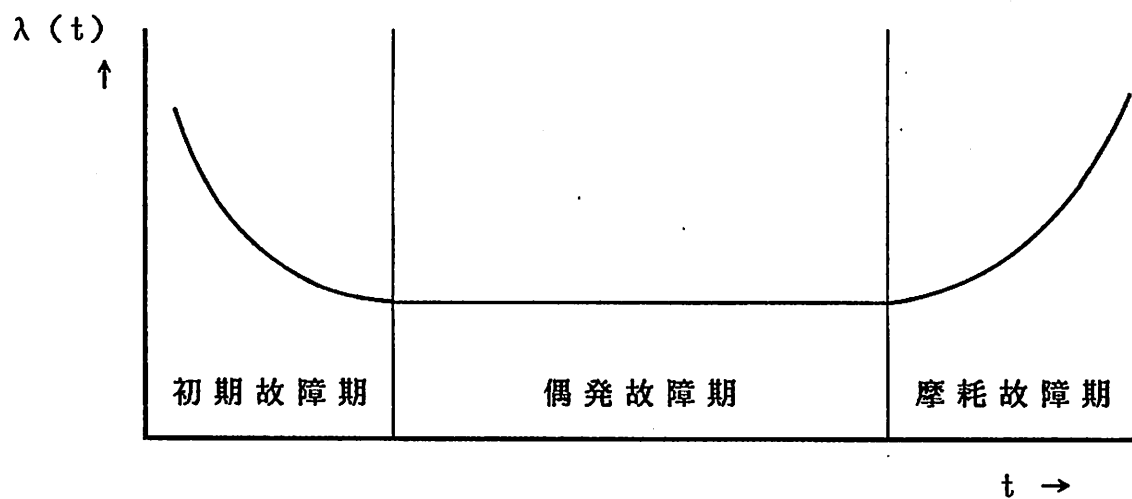


图 2 - 1 . bath-tub curve

§ 3 故障データの解析

3-1 データの分類

信頼性を解析する際に用いるデータは、観測時間を無限大にとることが望ましいが、実際には不可能であり、長くても何十年しか使用されないであろう建築物の中に取り付けられている防火扉については、限られた時間しか観測することができない。また現実には、観測ということだけを目的として、サンプルを用意して装置をつくり、実際の建物に取り付けられているものと同様な条件の下において試験することは、不可能に近い。そのため実際にデータとして取り扱えるものは、実際の建物内の防火扉の観測記録である。今回は、以下に示す10棟の建物を対象とし、それらの防火扉のメーカーによる点検記録をデータとして採用することにした。

表 3-1. 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

BUILDING NO. 5 SELECT MODE= 1

NO.	KI SHU	SCALE		P	KUG UAI	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	
801	D	1240	1890	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
802	D	1240	1890	1	0	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
803	D	1230	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
701	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
702	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
601	D	1240	1885	1	0	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
602	D	1240	1885	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 3 - 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。

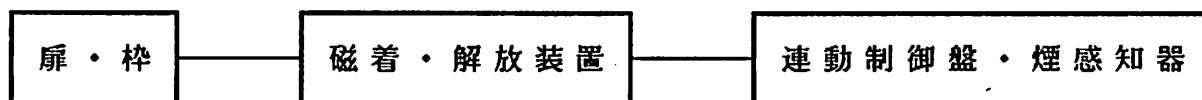
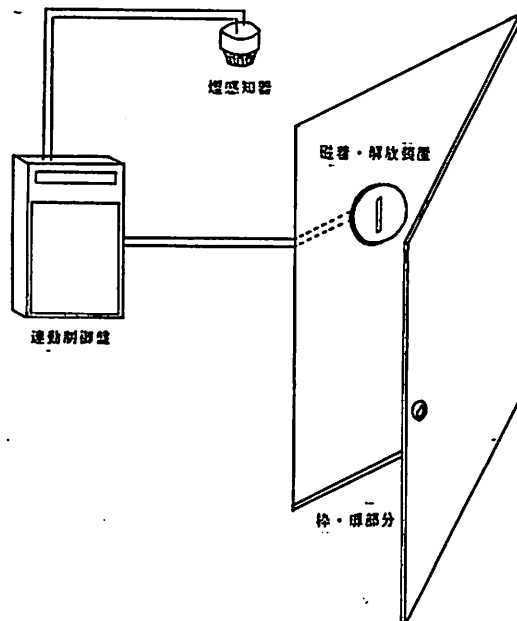
7) 異常の種類

点検時に発見された異常を、火災時に扉が閉まらなくなること、システム内の部品や機器の異常であること、という以上2つの条件をともに満たすかまたはそうでないかということをもとに判断の基準として故障モードと異常モードに分け、次の表のように分類した。

表 3 - 2 . 故障及び異常の種類

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

さらに、故障データの絶対数が少ないため、以下のようにシステムを3つのユニットに分けて、それぞれの故障を、A & B (枠・扉部分の不良 (変形損傷、閉鎖トルクの不足))、F (磁着・解放装置の不良)、G & I (連動制御盤・煙感知器の不良) とする。

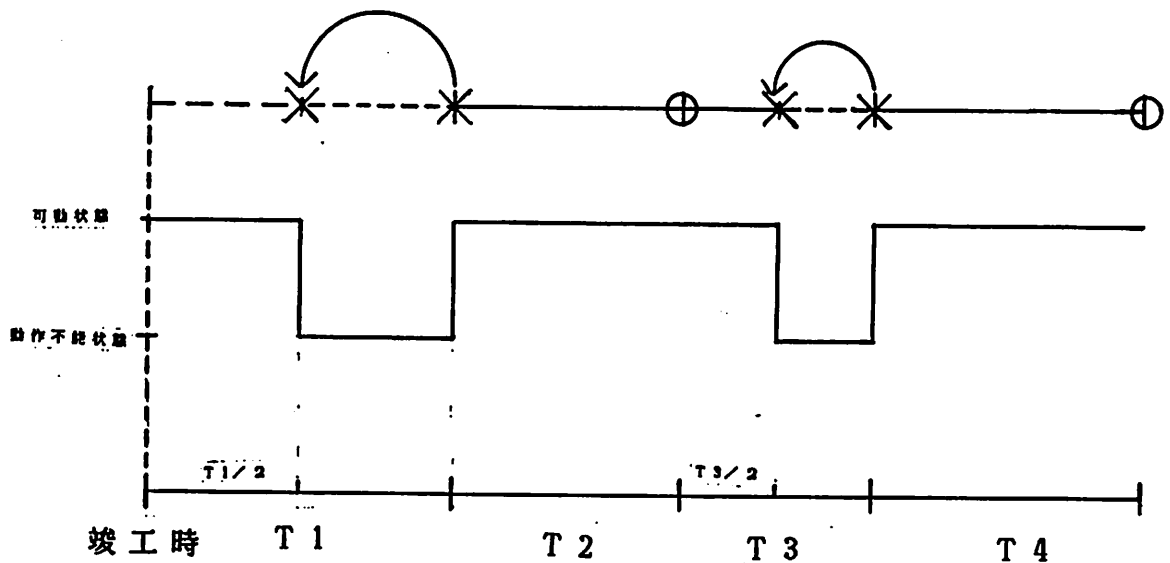


・ 図 3 - 2 . 煙感知器連動防火扉のシステムダイヤグラム

3-2 故障データの解析

3-2-1 データの取り扱い

一般にフィールドデータと呼ばれるものは、データ自体が不完全であるものが多い。ここで扱っているデータも、竣工時から初回点検時までの期間及び点検と点検の間の期間については、情報が欠落しているため、異常が発生した時点も不明確である。従って、初回点検時に発見された異常は、竣工から初回点検までの期間の中間点で発生したものと仮定し、また、ある点検時で異常が発見されず、その次の点検時に異常が発見された場合には、その2回の点検の間で異常が発生し、点検時に即座に修復・交換されるものと仮定した。異常が発生した要素全てに対して修復・交換が行われ新品同様の状態に戻されるが、故障していないものに関しては注油程度の処置が行われるだけで、修復・交換はなされないものとする。



T_i : 点検間隔 ($i=1,2,3,4$)

図 3-3 . データの取り扱い

3-2-2 ワイブル分布のパラメータ推定

データを解析する際に、そのデータの分布がわかっているものに関しては、理論分布にあてはめて解析を行ない、得られたパラメータからその分布形を推定する。しかし今回の場合、対象物によっては故障がどのような分布をするか不明なものが多いため、適用範囲の広いワイブル分布を仮定し、以下に示す方法によって各種のパラメータを推定することにした。

前述の信頼度関数 $R(t)$ を表わす式と 2-2 で用いた記号を使って、累積ハザード関数 $H(t)$ を次式のように定める。

$$\begin{aligned}
 H(T) &= \int_0^T \lambda(x) dx \\
 &= \int_0^T \left[\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \{ r(t+\Delta t) - r(t) \} / n(t) \Delta t \right] dt \\
 &\approx \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_0^T \sum_i^{\Delta t} \{ r(t_i + \Delta t) - r(t_i) \} \Delta t / n(t_i) \Delta t \\
 &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_0^T \sum_i^{\Delta t} \{ r(t_i + \Delta t) - r(t_i) \} / n(t_i) \quad (3-1)
 \end{aligned}$$

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 時間後までに k 個故障したとすれば、

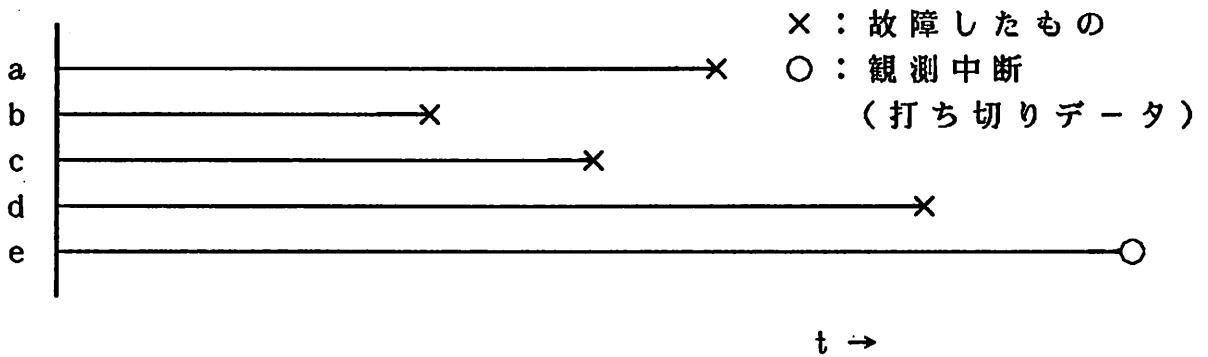
$$\{ r(t_i + \Delta t) - r(t_i) \} / n(t_i) = 1 / n(t_i) \quad (3-2)$$

となる t が k 個あるはずである。

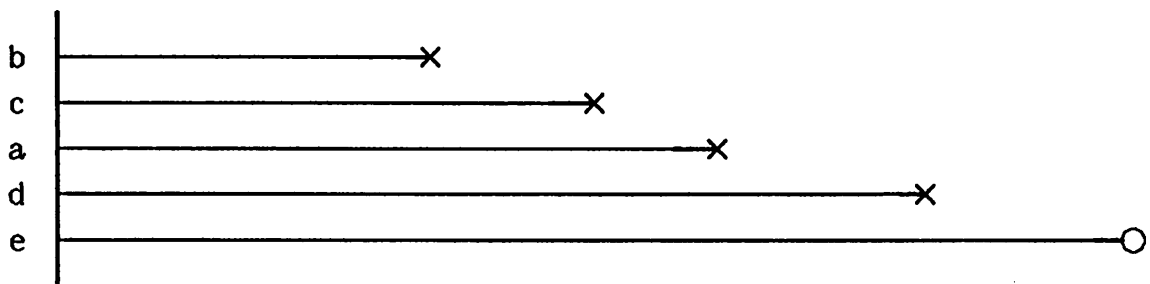
従って、 $n_i = n(t_i)$ (i : t における残存数) とすると

$$H(T) = \sum_{i=1}^k 1 / n(t_i) = \sum_{i=1}^k 1 / n_i \quad (3-3)$$

これについて次に示す故障データ例を用いて具体的にその手順を述べる。



まず、このデータを次の図のように故障間時間 (or 故障寿命) の短いものから順に並べる。



ここでは、サンプル数が5個であるから

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

⋮

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

このようにして $H(t)$ を求める方法が、累積ハザード法である。
また、ワイブル分布の信頼度関数においては、

$$H(t) = \int_0^t \lambda(x) dx = t^m / t_0 \quad (3-4)$$

従って、

$$\begin{aligned}\ln H(t) &= \ln(t^m / t_0) \\ &= m \ln t - \ln t_0\end{aligned}\quad (3-5)$$

また、 $\eta = t_0^{1/m}$ とすれば (η : 特性寿命)、

$$\ln H(t) = m(\ln t - \ln \eta) \quad (3-6)$$

ワイブル形累積ハザード紙は、縦軸が $\ln H(t)$ 、横軸が $\ln t$ となっている。前述の累積ハザード法により、データから得られた全ての故障間時間 (or 故障寿命) t に関して $H(t)$ が求められ、それによってデータプロットすると、ワイブル分布に従うものであればほぼ直線になり、これによって以下に示すパラメータを求めることができる。

1) 形状パラメータ m :

故障の形状を表わす母数である (m の値による故障率の形は前述のとおりである)。 m は ($\ln H(t)$ の増分 / $\ln t$ の増分) で求められる。

2) 尺度パラメータ t_0 :

寿命を表わす母数で、 $H(t) = t^m / t_0$ より $t_0 = 1 / H(1)$ であるから、データに当てはめた直線が $t=1$ の縦軸と交わる点の $\ln H(t)$ の値から $1 / H(1)$ を求めることによって値が得られる。

3) 特性寿命 η :

時間を表わす母数で、データに当てはめた直線が $\ln H(t)=0$ の横軸に交わる点の t の値。

データは、観測時間を竣工から2800日のところで打ち切って、それまでに発生した故障に関しては、1枚の扉で何回故障が起きていてもその前後に発生した故障に対して独立であるとみなし、故障1件1件について故障間時間を取り上げ、観測中断データに関しては、竣工から1度も故障が起こらなかったものだけを取り上げた。

また、データプロットにあてはめる直線として、最小2乗法による回帰直線を用いることにした。

この場合扱うのは1次直線であるから、仮に $y = a x + b$ とおく。実際にプロットされたものに関して、 $X=X_i$ とした時の y の値 Y_i とあてはめる直線の y の値との間には ε_i という差がある。従って、

$$\varepsilon_i = Y_i - (a X_i + b) \quad (3-7)$$

すべてのデータプロットに関してその2乗をとり、その総和を最小にするような a と b を決めるのが最小2乗法である。

その場合の条件として、 $S \varepsilon = \sum \varepsilon_i^2$ とすると

$$\partial S \varepsilon / \partial a = 0 \quad , \quad \partial S \varepsilon / \partial b = 0 \quad (3-8)$$

これによって a , b を求め、代入すると、実際には

$$y = \bar{y} + S_{xy} (x - \bar{x}) / S_{xx} \quad (3-9)$$

$$\begin{aligned} \bar{x} &= (\sum x_i) / n \quad , \quad \bar{y} = (\sum y_i) / n \quad , \\ S_{xx} &= \sum (x_i - \bar{x})^2 / n \quad , \\ S_{xy} &= \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / n \quad (n \text{ はプロット数}) \end{aligned}$$

不規則変数 X が従う分布の期待値 μ 、分散 σ^2 は、その確率密度関数 $f(x)$ を用いて次式のように定義される。

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - \mu^2 \end{aligned} \quad (3-11)$$

式(3-10)よりMTBF (or MTTF) は、 t または η 、及びガンマ関数 $\Gamma(x)$ を用いて次式によって求められる。

$$\begin{aligned} \text{MTBF (or MTTF)} &= t_0 \Gamma(1+1/m) \\ &= \eta \Gamma(1+1/m) \quad (3-12) \end{aligned}$$

また式(3-11)より、 $f(t) = (m/t_0) t^{m-1} \exp(-t^m/t_0)$ である場合の標準偏差 σ は次式となる。

$$\sigma = \eta \{ \Gamma(1+2/m) - \Gamma^2(1+1/m) \}^{1/2} \quad (3-11)$$

ガンマ関数 $\Gamma(x)$ は、次式で表わされるものである。

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (3-12)$$

また、以下の3つの性質がある。

$$\Gamma(x+1) = x \Gamma(x)$$

$$\Gamma(x) = (x-1)! \quad (x \text{ が自然数の場合のみ})$$

$$\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi} \quad (3-13)$$

3-2-3 故障間時間の度数分布

故障間時間については、後述の補遺に委ねるとして、図3-4のように、縦軸に相対度数、横軸に故障間時間を取り、各故障モード毎に度数分布を作成する。

一方、 $R(t) = \exp(-t^m / t_0)$ と定義したので、

$$\ln R(t) = -t^m / t_0 \quad (3-14)$$

従って

$$\ln(-\ln R(t)) = m \ln t - \ln t_0 \quad (3-15)$$

ここで、左辺 = y 、 $\ln t = x$ 、 $-\ln t_0 = a$ とすれば、式(3-15)は $y = mx + a$ となり、 t を故障間時間(ここでは、 $100n - 50 \leq t \leq 100n + 50$ (t : days、 n : 自然数)となる t を、すべて $t = 100n$ とした)、 $R(t) = (1 - (\text{その時点までの故障数} / \text{全度数}))$ として (x, y) を求め、前述の最小2乗法を用いて m 、 a を求め、累積ハザード法による解析結果と比較する。

3-2-4 システム全体のMTBF

煙感知器連動防火扉という1つのシステムは、扉・枠、磁着・解放装置、連動制御盤・煙感知器という3つのユニットが直列に結合して構成されている。直列システムとは、システムを構成するユニットのうちのいずれかが故障すれば、システムの故障と見なされるものである。

システムが t 時間作動するためには、その間全てのユニットが作動しなければならない。従って、各ユニットの故障が互いに独立であれば、システムの信頼度は次式のようになる。

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3-16)$$

システムのMTTFは、上の式を t について0から無限大まで積分すれば求められるが、たいていは計算が複雑となり求めにくい。しかし、信頼度関数の分布形が指数分布であるとき、つまり $\lambda_i(t) = \lambda_i (= \text{const.})$ である時は、比較的容易であり、 i 番目のユニットのMTTFを T_i とすれば、

$$\begin{aligned} R(t) &= \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right\} \\ &= \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n 1/T_i\right)t\right\} \end{aligned} \quad (3-17)$$

従って、

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = 1 / \left(\sum_{i=1}^n 1/T_i\right) \quad (3-18)$$

特に、全ての i に関して、 $T_i = T_0 (= \text{const.})$ ならば、

$$MTTF = T_0 / n \quad (3-19)$$

となる。

3-2-5 解析結果と考察

故障モードであるA & B、F、G & Iの3つについての前述の2つの方法による解析結果は表3-3、3-4に示すとおりであるが、まずA & Bについては、3-2-2及び3-2-3から、故障率増加形であるとみなすことができる。実際に故障の原因を考えると、扉の自重によって回転軸が傾くことやヒンジ部分の劣化は時間の経過とともに進行するものであり、また人為的な原因による枠・扉の変形は偶発的に起こるものとみなすことができる。これらを加味して考えると、故障率は一定もしくは増加形であるという判断ができる。

Fについては、3-2-2及び3-2-3から、故障率減少形とみなすことができる。実際に磁着・解放装置の故障の原因を考えると、永久磁石の磁着能力の低下というものは時間が経過するにつれて磁着面上の錆びや汚れなどにより次第に進行するものであり、またラッチの変形については管理状況の悪化などによって偶発的に起こるものとみなすことができる。また連動制御盤からの信号伝達経路上で信号の伝達を阻止するような異常が発生することに関しては、線材や端子などの腐食が考えられるが、これについては、具体的な原因を把握していないためここでは考慮できない。このような故障についての情報が不足しているため、解析結果に対してなんらかの推定を行なうことをここでは差し控えておく。

G & Iについては、3-2-2及び3-2-3から、故障率増加形と考えることができる。しかし双方とも m が1に近い値であるため、一概には故障率増加形であるという判断が下せない。実際に故障の原因について考えてみると、これについては電子部品の故障が主なものとしてあげられるが、電子部品の故障については、前述のように、部品が初期故障期にあるか、偶発故障期にあるか、または摩耗故障期にあるかによってその故障率の時間変化の様子が異なるため、竣工から2800日の間のいつからいつまでがどの時期にあたるかを把握しておかなければならないが、ここではそれについて判断することができない。

一方、A & B、F、G & Iの3項目について、3-2-2及び3-2-3に於いて求められた m の値を見てみると、3つとも1前後の値であるため、3項目の故障分布に関しては指数分布を仮定する。つまり、3項目に関して故障率が一定であると考えることにする。

その場合の各ユニットのMTBFの値を表3-5に示す。

また、異常モードのうちのエ、Hについても同じ解析を行った。Eについては、3-2-2及び3-2-3から、明らかに故障率増加形であるとみなすことができる。故障の原因について考えてみると、把手や錠は時間の経過とともに次第に劣化して、ある時期が来ると頻繁に故障を起こすものであるという判断ができる。従ってその時期を迎える直前で点検を行ない、故障が発見された場合には交換・修復を行なうことが有効とされる。

Hについては、3-2-2及び3-2-3から、故障率減少形とみなすことができる。閉鎖速度に関しては、ヒンジのJIS規格（JIS A 5543）によって制限範囲があり、速度が大きすぎる場合には、初期に於ける調整ミスが考えられ、また速度が小さすぎる場合には、調整ミス及びヒンジの劣化が考えられる。

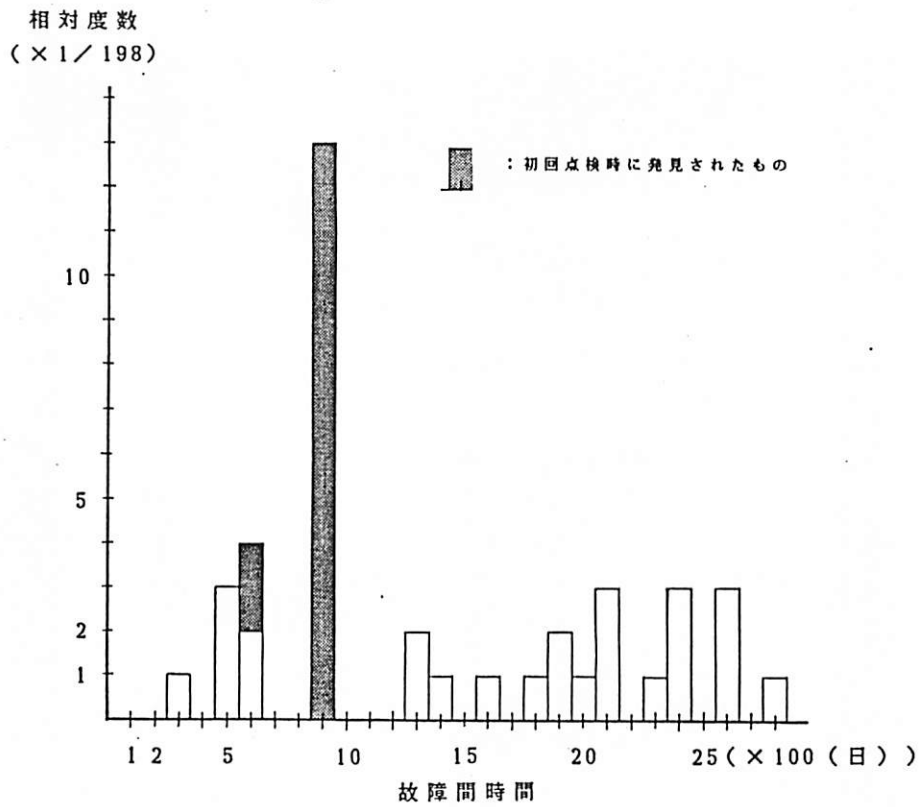


図 3 - 4 . 故障間時間の度数分布 (建物 No. 2 ~ 6 , 9 , 2800日以下)

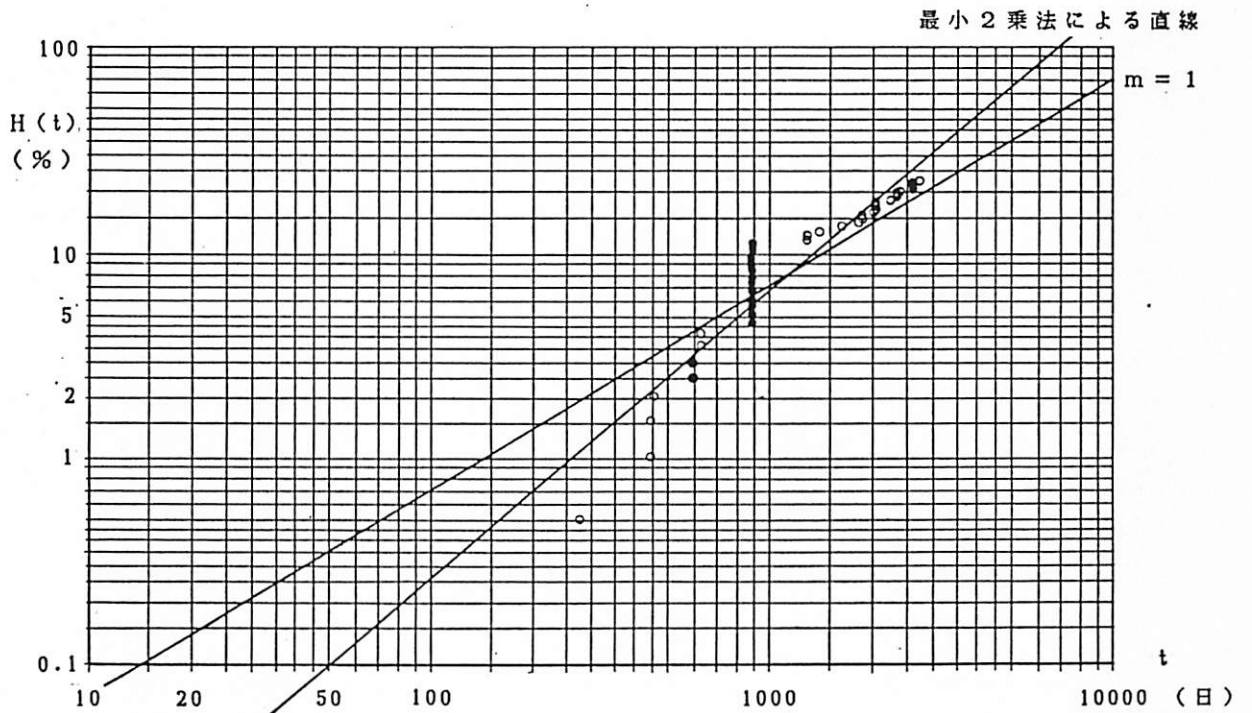
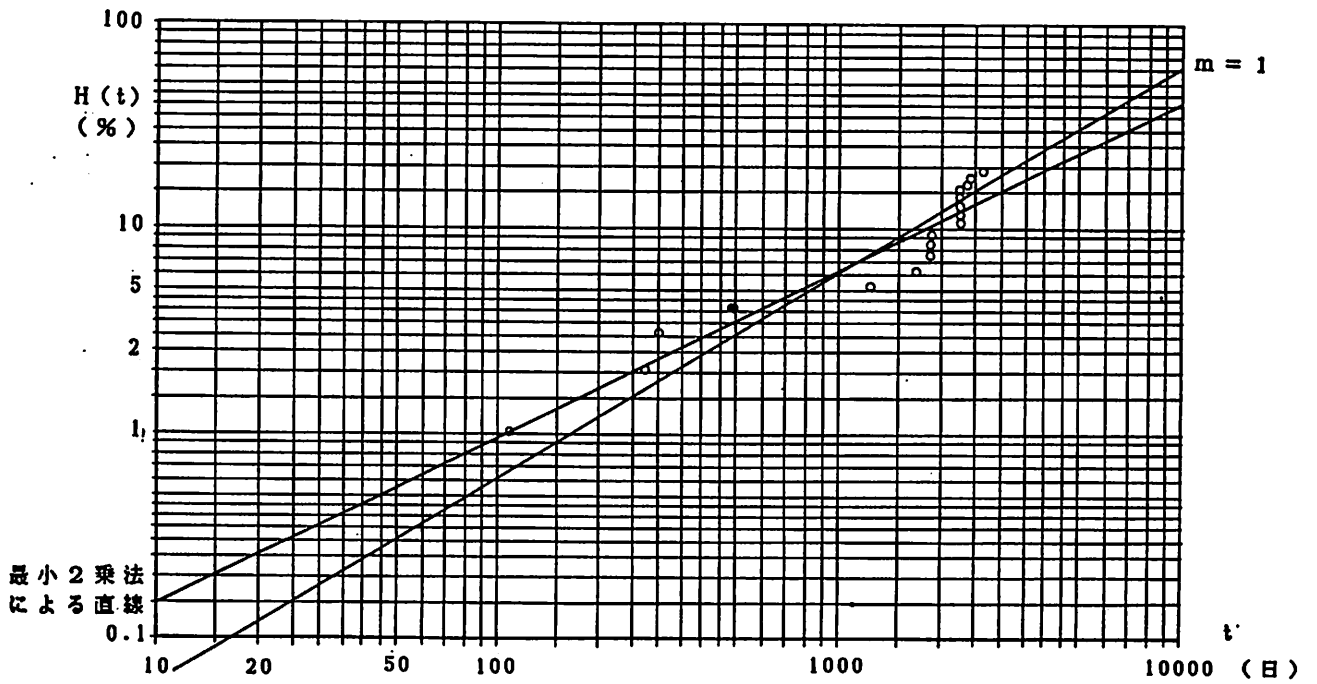
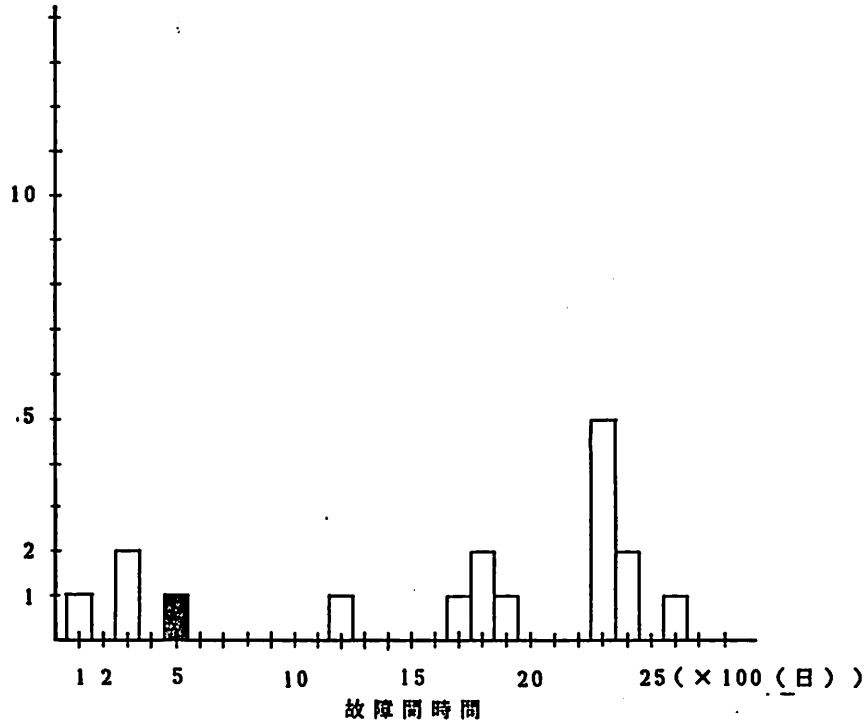


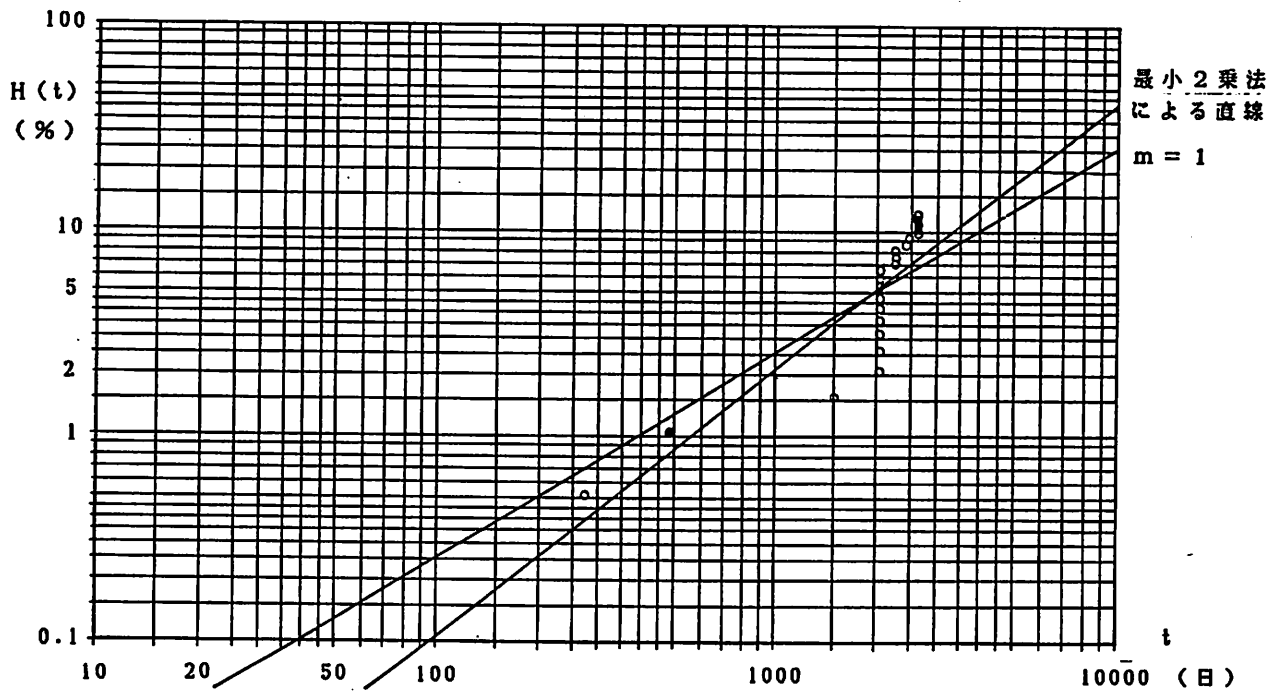
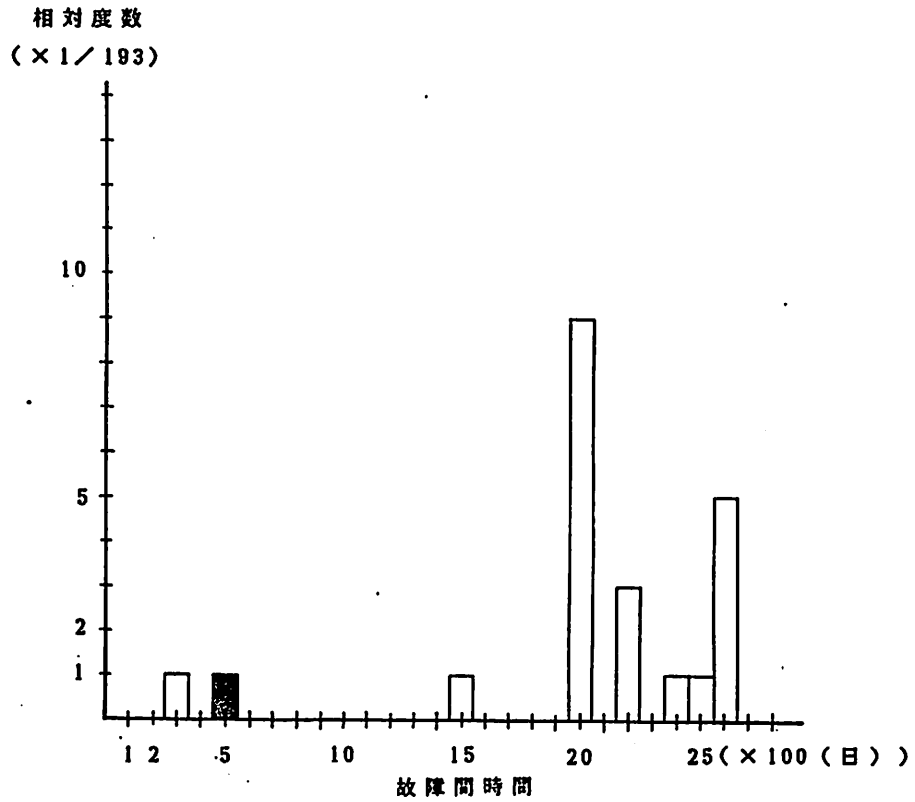
図 3 - 5 . ワイブル形累積ハザード紙へのプロット

A & B) 枠・扉部分の不良 (変形損傷、閉鎖トルクの不足)

相対度数
($\times 1/99$)

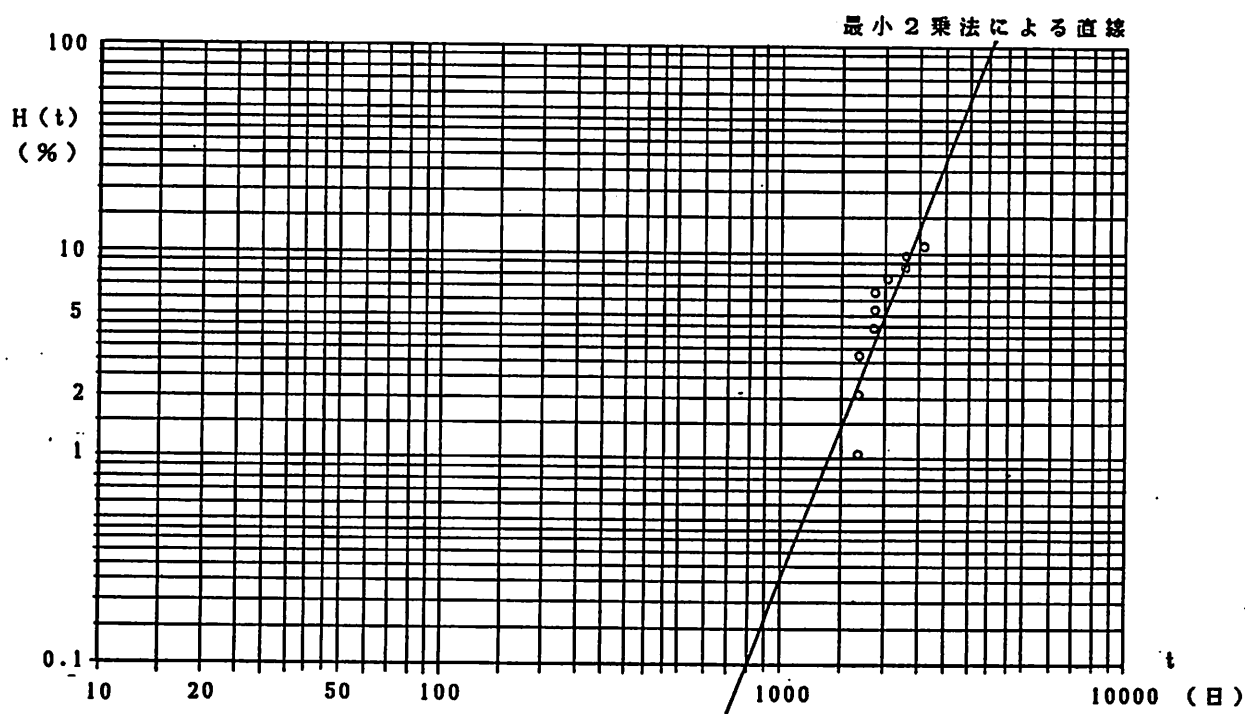
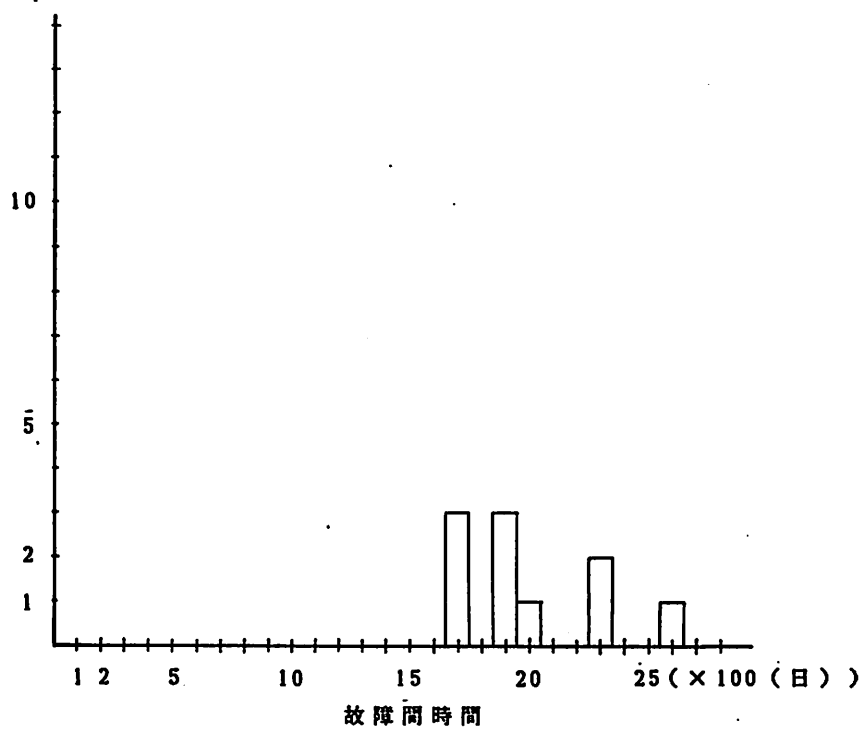


F) 磁着・解放装置の不良



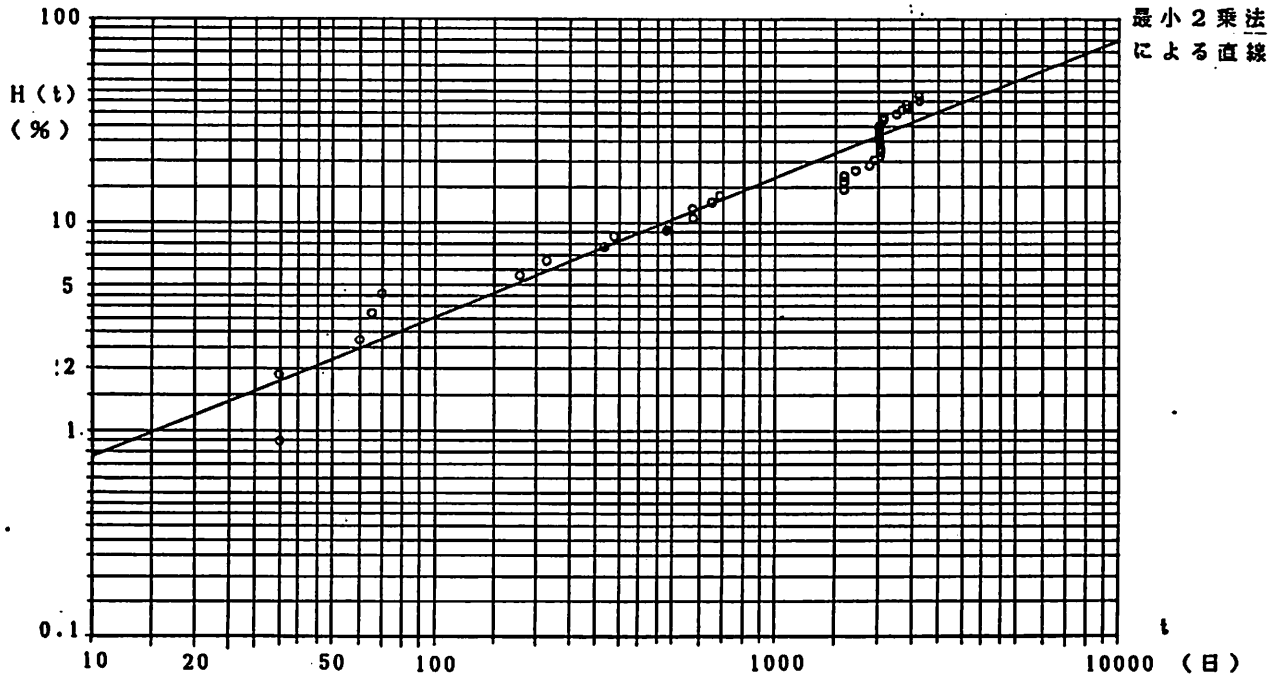
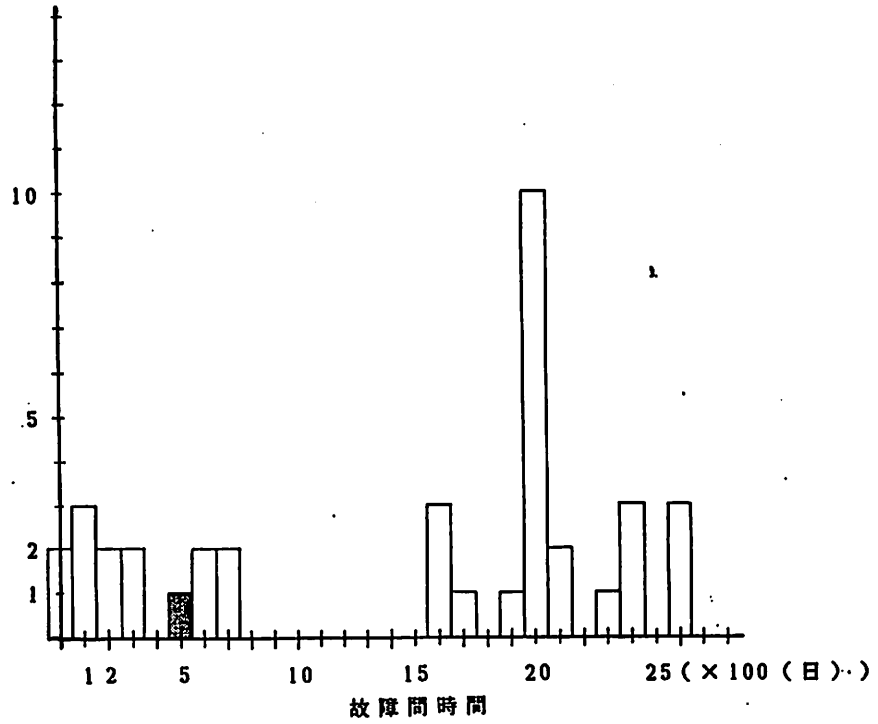
G & I) 連動制御盤・煙感知器の不良

相対度数
($\times 1/96$)



E) 把手・錠の不良

相対度数
($\times 1/109$)



H) 閉鎖状況・速度の不適正

表 3 - 3 . ワイブル形累積ハザード紙によるグラフを用いる方法による解析結果

MODE \	m	η	MTBF(days)	σ
A & B	1 . 4 1	6 8 3 2	6 2 2 4	4 4 6 8
F	0 . 8 2	2 9 9 8 6	3 3 5 8 4	4 1 6 8 1
G & I	1 . 3 0	1 9 3 5 4	1 7 8 8 3	1 3 8 7 7
E	4 . 2 8	3 9 5 5	3 6 0 3	9 3 7
H	0 . 6 7	1 4 0 9 8	1 8 6 0 9	2 8 4 7 8

表 3 - 4 . 故障間時間の度数分布による解析結果

MODE \	m	η	MTBF(days)	σ
A & B	1 . 4 9	6 4 4 7	5 8 2 2	3 9 7 8
F	0 . 7 9	3 2 2 3 0	3 6 9 3 6	4 6 9 5 9
G & I	1 . 1 1	3 4 1 9 8	3 2 8 9 8	2 9 6 5 0
E	2 . 7 1	5 5 4 2	4 9 2 7	1 9 7 3
H	0 . 6 4	1 5 3 5 0	2 1 4 5 9	3 5 1 5 2

表 3 - 5 . 3 - 2 - 2 の解析から得られた m の値を 1 にした場合の M T B F

\ mode	A & B	F	G & I
M T B F (days)	1 4 0 3 4	1 6 6 1 7	3 8 9 9 3

3-3 補足

本章では煙感知器連動防火扉という1つのシステムの信頼度の推定を行った。その結果については3-2-5で述べたとおりであるが、補足として、点検期間中に少なくとも1回は異常が発生した防火扉の枚数を故障モードと異常モードに分けて表3-3に示した。その表から以下の2つのことが言える。

1) 対象とした防火扉159枚のうち、点検期間中に少なくとも1回は故障として扱った異常が発生したものの割合は45%程度であり、また点検期間中に少なくとも1回は異常モードとして扱った異常が発生したものの割合がおよそ36%である。

2) 建物毎に観測期間がそれぞれ違っていて、竣工時が確認されているものの中では(Na7、10を除く8棟)、竣工からここで扱った記録中の最後の点検までの日数が最長のもので3500日弱、最短のもので1200日弱となっているが、例えば観測期間最長のNa9では防火扉15枚のうち、少なくとも1回は故障モードと扱った異常が発生したものは2枚、また異常モードとして扱った異常に関しては0枚であり、一方、観測期間最短のNa1では防火扉20枚のうち故障モードに関しては5枚、異常モードに関しては13枚となっている。Na1とNa9を比較すると、防火扉の信頼度の時間経過による変動の様子が違うことがわかる。従って、点検・保守活動を含めた維持管理状況によってシステムの信頼性の変動の仕方が変わるであろうと考えられる。

また、異常モードE、Hについてはすでに取り上げたが、C、D、Jについても少しふれておく。

まずCについては、Na1とNa6の建物でしか発生しておらず、又、発生頻度も少ないため、ここでは特に言うことがないが、容易にその場で調整できる場合もあることを参考として示しておく。

Dについては、どの扉にもそれについての指摘がなかったため、ここでは考慮しない。

Jについては、§1で②としてとりあげた人為的な閉鎖障害のことを指している。これについては発生頻度が低く、4棟の建物で7枚が指摘を受けただけである。また、1たび指摘を受けると、それ以後この項目について再び指摘を受けることがほとんどない(7枚のうちの1枚だけが2回指摘を受けた)。管理状態が良好であった

のか、もしくは点検の直前に取り払われたのかどうかは不明であるが、理由はどうかであろうと、火災時の閉鎖を目的として設置したものを人間の手で無用の長物にするようなことは避けてもらいたいものである。

表 3 - 6 . 点検期間中に少なくとも 1 回は
異常が発生した防火扉の枚数
a) 故障モード

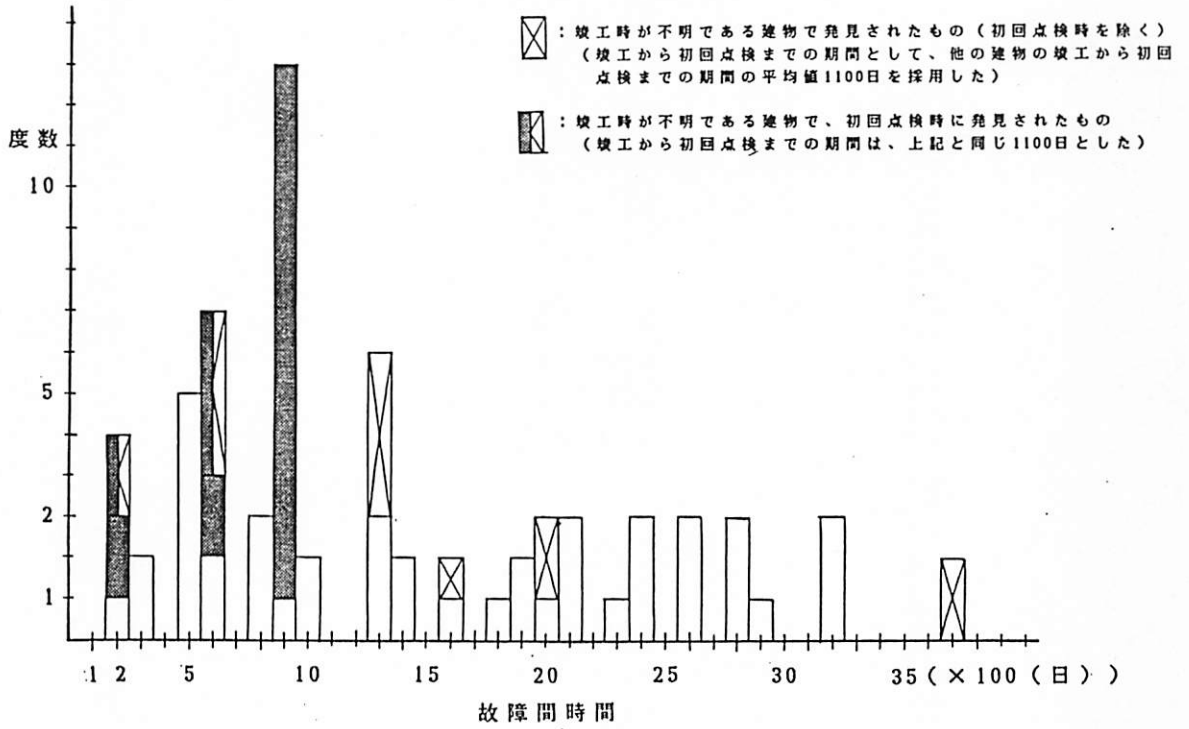
\ mode	A	B	F	G	I	ANY
建物 No 1	3 / 20	3 / 20	0 / 20	0 / 20	0 / 20	5 / 20
2	1 / 10	0 / 10	2 / 10	0 / 10	1 / 10	3 / 10
3	2 / 8	0 / 8	0 / 8	0 / 8	1 / 8	2 / 8
4	1 / 11	1 / 11	2 / 11	0 / 11	0 / 11	3 / 11
5	4 / 17	4 / 17	4 / 17	1 / 17	10 / 17	14 / 17
6	15 / 35	10 / 35	7 / 35	4 / 35	6 / 35	22 / 35
7	10 / 19	1 / 19	6 / 19	2 / 19	2 / 19	14 / 19
8	4 / 20	0 / 20	0 / 20	0 / 20	0 / 20	4 / 20
9	2 / 15	0 / 15	0 / 15	0 / 15	0 / 15	2 / 15
10	1 / 4	1 / 4	0 / 4	0 / 4	0 / 4	2 / 4
合計	43 / 159	20 / 159	21 / 159	7 / 159	20 / 159	71 / 159

注) 分母は扉の総数、分子は点検期間中にあるモードの故障を起こした扉の数を示す。モードが"ANY"の項の分子は、いずれかの故障が少なくとも1回発生した扉の数を示し、(分母-分子)が、5種類の故障が1度も発生していない扉の数を示す。

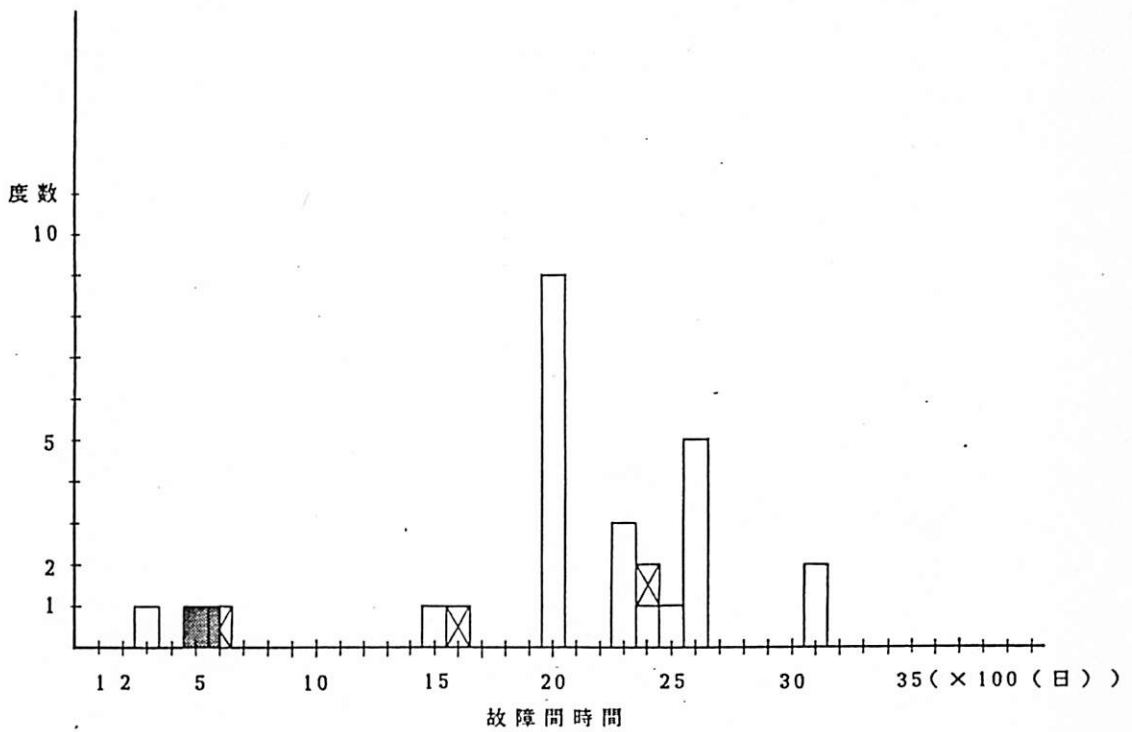
b) 異常モード

\ mode	C	D	E	H	J	ANY
建物 No 1	8 / 20	0 / 20	0 / 20	13 / 20	0 / 20	13 / 20
2	0 / 10	0 / 10	1 / 10	1 / 10	3 / 10	4 / 10
3	0 / 8	0 / 8	0 / 8	6 / 8	1 / 8	6 / 8
4	0 / 11	0 / 11	4 / 11	10 / 11	0 / 11	10 / 11
5	0 / 17	0 / 17	3 / 17	2 / 17	1 / 17	5 / 17
6	4 / 35	0 / 35	4 / 35	11 / 35	2 / 35	16 / 35
7	0 / 19	0 / 19	0 / 19	4 / 19	0 / 19	4 / 19
8	0 / 20	0 / 20	0 / 20	0 / 20	0 / 20	0 / 20
9	0 / 15	0 / 15	0 / 15	0 / 15	0 / 15	0 / 15
10	0 / 4	0 / 4	0 / 4	0 / 4	0 / 4	0 / 4
合計	12 / 159	0 / 159	12 / 159	47 / 159	7 / 159	58 / 159

注) 分母は扉の総数、分子は点検期間中にあるモードの異常を起こした扉の数を示す。モードが"ANY"の項の分子は、いずれかの異常が少なくとも1回発生した扉の数を示し、(分母-分子)が、5種類の異常が1度も発生していない扉の数を示す。

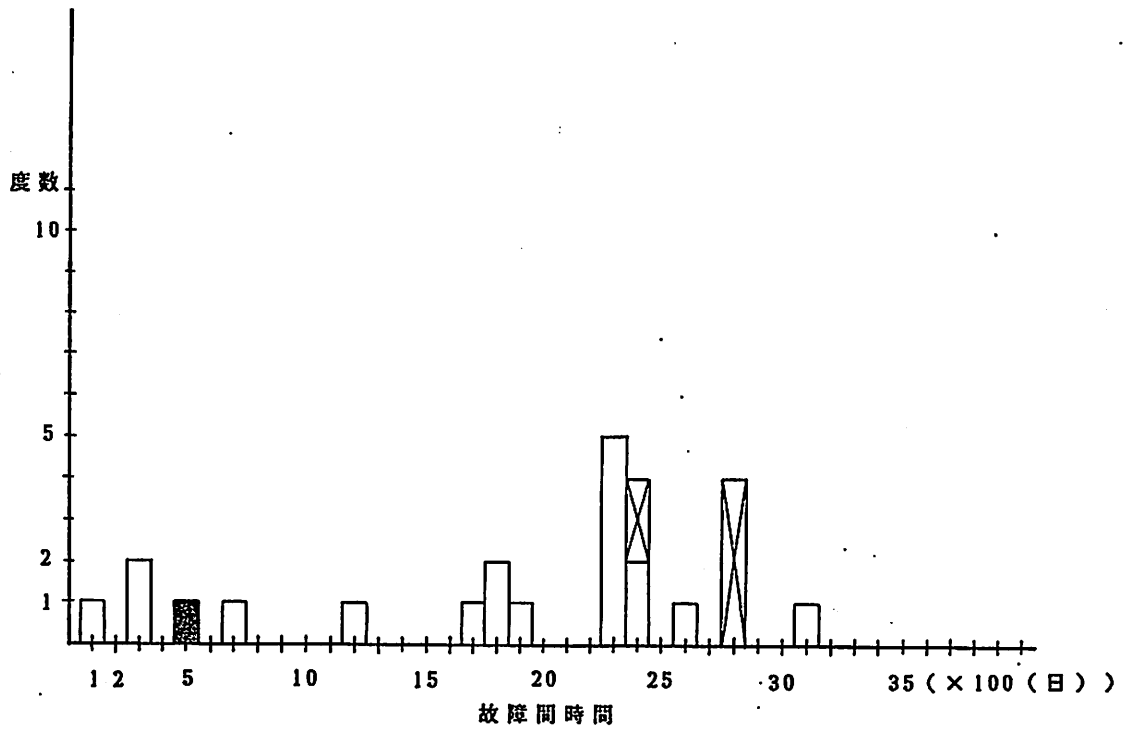


A & B) 枠・扉部分の不良（変形損傷、閉鎖トルクの不足）

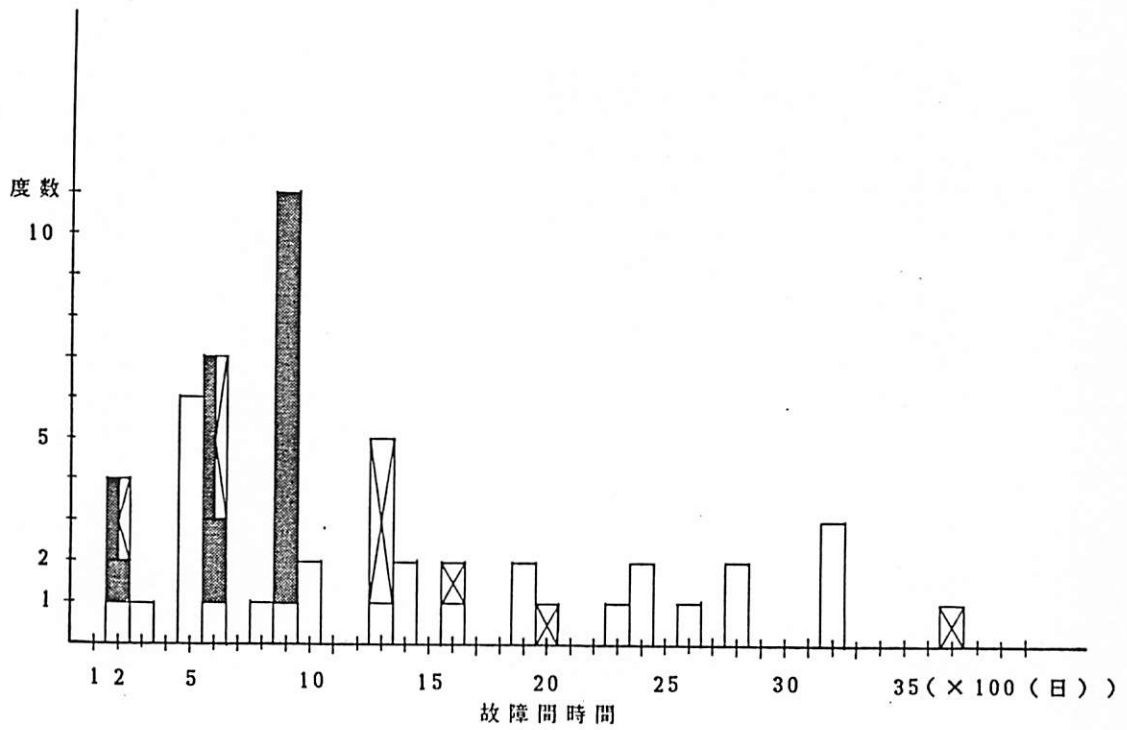


G & I) 連動制御盤・煙感知器の不良

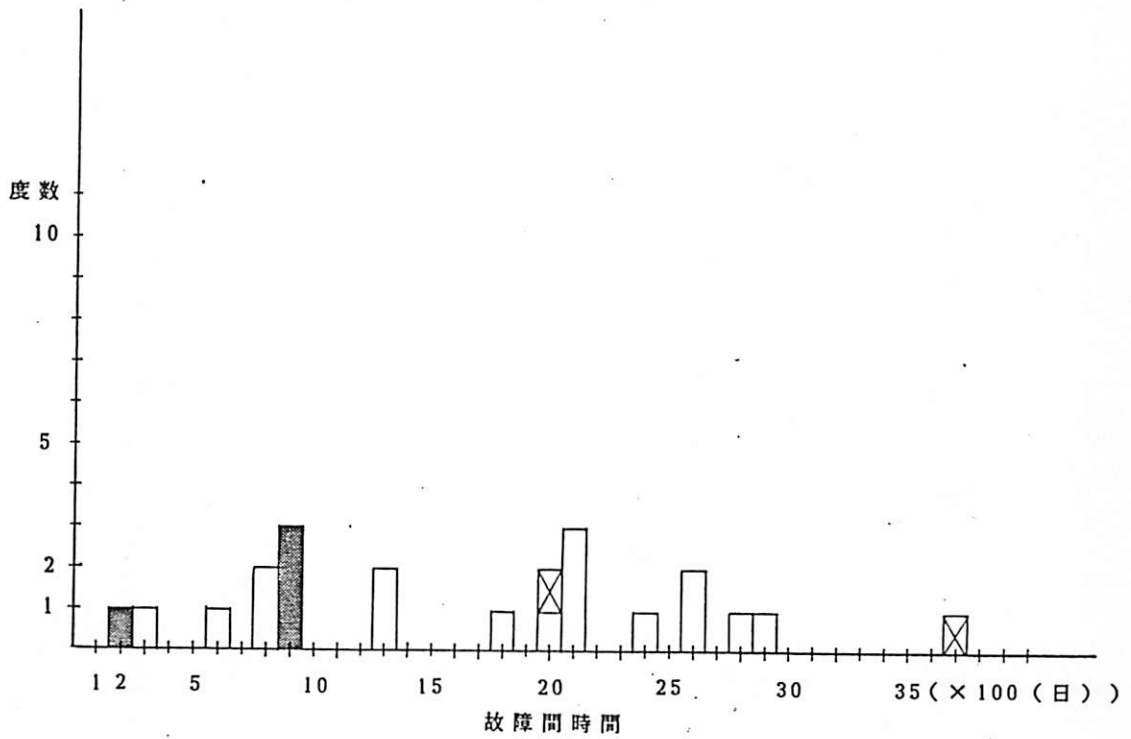
図 3 - 6 . 故障間時間の度数分布（建物 No. 1 ~ 10）



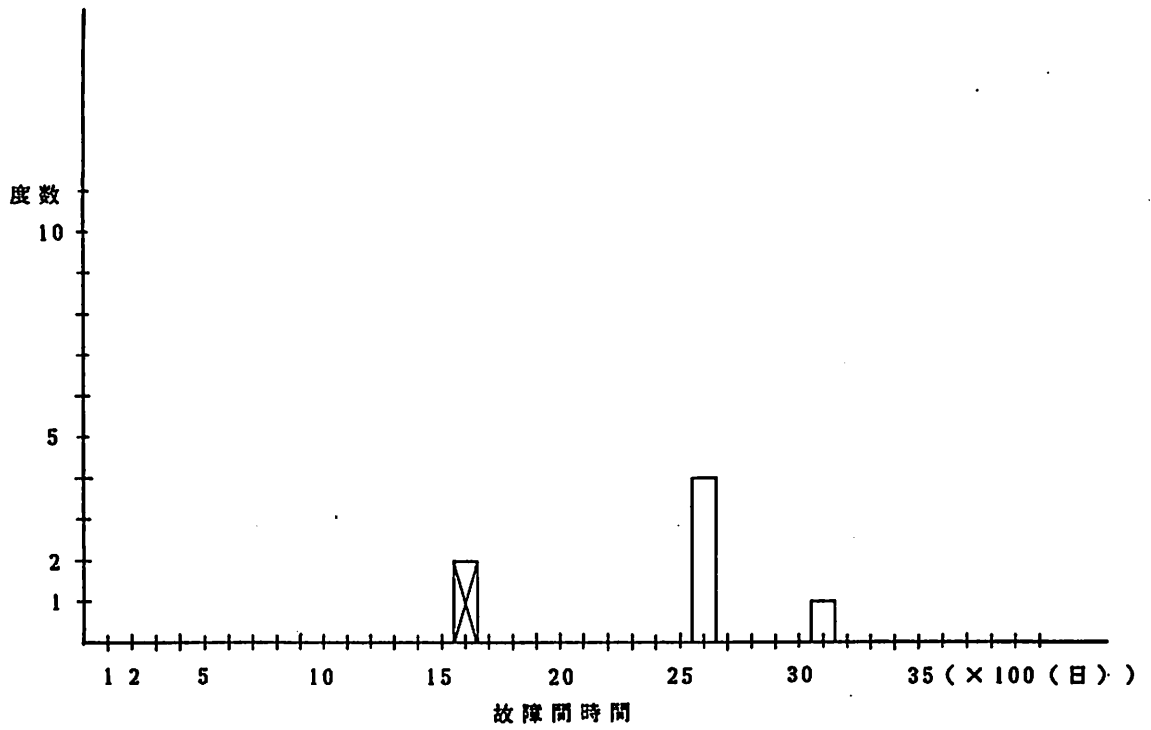
F) 磁着・解放装置の不良



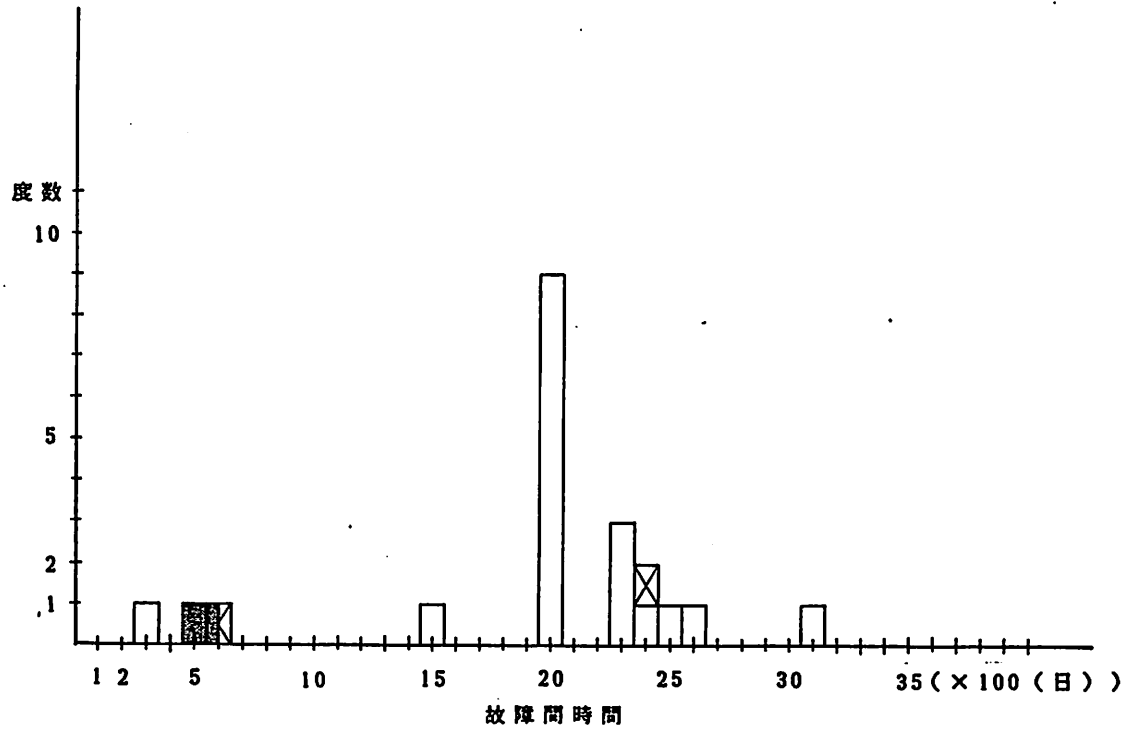
A) 棒・扉の変形損傷



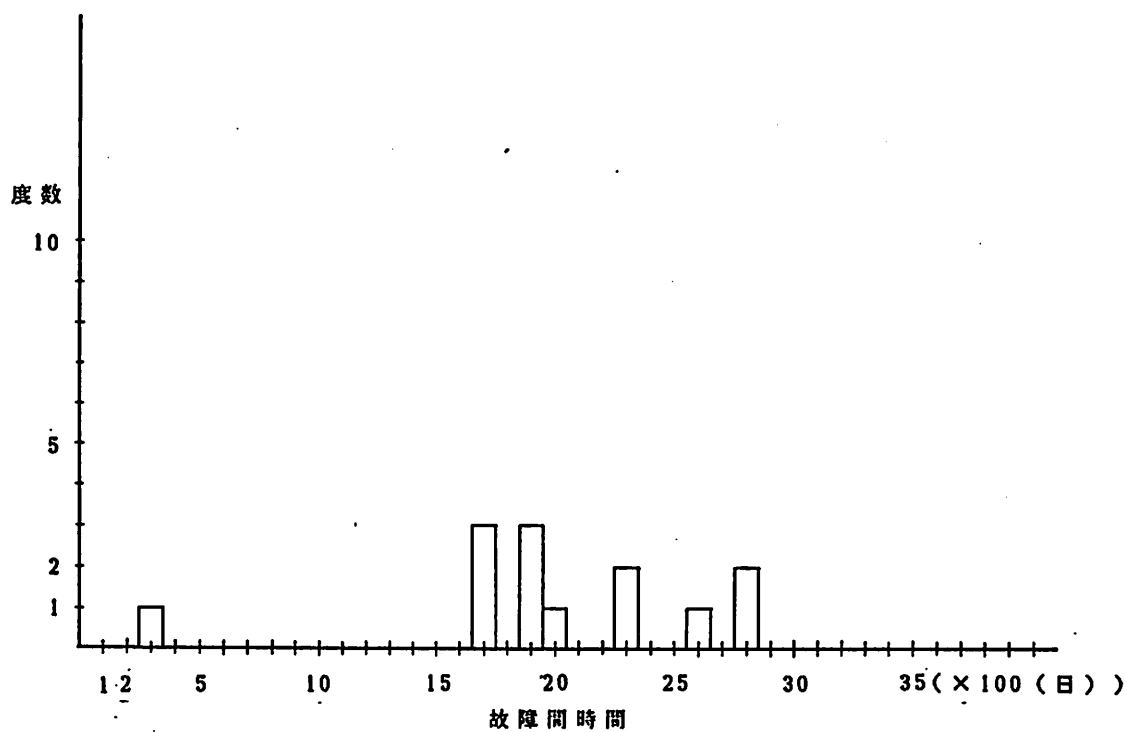
B) 閉鎖トルクの不足



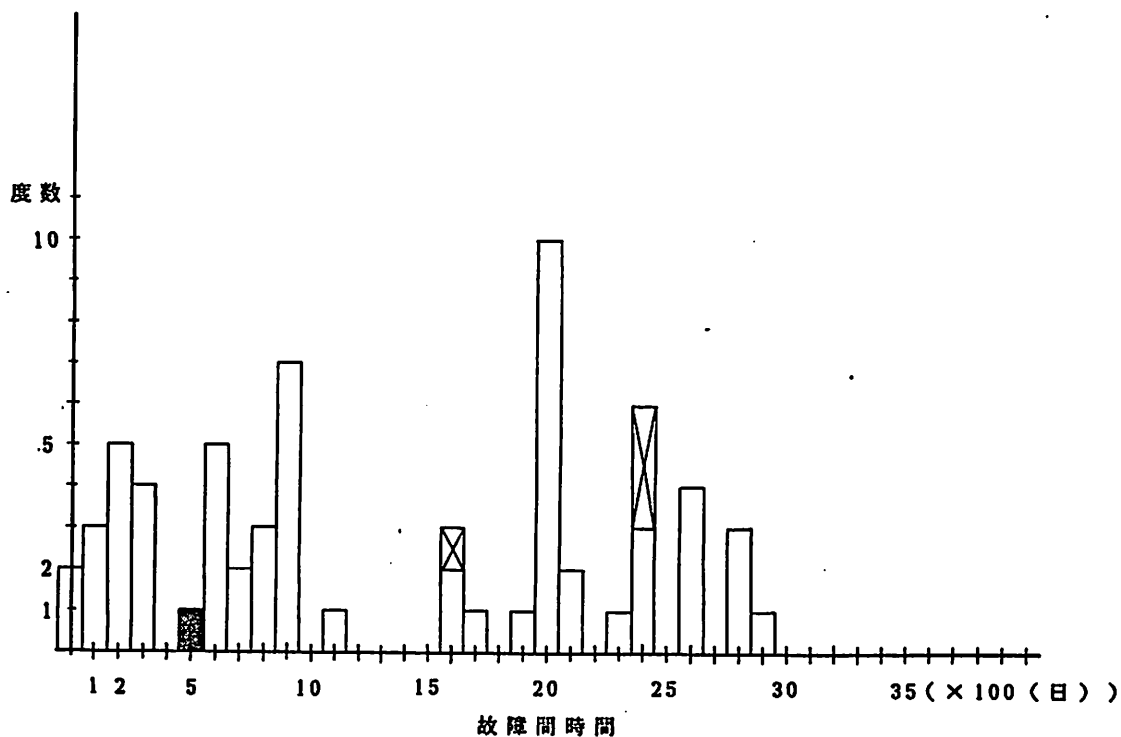
G) 連動制御盤の不良



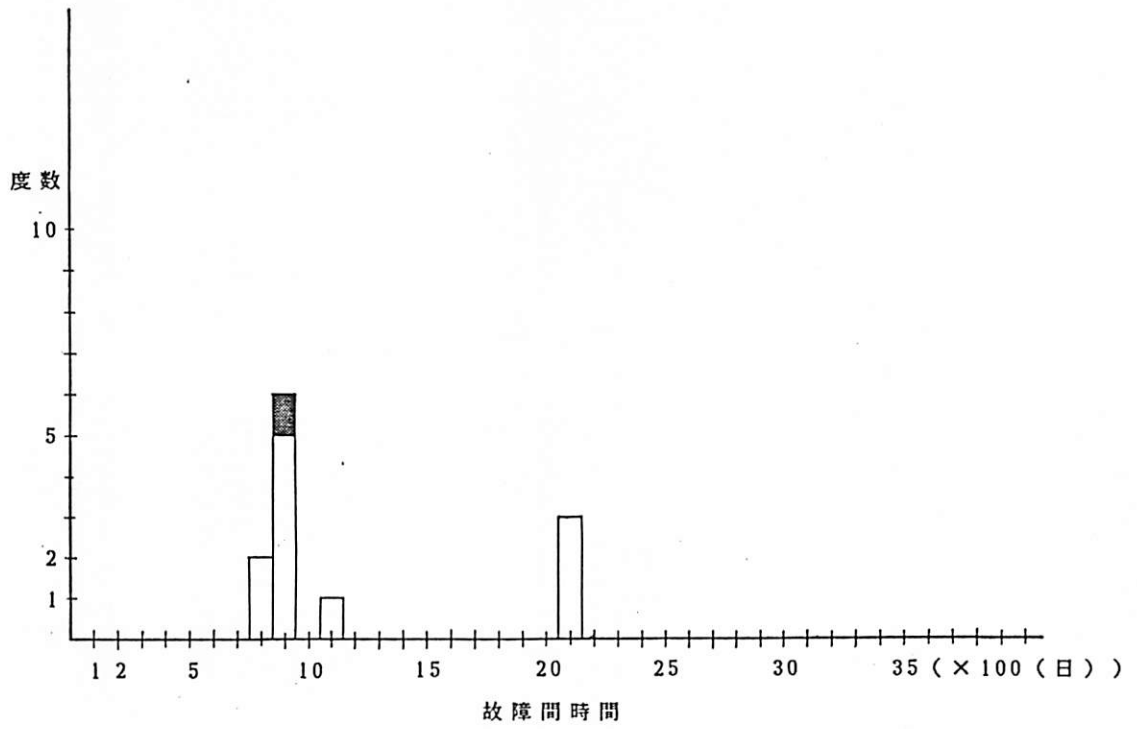
I) 煙感知器の不良



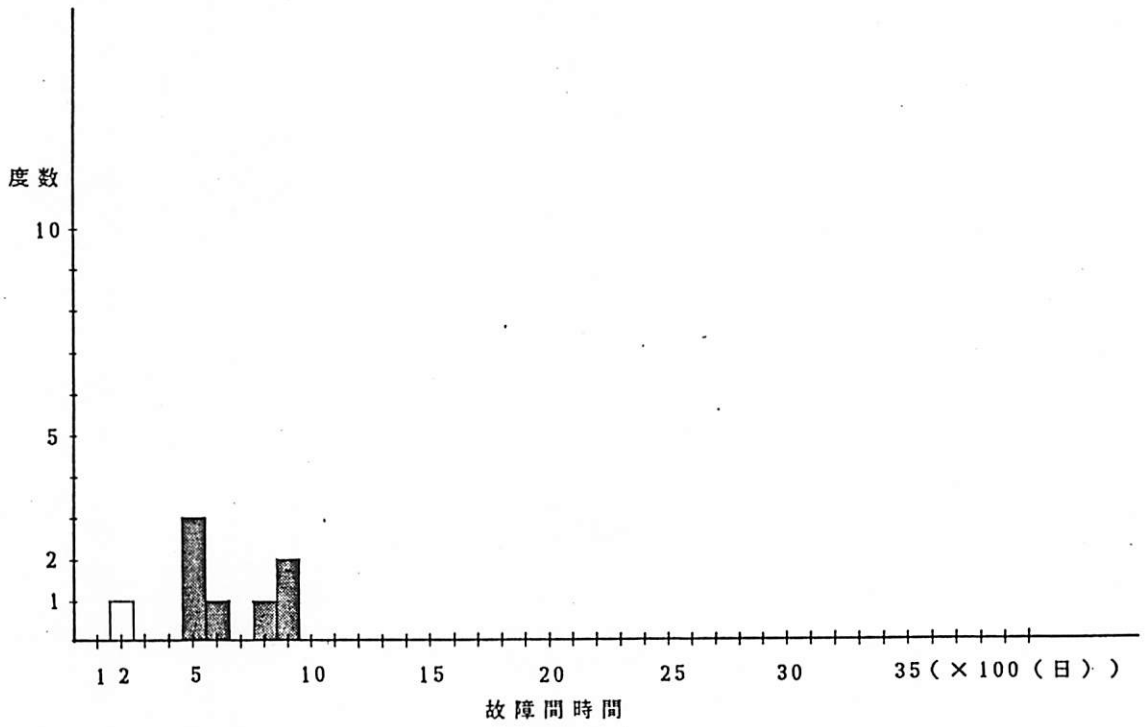
E) 把手・錠の不良



H) 閉鎖状況・速度の不適正



C) 順位調整器の不良



J) 作動線上に障害物が放置される

補遺

データの取り扱いについては3-2-1でも述べたが、その補足として、JIS Z 8115に基づいた本論のデータの取り扱いについてここでは述べることにする。

まず、データの取り扱いを図4-1に示す。

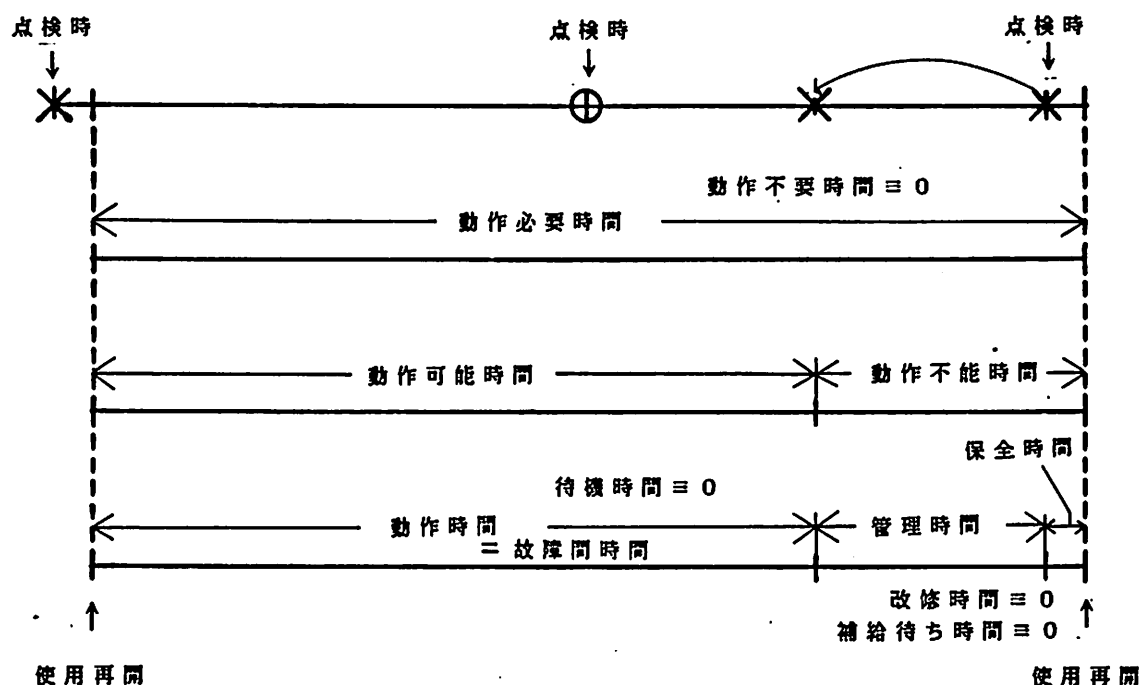


図4-1. JISに基づいたデータの取り扱い

また、図に関する説明は以下のようなになる。

- ・ある時点で故障した煙感知器連動防火扉というシステムの中の要素の修復が完了し作動し始め、次の点検時には故障が発見されなかったが、その次の点検時に故障が発見されて修復によって再び作動するという状況を設定する。なお、故障は点検と点検の間の中間点で発生したものとし、点検によってのみ発見されるものとする。
- ・煙感知器連動防火扉は常に動作することを要求されるため、動作不要時間は0である。
- ・動作可能時間 = (待機時間) + (動作時間) であるが、待機時間 = 0 であるため、動作可能時間 = 動作時間となる。さらに、動作時間 = 故障間時間 (T B F, 修理系の相隣る故障間の動作時間のこと、

また、使用開始後初めて発生した故障については、使用開始時点からその故障が発生した時までの時間を指す)となり、非修理系では故障寿命(TTF, 使用開始から故障を起こすまでの時間)がこれに対応する。ここでは、修復が即座に行われると仮定して修復に要する時間を考慮せず、1枚の扉で何回故障が起きていてもその前後に発生した故障に対して独立であると見なしたため、故障間時間といっても故障寿命に近いものとして扱っている。

・動作不能時間 = (保全時間) + (改修時間) + (補給待ち時間) + (管理時間)であるが、ここでは改修時間 = 0、補給待ち時間 = 0としているため、動作不能時間 = (保全時間) + (管理時間)となる。今回の場合、管理時間の殆どが、故障発生から点検時にそれが発見されるまでの時間であると思なすことができる。

結び

本論において、防火扉の信頼性について分析を行ったが、前述のようにデータが不完全で情報が一部欠落しているため、解析結果がどれだけ信頼できるものかわからない。信頼性に関するデータ解析で重要なのは、解析手法よりもむしろデータの精度である。今後、より精度の高いデータを用いて、同一の手法もしくは別の手法による解析が行われることを期待して、本論の結びとする。

謝辞

本論文を作成するにあたり、終始御指導していただいた 辻本 誠先生 及び 先輩にあたる 朴 哲也氏、西岡史仁氏、又、協力していただいた周囲の方々に対してここに感謝の意を表します。

(参考文献)

1. 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」，1984年度名古屋大学大学院修士論文
2. 松浦・松島：「建築設備の信頼性」(1)～(4)，空気調和・衛生工学 第60巻 第7～10号
3. 三根・河合：「信頼性・保全性の数理」，朝倉書店
4. 森脇・江田：「デパートにおける防火区画の管理上の問題について」，1978年度日本建築学会大会学術講演梗概集・構造系
5. 市田・鈴木：「信頼性の分布と統計」，日科技連
6. 塩見弘：「信頼性工学入門」，丸善
7. L.Cooper：「Why We Need to Test Smoke Detectors」，Fire Journal Nov.1986