

# **建築物の出火率と防災設備の故障率 に関する統計的研究**

**朴 哲也**

# 論文の概要

本論文は、建築物の火災安全性を信頼性理論の視点から評価する際の基礎資料となる、建築物の出火率及び防災設備の故障率を、実地に得られるデータに基づいて解析・推定した一連の研究を纏めたものであり、6章及びまとめから構成されている。

第1章では、出火の危険度と火災発生後の危険度との総合的な考察に基づいて建築物の火災安全性を評価するためには、出火率と防災設備の故障率の実態を究明することが重要と考えられる一方で、既往の火災研究における出火率の捉え方の問題点、及び防災設備の動作信頼性の把握に困難がある点を指摘し、本論文における研究の背景を述べている。出火率と防災設備の故障率は、現時点では統計的解析の視点から捉えることが望ましいものであり、データが整備されつつある現在、そのような視点から、出火率と故障率についての統計的考察を行っている本論文の研究目的を明らかにしている。

第2章では、本論文で出火率、故障率を推定するために用いられている、火災、建築物及び建築設備の調査資料について述べている。火災の解析に用いた資料は、自治省消防庁及び東京消防庁の火災報告書から作成されたデータベースであり、既存建築物及び建築設備の解析に用いた資料は、建築設備定期検査報告書から作成されたデータベースである。これらのデータベースから得られる情報のうち、出火率、故障率の解析にとって重要なものは、調査対象の数、調査期間であり、「物販店舗」「旅館・ホテル」「病院」「事務所」「共同住宅」それぞれの用途の建築物について、出火建物数、及び延床面積、階層数、竣工年別の建物数の基礎的資料について述べている。さらに、建築設備については、建築設備定期検査報告において調査対象となる換気・排煙・非常用照明・給排水の4設備の設置状況、及びそれらに対する定期検査実施状況について、建築物の用途・規模・竣工年別に明らかにしている。

第3章では、時間的に不規則に生起する事象の生起時間間隔を、定常確率過程として取扱う解析方法について要約して述べている。事象の生起頻度が低く、標本毎に観測期間が異なる場合、事象の生起が観測されない標本が多数出現す

るため、このような事象の生起時間間隔に関するデータは多重時間打切りを受けているとみなされる。本論文で解析対象とする出火或いは設備の故障の事象は、生起頻度が低いこと、及び個々の建築物における調査期間に差異があるという調査資料上の制約をもつことから、ここでは多重時間打切りの条件の下での最尤法による解析について述べている。加えて、防災設備の一つである煙感知器連動防火扉の定期点検・保全記録に基づいて、時間打切り故障事象に対する最尤法の適用例を示している。

第4章では、建築物の出火率の推定について論じている。出火事象の生起時間間隔（出火時間）を確率過程でモデル化する場合、出火率の推定は、出火時間の確率分布のパラメータ推定の問題となり、第3章で述べた信頼性理論による推定手法が適用できる。本論文では、出火事象を定常ポアソン過程でモデル化しており、その場合事象の初生起時間すなわち出火時間は1母数分布である指数分布に従う。本章では、多重時間打切りデータにおける1母数分布の最尤法により出火時間分布のパラメータを推定し、この推定パラメータから建築物の用途・延床面積別に出火率を推定している。この結果から、用途・延床面積の違いにより建築物の出火率が異なることを明らかにしている。

第5章では、防災設備の一つである非常用照明器具の故障率の推定について論じている。一般に、故障事象の生起時間間隔（故障時間）は定常確率過程でモデル化され、その解析によって故障時間分布及びパラメータが同定されるが、稼動開始以降の任意の時刻における故障の生起率（故障率）は、故障時間分布、パラメータ、動作時間或いは経過時間をもって推定される。特に、時間に対して故障率が増加する正規分布、ワイブル分布等の故障時間分布が予想されるときには、任意の時刻における信頼性を故障率により評価する必要が生ずる。本章では、第2章に示した資料から得られる建築設備の故障時間が、多重時間打切りをされた区間データの性質をもつことを考慮して、図的解法の一つであるワイブル確率プロット法、第3章で述べた最尤法、本論文で提案する近似推定法による故障率の推定について述べている。利用資料の性質と推定結果との総合的な考察に基づいて、故障率の現状を把握する上で、本論文で提案する近似推定法が有効であることを論ずるとともに、建築物の用途・延床面積の違いによって、非常用照明器具の故障率が異なることを明らかにしている。

第6章は、第4章、第5章で推定された出火率と防災設備の故障率について総括的な考察を加えている。共同住宅建築物の例では、出火率、故障率がともに建築物の延床面積に影響を受けないこと、また事務所建築物では、延床面積が増大するにつれて、出火率、故障率がともに減少する傾向を示し、かつ延床面積毎の出火率と故障率が強い相関を示すことが明らかにされている。さらに、この結果を踏まえて、出火率と故障率の両者に影響を与える、延床面積に規定される共通の因子の存在を推論している。

最後に、本研究によって得られる結果が、建築物の火災安全を考察するに際してもつ意義について述べ、本研究をまとめている。

# 目 次

第 1 章 緒論 .....	1
§ 1. はじめに .....	1
§ 2. 研究の目的 .....	2
§ 3. 既存建築物における故障とその問題点 .....	4
第 2 章 既存建築物の調査資料の概要 .....	9
§ 1. 火災、建築物および建築設備についてのデータベース ..	10
§ 2. 用途・規模別出火建物数 .....	13
§ 3. 調査対象の建築物および建築設備 .....	15
3.1 調査対象建築物の用途・規模および竣工年 .....	15
3.1.1 規模別建物数 .....	15
3.1.2 竣工年別建物数 .....	18
3.2 調査対象建築設備 .....	30
3.2.1 建築設備の設置状況 .....	30
3.2.2 建築設備定期検査実績 .....	37
第 3 章 統計的解析手法に関する考察 .....	41
§ 1. 故障データ解析 .....	42
1.1 故障データ .....	42
1.2 故障時間の統計的モデル .....	43
1.2.1 指数形モデル .....	44
1.2.2 正規形モデル .....	46

1.3 パラメータ推定 .....	47
1.3.1 多重時間打切りデータの最尤法による解析 .....	49
§ 2. データベースを利用した故障率解析 .....	53
2.1 故障データベースの概要 .....	53
2.2 故障率の解析 .....	57
 第 4 章 建築物の出火率解析 .....	61
 § 1. 出火率の定義 .....	63
§ 2. データベースを利用した出火率の推定 .....	64
2.1 建物数の推定 .....	64
2.2 出火率の推定 .....	67
§ 3. 推定結果の考察 .....	71
 第 5 章 建築防災設備の故障率解析 .....	73
 § 1. 防災設備と解析データ .....	75
1.1 防災設備の解析対象 .....	75
1.2 データの事前処理 .....	79
§ 2. 故障率の特性 .....	83
2.1 故障率 .....	83
2.2 故障率と保全 .....	87
§ 3. データベースを利用した故障率の推定 .....	91
3.1 ウイブル確率プロット法による推定 .....	91
3.2 最尤法による推定 .....	101
3.3 故障率の近似推定 .....	103
§ 4. 推定結果の考察 .....	107

第6章 出火率・故障率と火災安全 ..... 113

§ 1. 建築物の出火率 ..... 114

§ 2. 防災設備の故障率 ..... 116

§ 3. 出火率・故障率と火災安全 ..... 118

まとめ ..... 125

Appendix ..... 129

## 参考文献

## 謝辞

# 第1章 緒論

## § 1. はじめに

建築はシェルターであると言われる。

古今東西を問わず人間が建築を造り出す大きな目的の一つは、寒暑・風雨といった自然現象などによってもたらされる、各種外乱から生命の安全を守ることであった。

近年、人間の居住域、活動域に対する拡大要求に応じて、或いはそれを先導する形で、建築技術は様々な建築物を提供するようになってきている。提供される建築物の用途・形態は多様化し、また、鉄・コンクリート等の新しい建築材料と建築構造技術・工法の開発により、大規模・高層化し、かつ堅固に構築される方向に向かっている。こうした建築形態・規模の変化は、それぞれの地域の文化を創出してきた風土、或いは習俗・生活の伝統とは無縁に起こる場合もあり、その結果、例えば建築空間内気候が人間活動に適さない状態となったり、日影問題、ビル風等シェルターであるべき建築物が、他の建築物に対して外乱を創り出すような事態が出現するようになってきている。

シェルターとしての機能を維持する上で、現代の建築には建築内空間の至適性を確保するため、様々な機器・設備が設置される。これらの機器・設備は、安全性、利便性、快適性等の目的から設置されるものであり、現代の建築では、このような機器・設備なしにはその機能を維持できなくなってきた。一方、機器・設備の信頼性の視点からは、『市場に出荷された製品が、維持・保全活動なしに、設計で予期された性能を保つことはない』との認識があり、使用過程における維持管理・保全活動の重要性が指摘されている。東京消防庁の昭和63年度統計によると、東京都内にある4階建て以上の防火対象物は10万棟余に及び、この膨大な社会ストックとしての建築物の機能を維持管理・保全していくことは、社会的に不可欠な課題となっている。しかし、建築ストックに対する合理的な保全プログラムがいかに構成されるのが望ましいかの議論は、近年始まったばかりである。また、その議論の前提となる、維持管理の実態、および適切な維持管理の効果についての調査・研究も、一般設備に関するもの以外

はほとんど行われていない。従って、防災設備の維持管理などの実態を把握することは、建築ストックの健全な利用方策を考察する上で緊要の課題である。

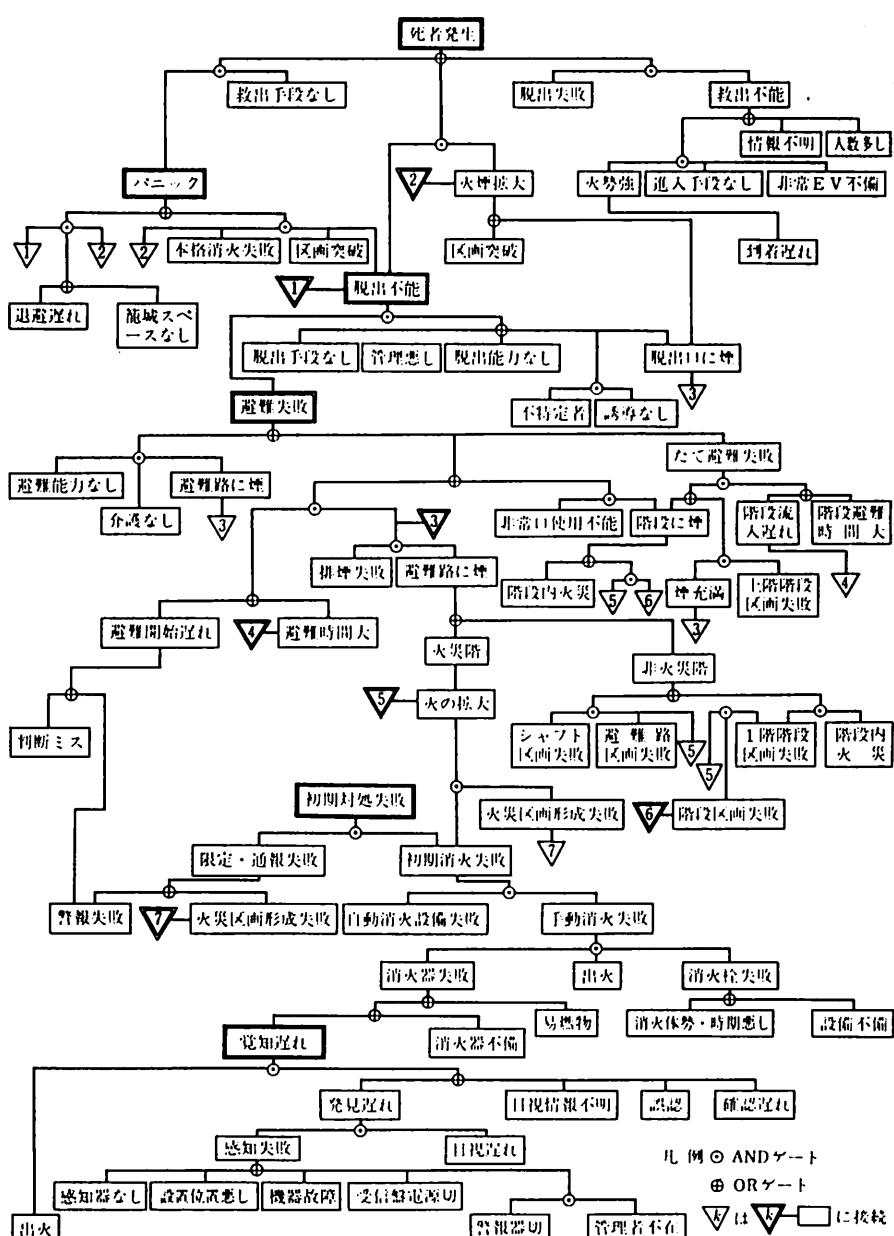
## § 2. 研究の目的

前節に述べたように、建築物には様々な構造・形態があり、それぞれの用途に応じて多くの設備が備え付けられる。特に建築基準法により特殊建築物と指定される建築物、或いは消防法により、火災安全の確保が重視されるため、防火対象物の指定を受ける建築物には、建築物自体、および建物利用者の安全を確保するための対策が厳しく要求されている。それらの対策は、建築構造体そのものを耐火構造とし、防火区画を形成することであったり、或いは機器・設備を安全装置として取り付けることである。後者の多くは、一般に防災設備と呼ばれるが、古くから人間の生活にとって欠かせないものであると同時に脅威ともなった火は、現代でも扱い方によって多大な被害をもたらす源で、建築物において、防災設備といえば防火設備と言ってもよい。

上述建築基準法及び消防法は、不特定多数の人々が利用する建築物、或いは危険物を扱う建築物の用途と規模を指定し、それらの建築物に、耐火構造とすること、防火区画を設けること、各種消火設備を設置すること、避難安全設備を設置すること等を要求している。これらの防火・耐火対策、防火設備の設計・製造・施工・設置基準は明確かつ極めて綿密である。しかも、日本においては、設計図書による建築確認の制度、竣工時の検査制度等の法令に基づく諸制度が比較的厳密に実施されており、この点では、建築物の竣工時における火災安全性に関する建築品質はかなり高いレベルにあると判断される。

これら各種法規の制定、或いは多くの施工実績は、火災に対して行われてきた解析・研究、例えば燃焼物理の研究、材料耐火性能の研究・試験等の成果であり、火災安全計画が建築計画全体の中の主要な計画の一つとして確立していることを示している。上述した従来の火災研究が、火災に関連する事象を個々に扱ってきた結果として、火災安全計画は出火防止・内装・耐火・区画・煙制御・消防設備・避難計画に細分化されているが、最近の火災安全計画における動向として、建築物の総合的な火災安全性解析という観点から、信頼性理論に基づいて安全性を検討することの重要性が指摘され、数多くの研究が進められ

てきている。これらの研究の多くは、火災安全に関わる項目が非常に多くかつ多岐にわたることから、複雑なシステムの全体を評価する手法の一つである、関連樹木法（FTA : fault tree）を用いた解析を行っており、図1-1<sup>1)</sup>は、このようなFTAの実例を示したものである。寺井<sup>2)</sup>の指摘するように、火災安全確保の概念は、出火防止、延焼・拡大防止、人命危険防止に大別されると考えられ、図1-1に示すFTAも、基本的には図1-2に示す概念に基づいて構成される。図1-2から、出火率、防災設備の信頼性が、建築物全体の火災安全に影響を与える要素であることが分かる。



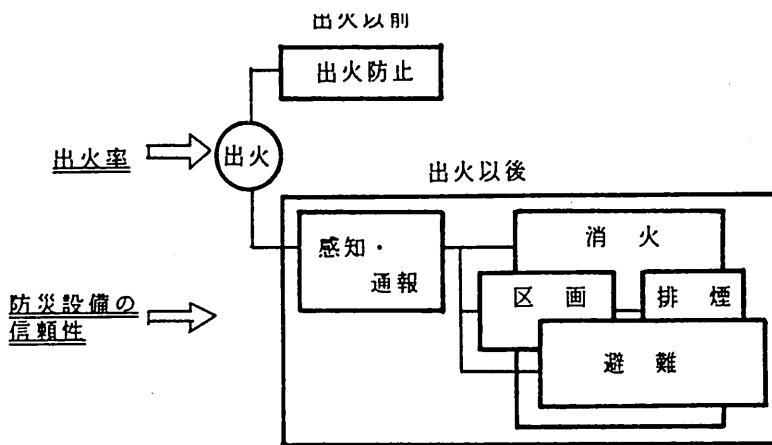


図 1-2. 火災安全を確保するための主要項目の関係

一方、信頼性理論に基づく現在の火災安全研究が、建築物全体の火災安全性を評価する上で、火災安全確保に関連するいくつかの要素、特に出火確率、防災設備の信頼度を適切に定量化していない点が指摘される。それは、出火の可能性、及び出火した後の被害を防止する防災設備の信頼性を、統計的に扱うという視点がとられてこなかったことである。第4章に述べるように、この二つの要素を統計的に扱うことは、建築物の火災安全性を信頼性の観点から検討するためには不可欠である。その重要性は以前から指摘されてきたが、出火或いは防災設備の故障には、発生の機序に未知な点が多いこと、資料が十分に整備されていなかったこと等から、基礎的な解析もほとんど行われていない。従って、出火の可能性及び防災設備の信頼性を定量的に解析し、その全体像を明らかにしておくことは、既存建築物の火災安全性を考える上でのポイントであり、火災安全計画の策定・完成に大きく資すると考えられる。

本研究の目的は、出火確率及び防災設備の動作信頼度を明らかにすることで、信頼性を基礎とした建築火災安全計画のために基礎データを提供することにある。そのために本研究では、建築物、付帯設備、火災に関して現時点で最も良く整備されていると思われるデータベースのいくつかを利用して、複数の建物用途・規模別に、出火率及び防災設備の故障率を推定している。これら出火率、故障率は、それぞれ第4章、第5章で述べるように、出火確率或いは機器・設備の信頼度にとって重要な特性量の一つである。

### § 3. 既存建築物における故障とその問題点

信頼性に関する分野は、部品・機器・システムの動作確保のためいかに故障

を防止するか、言い換えれば信頼性をいかに高めるかという問題を研究する信頼性工学として確立している。信頼性工学では、システムのライフ・サイクルを構想、定義、開発、生産、運用、廃棄の6段階に分け、システムの信頼性は全ての段階に関連するものとしている。従来、製品の高信頼化の努力は、前半の4段階に関する製造時の品質管理の側面から、主に経験的なものを集大成して体系づけられてきたが、現在では保全活動を加え、次に示す高信頼化のための管理プログラムが重要であり有効であることが指摘されている。

- ①信頼性プログラム……設計段階における信頼性管理
- ②品質管理プログラム……製造段階における品質管理
- ③保全プログラム……運用段階における保全活動

例えば一つのシステムとして自動車の例を挙げると、このシステムは誕生以来100年余を経ているが、製造者がその間に①、②の活動を通じて使用者が要求する性能（動力性能、居住性能など）を充実してきた。初期には、③は使用者の責任においてなされていたが、現在では、系統的な維持・保全活動の行われることが、システム運用の前提となっている。具体的には、1年～3年の定期車検制度の方策がとられ、特に運行安全性に関わる保安部品は、定期的な交換が義務付けられている。自動車というシステムの、使用されている数及び使用時間を考慮すると、システムを構成する部品の故障・欠陥に起因する事故が極めて少ないことは、この種の制度の有効性を証明するものであろう。

これに対して、防災設備については、運用する過程でその機能をどれほどどのように確保するか、即ち上述③保全プログラムの実施に関しては、建築基準法では第8条、第12条、同施行規則第5条、第6条のように、定期検査の推奨といった抽象的な規定にとどまっている。さらに、定期検査がどれほど実施され、その結果防災設備がどれほど稼動しているかを研究した例は、その動作信頼性が火災安全にとって重要であると予想される<sup>3)</sup>にも関わらず、筆者らの研究<sup>4)</sup>を含めても数少ない。

防災設備の設置後の機能保全が問題となりにくい現状は、設置規定の成立過程或いはその歴史の浅さに起因している部分もあるが、火災と防災設備の関係、或いは防災設備そのものが、以下に述べるような特性を持つことは考慮される必要がある。

- i) 防災設備はその目的上、動作時刻の予期が不可能であると同時に、動作すべき事態がまれにしか生起せず、しかもその事態が生じたときに動作することが要求される特殊な機器である。第4章で示される、延床面積10,000m<sup>2</sup>～15,000m<sup>2</sup>程度の事務所ビルでの出火を例にとると、その出火率はほぼ $1.4 \times 10^{-7}$ 回/m<sup>2</sup>・年であり、建築物1棟について $1.4 \times 10^{-3} \sim 2.1 \times 10^{-3}$ 回/棟・年となる。これは、平均的には400年から700年に1回生起きする事象ということになる。従って、ある建築物に設置された防災設備は、竣工した後、動作が要求される事態は、平均的にはその建築物のライフサイクル中にほとんど生じない。このような設備を、常時動作し得る状態に整備しておくことは、不可能ではないにしても非常に困難である。
- ii) 防災設備は、例えば防火戸のように構造躯体に直接取り付けられたり、或いはシステム全体が高価なものがある等の理由から、動作しなくなると直ちに廃棄されるということではなく、定期的に動作状態が点検され、故障があれば保全によって部品が交換される点で、定期点検・保全によって使用され続ける修復システムと考えられる。そのためi)で述べた特性を併せて考えると、定期点検・保全による維持管理活動が特に重要となる設備であるが、防災設備に対する点検・保全記録は、いくつかの設備を除いてほとんど整備されていないのが現状である。

火災及び防災設備の研究を行うに際して、上記のような特性に関連する問題点を克服するために、事象の発生、或いは挙動を、そのメカニズムから明らかにするのは1つの方法である。しかしながら、長谷見<sup>5)</sup>が指摘しているように、火災に関連する事象のいくつかに対しては、その事象を微視的要素の集合として系統的に解析する方法、いわゆるシステムズ・アプローチが現在では不可能に近い。火災或いは設備の故障は、多くの不確定性を含む現象として取扱い、その解析には信頼できるデータの統計的処理と確率・統計理論に基づいて、事象を巨視的に把握する手法が現実的であり、このような手法は、信頼性に関する他の多くの分野で用いられている。

本論文では、データの統計的処理に基づく信頼性解析の手法を、建築火災安全計画に導入する第一歩として、従来不明であった、建物用途・規模別の出火

率、防災設備の故障率を、統計的に明らかにしようとするものである。

ここで、出火率・故障率の統計的解析には、図1-3に示す①～③のデータが必要となるが、これらのデータのうち、火災についてのデータ①は、自治省消防庁、或いは東京消防庁によってデータベースにされており、本論文第4章で出火率を推定する際に火災データベースとして利用している。前節に述べたように、従来十分に整備されていなかったデータは、②既存建築物についてのデータ、及び③建築設備の（定期）検査記録のデータであり、本論文では②、③のデータとして、建築設備定期検査報告書を基に作成されたデータベースを利用している。第2章では、このデータベース内の情報を基に、既存建築物及び建築設備の現況を示し、第4章の出火率の推定にあたっては、既存建築物データとして利用し、第5章の防災設備の故障率推定にあたっては、建築設備定期検査データとして利用している。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{出火率} \leftarrow \frac{\text{①火災データ}}{\text{②既存建築物データ}} \\ \text{故障率} \leftarrow \text{③建築設備(定期)検査データ} \end{array} \right.$$

図 1-3. 出火率・故障率の推定に必要なデータ

## 第2章 既存建築物の調査資料の概要

建築物に発生する火災、建築設備の故障等の現象のいくつかは、それらの発生機構に未知な部分があり、出火率推定等の解析にあたって、現時点では建築物集団に対する何らかの統計的処理が必要となる。東京消防庁による1988年の統計では、東京都内にある防火対象物のうち4階建以上或いは地下階を有する建築物は148,000棟に及び、これらの建築物についてすべての情報を正確に整備・記録しておくことは容易ではない。建築物に関する情報は、特殊建築物に指定されている用途のいくつかについて、それぞれの監督官庁等の公的機関が独自に整備し<sup>1)</sup>データベース化されているものもある。しかしながら、多くのデータベースは建築物そのものについての情報を整備することが主目的ではなく、例えば建物規模については、売り場面積であったり、事務用途部分の面積であったりするなど、情報整備の基準、方法等が異なっており、これらのデータベースを用いた解析は特に用途間の比較を考慮する場合困難なものとなる。

本論文で利用する、火災に関する資料は、自治省消防庁及び東京消防庁が東京都内で発生した全火災の報告書を整理・作成したデータベースであり、建築物及び建築設備に関する資料は、建築基準法の定める建築物定期調査・報告制度に基づいて行われた、建築設備定期検査報告書を集成したデータベースである。建築物の定期調査・報告は、建築物そのものに関するものと、建築設備に関するものに大別されるが、報告義務の課される建物規模が一部異なること等を除けば、建築物の概要に関しては同一の情報が記録される。

これらのデータベースには、特殊建築物に分類されるほとんどの用途が含まれており、用途、規模によらず様々な情報が建築物毎に統一した方式で収録されている等、火災及び建築物に関する情報のデータベースとして、現時点ではもっとも良く整理されているものである。

本章では、第4章以降で述べる出火率、故障率の推定に先立って、火災報告書及び建築設備定期検査報告書の資料内の情報を整理し、東京都内における建築ストックの現状を概観する。

## § 1. 火災、建築物および建築設備についてのデータベース

第4章、第5章で行うように、出火率、防災設備の故障率を統計的に解析するためには、図1-3で示したように、火災・既存建築物・設備検査データが必要となるが、本論文では以下のデータベースを利用して解析している。

### i) ① 住宅に関する火災データベース

東京消防庁管内で、過去5年間（1980年1月1日～1984年12月31日）に消防が出動し火災と確認された、東京消防庁作成の全住宅火災に関する資料

### ② 特殊建築物等に関する火災データベース

東京都内で、過去6年間（1982年1月1日～1987年12月31日）に消防が出動して火災が確認された、自治省消防庁作成の特殊建築物等の全火災に関する資料

### ii) 東京都内の特殊建築物等から提出された、建築設備定期検査報告書を基に作成されたデータベース

i)のデータベース（以後火災データベース）は、自治省消防庁作成のものと東京消防庁作成のものであり、火災データベースに記録される火災事例はそれぞれの消防庁が火災と認定したものである。なお、この統計資料については、自治省消防庁の資料は建設省総合技術開発プロジェクト「新木造建築技術の開発」住宅防火設計WGで行われた作業に用いられたものであり、東京消防庁の資料は「住宅関係火災の事例分析結果報告書」東京消防庁（1986）に用いられたものである。

これらの火災データベースにおける建築物の用途区分は、防火対象物の指定区分に従っており、ii)のデータベースにおける用途区分に対応させるため、表2-1に示すようにまとめた。ここで①と②の火災データベースの両者を使用するのは、②のデータベースに共同住宅の火災データが含まれていないためである。表2-2に火災データベースに収録されている情報を示す。

表 2-1. 建築物用途分類

	用途	用途コード	防火対象物
(1)	物品販売店舗	03、04	(四)
(2)	旅館・ホテル	07	(五)イ
(3)	病院・診療所	08、09	(六)イ
(4)	事務所	13	(十五)②
(5)	共同住宅・寄宿舎	15	(五)ロ

表 2-2. 火災データとして利用する情報

1.	住宅に関する火災データベース (東京消防庁)	出火建物の属性 に関する情報	用途、構造、地上階数、延べ床面積、建築年
		出火状況に関する情報	出火階数、出火個所、焼損面積、火元建物内の延焼拡大状況、出火室の状況(内装材)
2.	住宅以外の建物に関するデータベース (自治省消防庁)	出火建物の属性 に関する情報	用途、防火対象物の区分、構造、地上階数、延べ床面積
		出火状況に関する情報	火災発生年、出火個所、出火階数、焼損面積、(死亡者数)

ii)のデータベースは、(財)日本建築設備安全センターから提供を受けた、東京都内の特殊建築物及び事務所建築物等からの建築設備定期検査報告書を基に作成されたデータベース（以後建物データベース）である。このデータベースには、既存建築物の建築物そのものについての情報と、建築設備の定期検査結果についての情報の両方を含んでおり、出火率・故障率を解析する場合、それぞれの母数を推定できる現在最も有用な資料である。

建築設備定期検査報告は、建築基準法第12条第2項に基づいて行われる作業であるが、対象となる建築物の用途・規模・設備は特定行政庁毎に若干異なり、東京都の場合は建築基準法施行細則により表2-3のように指定されている。建築物用途に関して、建物データベース内では表2-4に示す分類に従って入力されているが、以後の解析の便を考慮して、類似しているとみなされる用途は一括しまた件数の少ない用途は除いて表2-5のようにまとめ直した。このうち本章以降の解析で用いる用途は規模、設置設備、建築物の使用法等で建築物の性質に大きな偏りがないと思われる「物販店舗」「旅館・ホテル」「病院・診療所」

表 2-3. 建築設備定期検査報告の対象用途及び規模

(東京都建築基準法施行細則)

	特 殊 建 築 物 等		(イ) 建築設備
	(ア) 用途	(イ) 規 模	
(一) 劇場・映画館・演芸場	• 200m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの • 主席が1階にないもの		
(二) 講堂場・公会堂・集会場	• 200m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの		
(三) 宿館・ホテル	• 300m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの		
(四) 百貨店・マーケット 物販店業を営む店舗	• 500m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの		
(五) 病院・診療所(患者の収容施設があるものに限る) ・養老院・児童福祉施設等	• 300m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの		
(六) 学校・体育館	• 2,000m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの		

注 ① 上記表で「3階以上の階にあるもの」とは、3階以上の階でその「用途に供する部分」が100m<sup>2</sup>を超えるもの。

② 该高分の用途は、建築基準法、同法施行令、東京都建築基準令等に明確に定義されていないので、社会通念上、衛生令等の定義及び各種の通達を参考し実質的な用途とする。

③ 「用途に供する部分」とは、原則として主たる用途に供する部分、これに付属する部分とする。なお、複合用途の建築物では、原則として専用部分の面積を加算して対象建築物になるかどうかを判断する。

(例) 物販店業を営む店舗: 充填、店舗用仓库、販売部屋、喫煙所、便所等

④ 階は地上階を算定する。また、表でいう「主席」とは専ら観客席のある階をいう。

(七) 博物館・美術館・図書館・ボーリング場・スキースケート場・水泳場・スポーツの練習場	• 2,000m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの	
(八) 展示場・キャバレー・カブー・ナイトクラブ・バー・舞踏場・遊技場・公衆浴場・待合・料理店・飲食店	• 500m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの	• 非常用の照明装置(昭和46年1月1日以後に建築確認を取得し設置されたもの)
(九) 下宿・共同住宅・寄宿舎	• 300m <sup>2</sup> を超えるもの(ただし、3階以上の階に100m <sup>2</sup> を超えるものがある場合に限る)	• 構造水設備(昭和34年1月1日以後に建築確認を取得し設置されたもので給水タンク・貯水タンク・排水タンクが設置されているもの)
(十) 宿泊所その他これに類するもの	• 1,000m <sup>2</sup> を超えるもの(ただし、5階以上の階で延べ面積が2,000m <sup>2</sup> を超えるものうち、3階以上の階にあるものに限る)	
(十一) 上記用途(宿泊所を除く)の建物中に2以上あるもの(複合用途建物)	• 500m <sup>2</sup> を超えるもの • 3階以上の階にあるもの	
(十二) 地下街	• 1,500m <sup>2</sup> を超えるもの	

⑤ 暖気設備については、次の項目により下記の暖気設備が対象になります。

項目	開き 対象 暖気設備
(一)・(二)	すべての暖気設備
(三)	暖気炉室・火気使用室
(一)・(二)	ただし、(三)項のうち2,000m <sup>2</sup> を超えるもので、3階以上の階にあるもの及び(四)項のうち3,000m <sup>2</sup> を超えるもので、3階以上の階にあるものにあっては、すべての暖気設備が対象になります。

暖気炉室：(法第28条第2項による暖気炉室)

火気使用室：(法第28条第3項による暖気設備)

⑥ 施工してから1年を経過した該高物が報告の対象となります。

表 2-4. 建築物用途コード

建築物用途	コード	建築物用途	コード
劇場・映画館・演劇場	01	養老院・福祉施設	10
観覧場・公会堂・集会場	02	学校	11
百貨店・マーケット	03	博物館・美術館	12
物品販売店舗	04	図書館・展示場	
飲食店 I (風営法の対象店)	05	事務所	13
飲食店 II (飲食店 I 以外)	06	スポーツ施設	14
旅館・ホテル	07	共同住宅・寄宿舎・下宿	15
病院	08	舞踏場・遊技場・公衆浴場	16
診療所	09	複合建物	17

表 2-5. 建築物用途分類

	用途	用途コード
(1)	物品販売店舗	03.04
(2)	飲食店	05.06
(3)	旅館・ホテル	07
(4)	病院・診療所	08.09
(5)	学校	11
(6)	事務所	13
(7)	共同住宅・寄宿舎	15

「事務所」「共同住宅」の 5 用途である。建物データベースには、報告書に記入された事項のいくつかを除いて図 2-1 の形式で情報が入力されている。これらの情報のうち本論で用いるものを表 2-6 に示す。

報告行政庁	総合検査評定	報告受付番号	
報告者 氏名, 所在地等			
所有者 氏名, 所在地等			
管理者 氏名, 所在地等			
建築物 所在地			
建築物 名称			
建築物 第1用途, 第2用途, 構造 確認年月日	地下階層数, 地上階層数 建築面積 (m <sup>2</sup> ), 延床面積 (m <sup>2</sup> ) 竣工年月日		
検査者 資格, 氏名, 所在地			
	最新	前回	前々回
総合評定 換気設備総括評定 排煙設備 非常用照明設備 給排水設備			
受付番号 行政庁			
要改善項目			

図 2-1. 建物データベースの情報入力形式

本章ではこれらの情報を利用して、次章以後で行う出火率、故障率の解析にとって基礎となる情報を 2 つの点から明らかにする。1 つは用途・規模・竣工年別 の建物数の情報であり、他の 1 つは防災設備に関する情報である。ただし建築物によっては記入されていない情報があり、延床面積、階層数、竣工年等が不明な建築物は、建物数を特定する場合等の解析から除外している。また、解析結果の用途間の比較を行うことから、複数の用途をもつ建物データは全ての解析から除外している。

表 2-6. 利用情報一覧

建築物の属性に関する情報	建築竣工年月日, 建築確認年月日, 第1用途, 延床面積, 地上階層数
建築設備に関する情報	定期検査年月日, 報告書受理年月日, 換気・排煙・非常用照明・給排水設備の有無 総合評定及び各設備の検査評定, 各設備の要改善項目

## § 2. 用途別・規模別出火建物数

表2-7は、表2-1に示した用途について、建物データベースと火災データベースから得られた建物数と出火数を、延床面積・階層数別に示したものである。ただし、建物数については1987年（共同住宅については1984年）までに竣工したものであり、出火数は上述したように、共同住宅用途については1980年～1984年の5年間、他の用途については1982年～1987年の6年間の合計値である。これらのデータベースとは別に、毎年東京消防庁の発行する統計書<sup>7)</sup>には、都内の防火対象物のうち4階建以上の建築物の階層数別建物数が示されており、表2-7にはこの統計書による1987年12月（共同住宅については1984年12月）現在の値も併せて示した。建物データベースの基になった建築設備定期検査報告は、報告が義務付けられる規模に指定があるが、火災データも表2-3に指定された建築物規模のものに限って用いている。また、延床面積の規模分けは、図5-1に示される抜取検査の際の延床面積区分で、規模別の出火率を推定する場合もこの区分に従っている。

火災データベースにも複数の用途が記載された建築物が含まれているが、故障率、出火率に関する用途間の相違も考慮の対象とすることか

表 2-7. 建物・火災データベースによる建物数及び出火建物数  
(延床面積別)

規模 用途	(m <sup>2</sup> ) ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001~ 50	計
物品販売店 舗他	105 30	189 35	89 18	48 17	35 6	24 16	50 20	540 142
旅館・ホテル	118 68	104 31	49 8	18 6	8 1	7 2	27 6	331 122
病院・診療所	108 19	187 34	91 20	49 16	16 6	8 3	12 11	471 109
事務所	— —	367 20	562 30	366 20	203 11	88 5	154 16	1,740 102
共同住宅	4,193 361	3,993 750	1,145 170	409 122	131 86	63 36	44 91	9,980 1,616

上段 建物件数、下段 出火件数  
ただし表2-3に示した報告対象規模に満たない建物のデータは除外してある。

(階層数別)

規模 用途	~ 3 F	4 F ~ 6 F	7 F ~ 9 F	1 0 F ~ 1 2 F	1 3 F ~ 1 5 F	1 6 F ~ 50	計
物品販売店 舗他	275 1,213 61	146 233 37	103 41	12 2	4 0	0 1	540 1,469 142
旅館・ホテル	57 — 47	139 817 37	81 218 24	36 60 8	12 6 1	15 10 5	331 1,111 122
病院・診療所	174 722 35	253 100 53	37 13	5 5	2 1	0 2	471 845 109
事務所	— — —	301 4,820 22	1,050 3,682 47	306 724 28	41 54 0	42 43 5	1,740 9,323 102
共同住宅	3,146 — 221	4,511 21,331 901	1,372 2,652 141	739 1,395 199	202 347 151	10 12 2	9,980 25,747 1,616

上段 建物件数、中段 東消統計、下段 出火件数  
ただし表2-3に示した報告対象規模に満たない建物のデータは除外してある。

ら、单一用途の建築物とみなせる1種類の用途だけが記載されている出火建物データに限定して使用した。

表 2-8. 建物数・出火建物数の延床面積別年推移

#### 「物販店舗」

規格 年度	m <sup>2</sup> ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1982 建物数	37	102	55	29	23	15	38
出火数	11	18	11	4	2	3	11
1983 建物数	38	107	55	30	23	17	40
出火数	5	5	3	2	1	1	3
1984 建物数	42	115	57	32	25	19	43
出火数	7	3	1	0	1	0	3
1985 建物数	47	120	58	35	26	19	44
出火数	1	4	1	1	1	3	1
1986 建物数	49	122	58	35	26	19	45
出火数	2	2	2	5	1	3	2
1987 建物数	50	126	58	35	26	19	45
出火数	4	3	0	5	0	6	0

#### 「旅館・ホテル」

規格 年度	m <sup>2</sup> ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1982 建物数	57	57	29	12	6	4	19
出火数	38	12	2	2	1	1	3
1983 建物数	65	60	34	15	6	4	22
出火数	4	4	0	1	0	0	1
1984 建物数	66	66	36	15	6	4	25
出火数	8	4	2	1	0	0	1
1985 建物数	75	67	36	15	7	4	26
出火数	10	5	0	1	0	0	1
1986 建物数	80	71	38	15	7	4	27
出火数	4	3	3	0	0	0	0
1987 建物数	83	74	38	15	7	4	27
出火数	4	3	1	1	0	1	0

#### 「病院」

規格 年度	m <sup>2</sup> ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1982 建物数	29	87	51	28	9	5	9
出火数	9	15	7	6	1	1	3
1983 建物数	31	93	54	31	10	6	9
出火数	2	0	3	3	0	0	3
1984 建物数	31	97	60	31	11	6	10
出火数	2	4	1	1	0	0	0
1985 建物数	31	100	61	32	11	6	11
出火数	1	0	0	0	0	0	0
1986 建物数	32	102	63	34	11	6	11
出火数	0	0	0	0	0	0	0
1987 建物数	32	104	64	37	11	6	12
出火数	0	0	0	0	0	0	0

表 2-8は、出火率の推定を考慮して、

火災データが記録された時点からの各年の、建物データベースから得られる竣工建物数、火災データベースから得られる出火件数を用途別、延床面積別に示したものである。

#### 「事務所」

規格 年度	m <sup>2</sup> ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1982 建物数	-	199	331	254	155	65	121
出火数	-	8	7	7	5	0	5
1983 建物数	-	205	346	263	156	67	125
出火数	-	0	11	4	1	0	1
1984 建物数	-	211	366	274	162	68	128
出火数	-	1	4	1	2	1	2
1985 建物数	-	234	394	288	165	71	134
出火数	-	0	1	3	0	1	4
1986 建物数	-	253	420	294	167	71	137
出火数	-	6	5	3	2	1	2
1987 建物数	-	270	439	299	168	72	143
出火数	-	5	2	2	1	2	2

#### 「共同住宅」

規格 年度	m <sup>2</sup> ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1980 建物数	1,814	2,057	582	221	69	27	14
出火数	60	155	34	18	8	3	13
1981 建物数	1,978	2,248	645	247	80	30	18
出火数	69	129	33	30	16	7	20
1982 建物数	2,159	2,429	707	271	87	34	21
出火数	72	156	38	24	18	5	18
1983 建物数	2,280	2,610	770	290	90	38	22
出火数	76	147	33	33	18	10	23
1984 建物数	2,430	2,778	817	306	97	43	25
出火数	84	163	32	17	16	11	17

## § 3. 調査対象の建築物および建築設備

### 3.1 調査対象建築物の用途・規模および竣工年

ここでは、建物データベースに記録されている建築物に関して、用途別に規模、竣工年に関する2つの情報を把握する。

#### 3.1.1 規模別建物数

建築物の規模は、様々な捉え方ができるが、ここでは利用できる情報のうち延床面積と階層数について整理する。

図2-2は、1987年までに竣工した建築物について、延床面積 $2,000\text{m}^2$ 毎の建物度数分布を用途別に示したものであり、図2-3は同じく階層数の建物度数分布を示したものである。ただし延床面積が $20,000\text{m}^2$ を越える建築物、15階建以上の建築物は一括して示してある。この図を見るにあたっては小規模な建築物（表2-3報告対象規模参照）の取扱いが用途毎に異なっている点に注意が必要である。表2-3によれば、例えば旅館・ホテルの報告対象規模は『延床面積 $300\text{m}^2$ 以上、或いは3階以上に当該用途に供する部分を $100\text{m}^2$ 以上もつ』であるのに対して、事務所では『5階建 $2,000\text{m}^2$ 以上、かつ3階以上に当該用途を $1,000\text{m}^2$ 以上もつ』と指定されている。ただし前節で述べたようにここでは单一用途の建築物と見なせる場合に限定しているので、共同住宅、事務所はそれぞれ『延床面積 $300\text{m}^2$ 以上、かつ3階建以上』、『延床面積 $2,000\text{m}^2$ 以上、かつ5階建以上』の規模が対象となる。

ここで扱った建築設備定期検査報告書を提出した建築物の数が他の公的統計資料と比較してどの程度異なっているかを表2-9、表2-10に示す。比較対象とした統計資料は

病院（表2-9）：医療施設調査、病院報告、厚生省大臣官房統計調査部、昭和62年

共同住宅（表2-10）：住宅統計調査報告第3巻その13、東京都総務庁統計局、昭和58年

であり、定期検査報告建築物も年度を合わせて病院については1986年までに竣工のもの、共同住宅については1982年までに竣工のものとしてある。

この結果からは、建築物規模によって報告書を提出する割合が著しく異なる

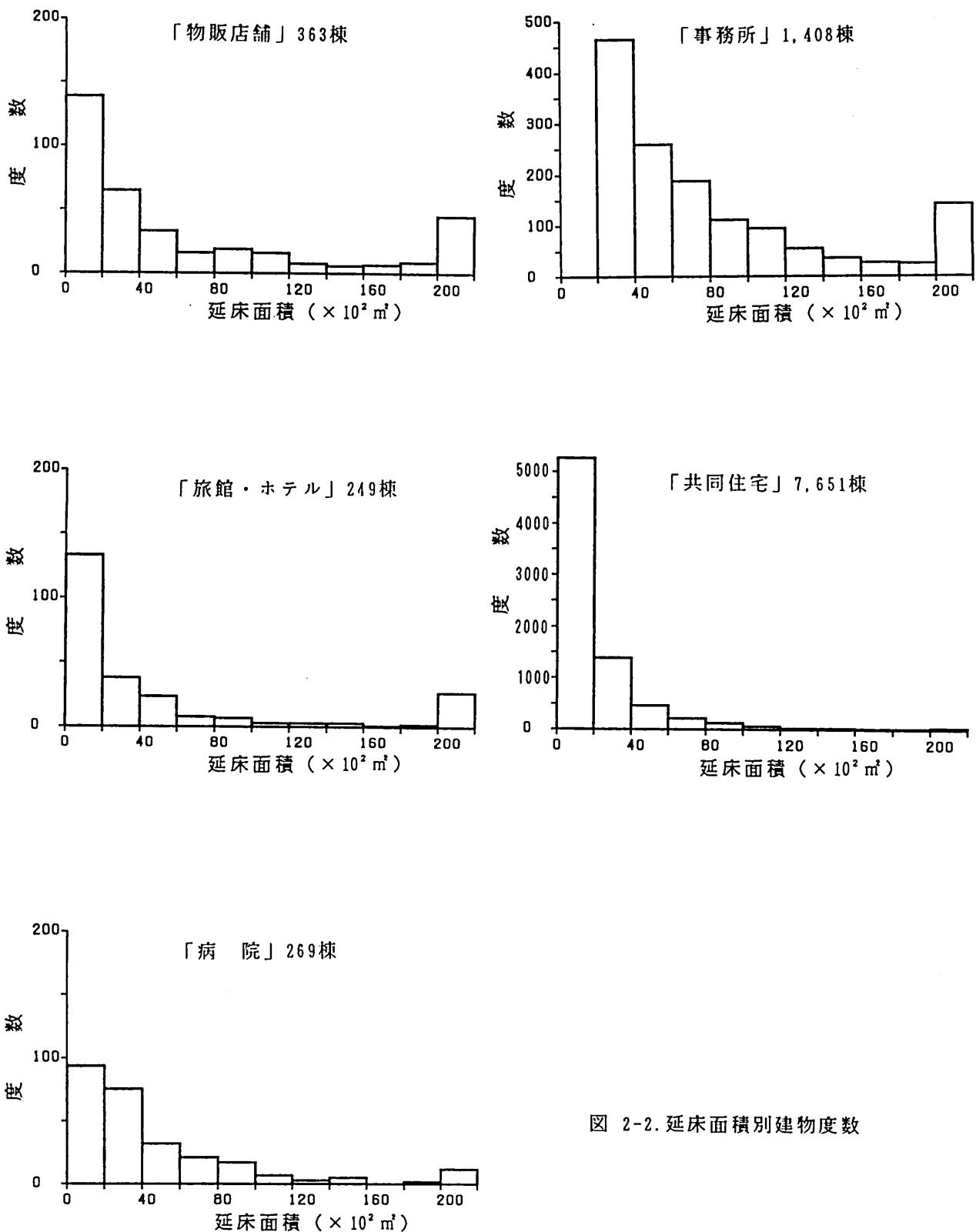


図 2-2. 延床面積別建物度数

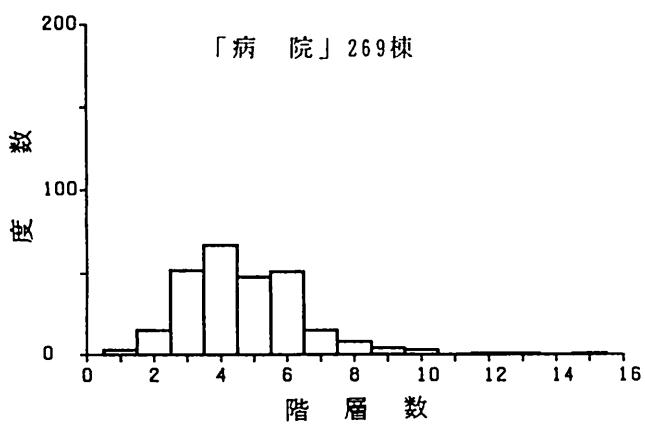
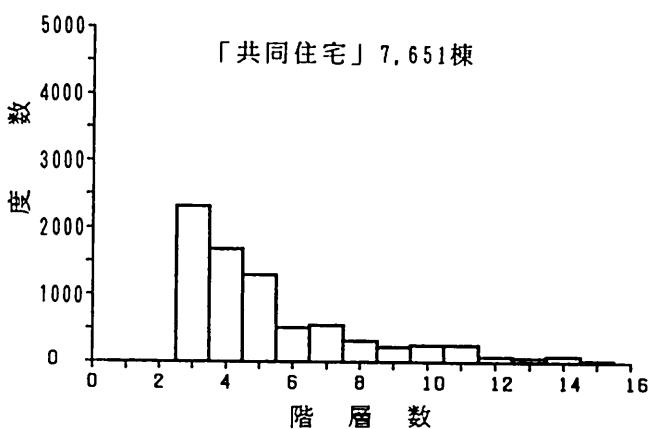
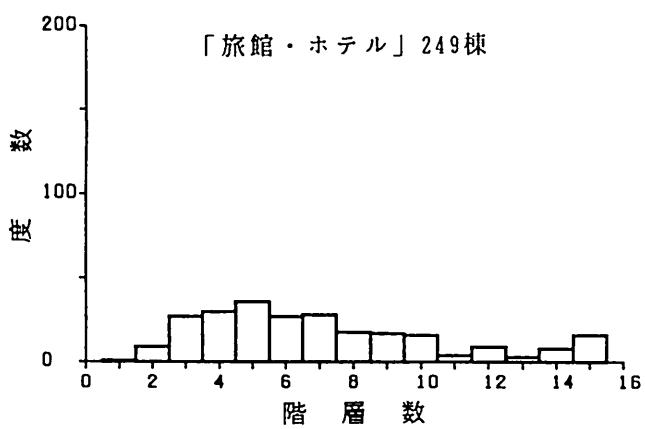
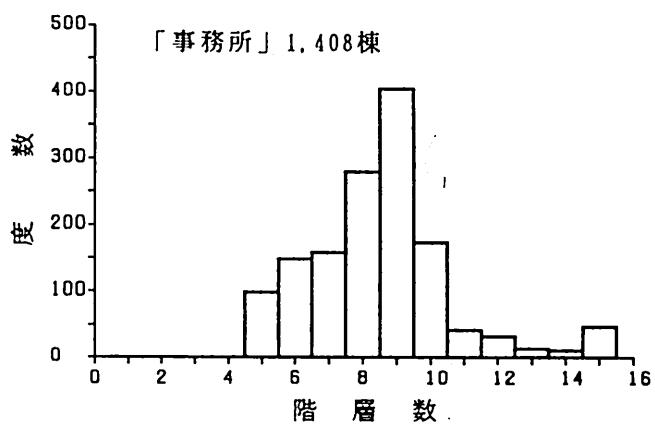
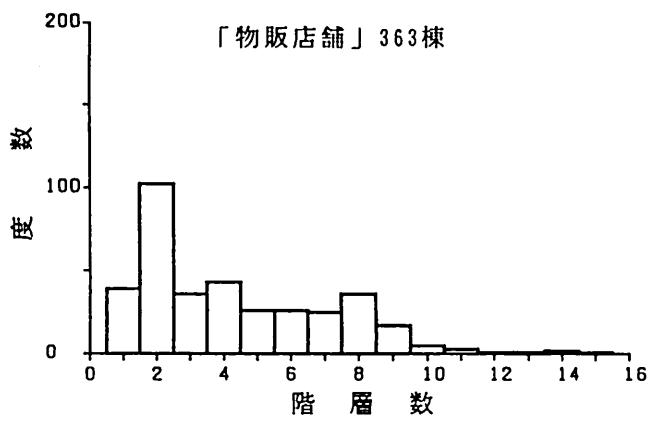


図 2-3. 階層数別建物度数

こと、建築物用途によって報告書を提出する割合が異なることがうかがわれる。しかし、比較のため引用した資料と本論文で利用している建物データベースとでは、用途の定義、対象建築物の規模指定（特に小規模な建築物）が異なっているため、母集団が一致しない可能性に注意すべきである。

表 2-9. 建物データベースと病院統計資料との比較

病院	データ名	1~ 3999 m <sup>2</sup>	4000~ 9999 m <sup>2</sup>	10000 m <sup>2</sup> 以上	合 計
		290	91	37	418
	医療施設調査	501	136	114	751
	報告率 [%]	57.9	66.9	32.5	55.7

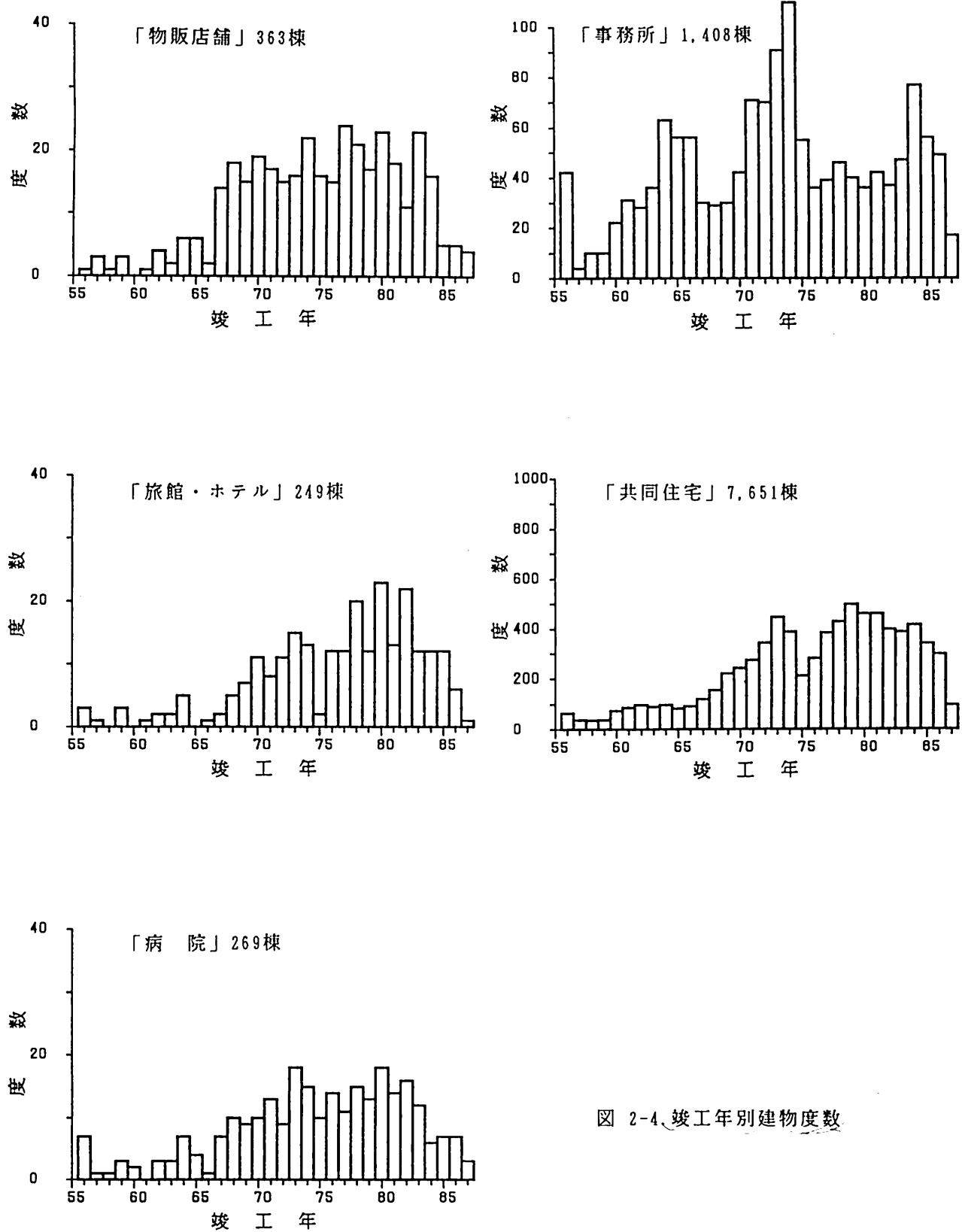
表 2-10. 建物データベースと住宅統計資料との比較

共同住宅 (居住専用)	データ名	3 ~ 5 階	6 階以上	合 計
		6764	2848	9612
	住宅統計調査報告	38700	6900	45600
	報告率 [%]	17.5	41.3	21.1

### 3.1.2 竣工年別建物数

本論文では、後章で詳述するように、火災、故障を時間的に不規則に生起する事象と考えて出火率、故障率を導くことから、ここでは竣工から1987年末に至るまでの竣工年別建物数を概観する。

図2-4は、竣工年別建物度数を用途毎に示したものであり、図2-5は、竣工年別度数を延床面積5,000 m<sup>2</sup>毎に、図2-6は、階層数5層毎に示したものである。ただし延床面積20,001 m<sup>2</sup>以上、21階建以上、1955年以前に竣工した建築物は一括して示してある。



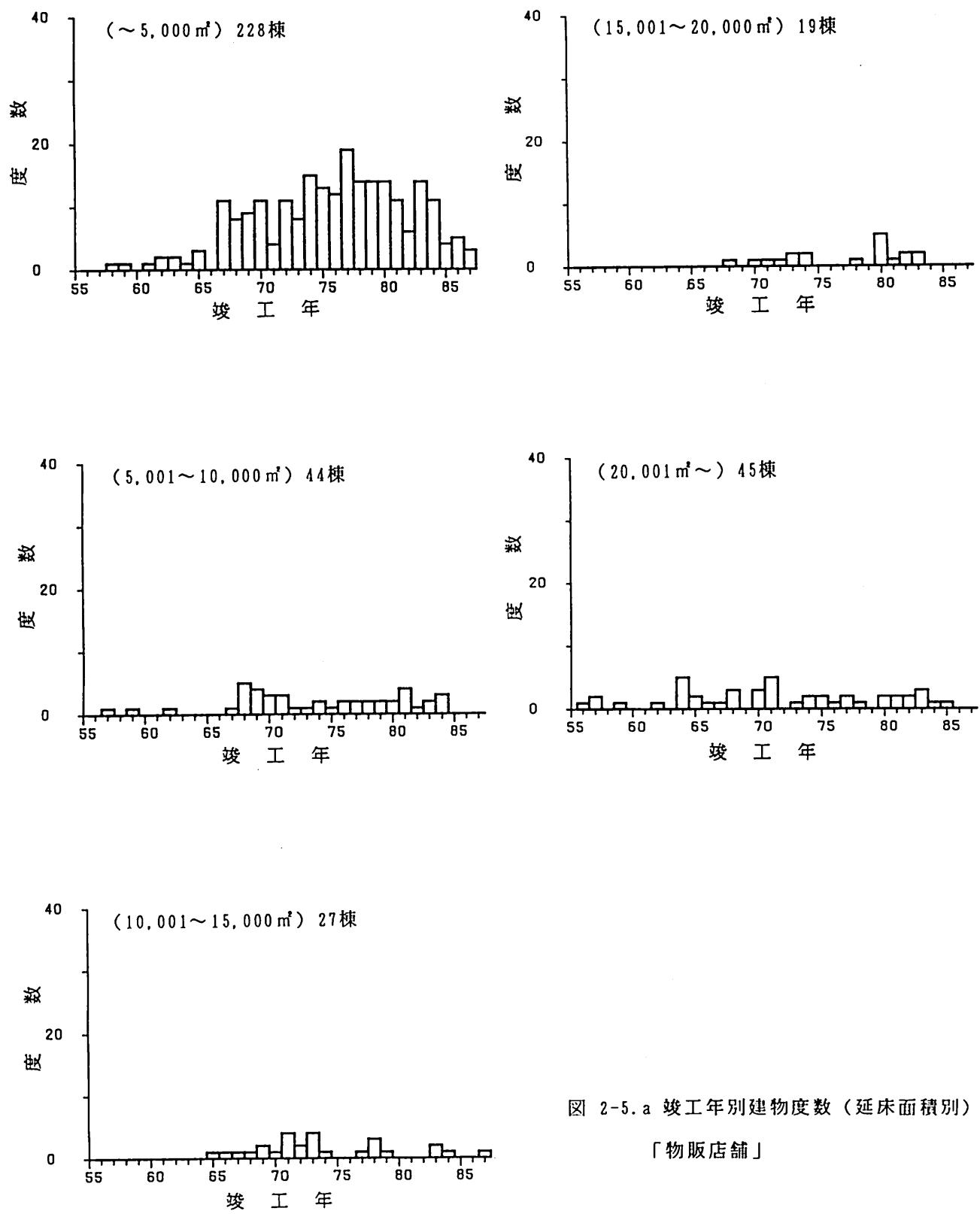


図 2-5.a 竣工年別建物度数（延床面積別）  
「物販店舗」

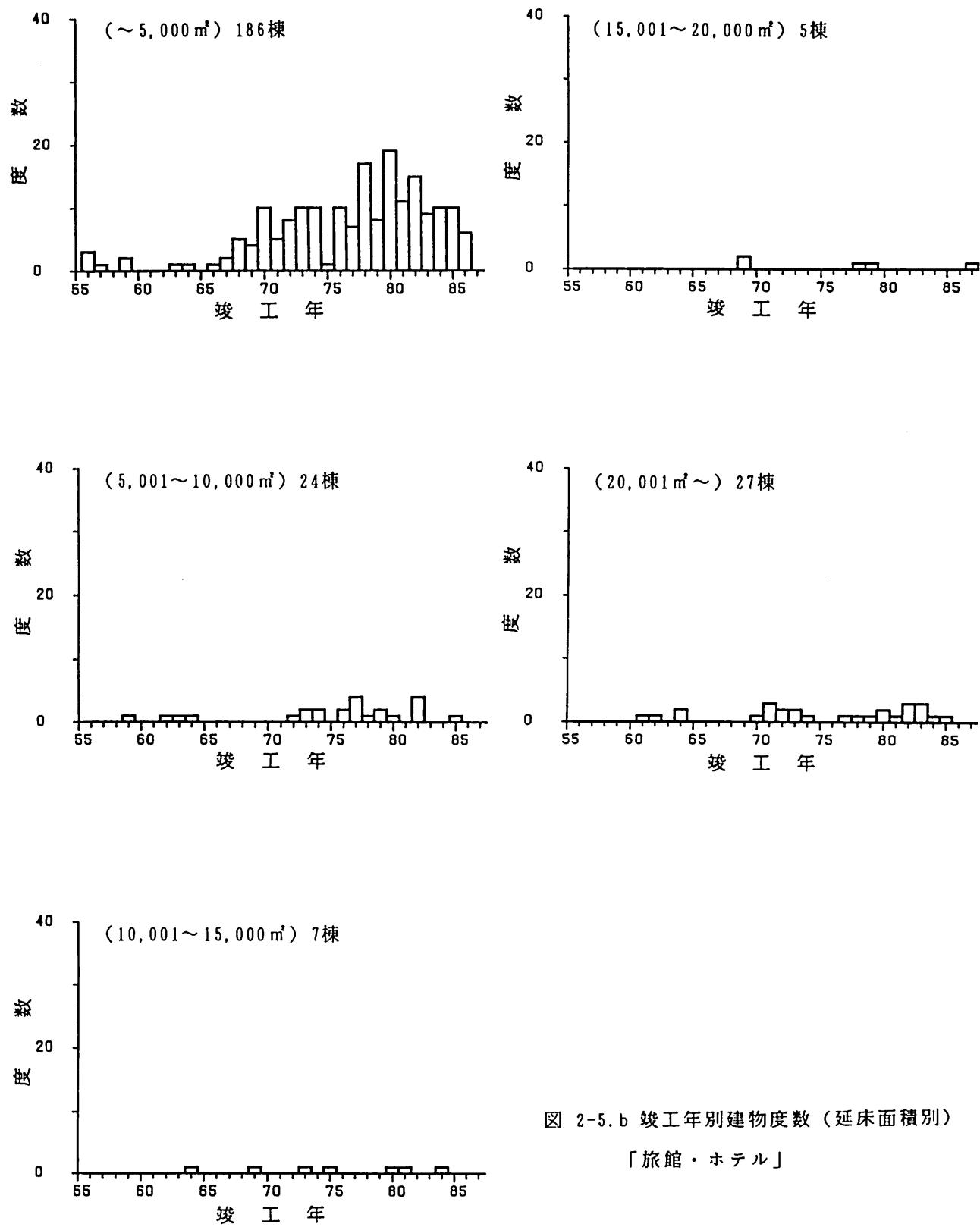


図 2-5.b 竣工年別建物度数（延床面積別）

「旅館・ホテル」

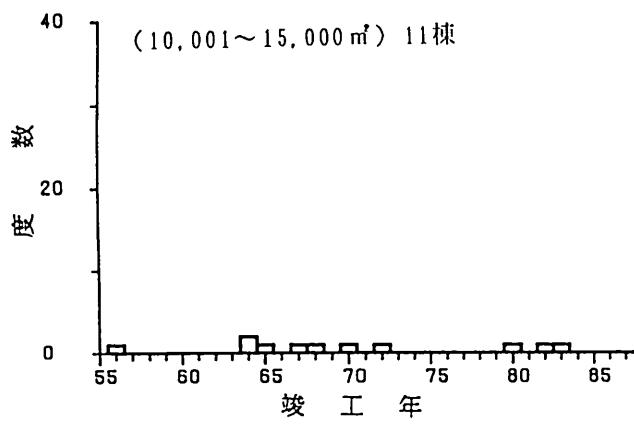
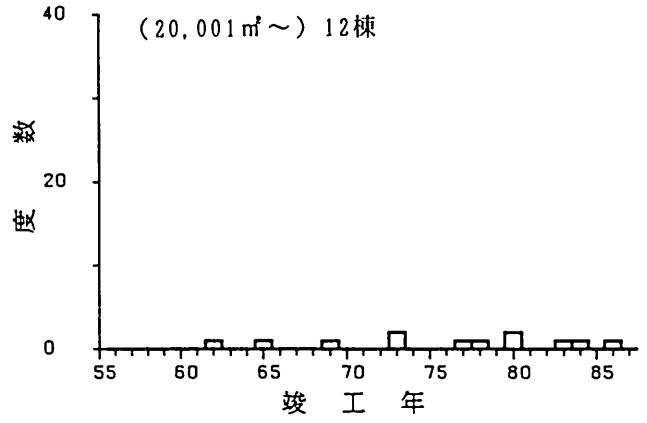
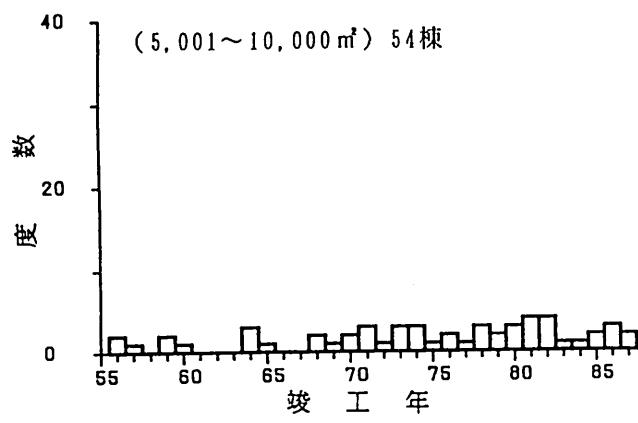
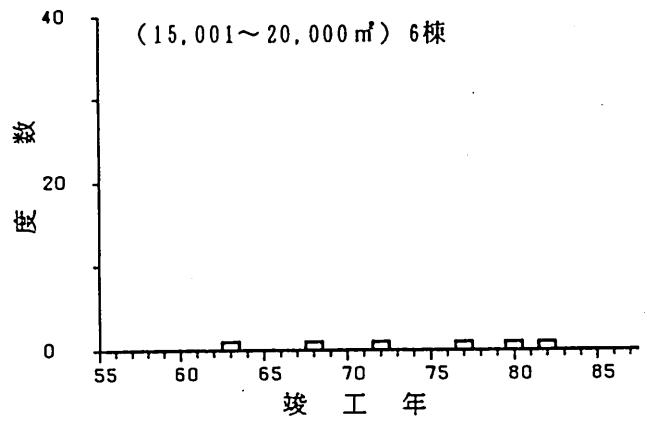
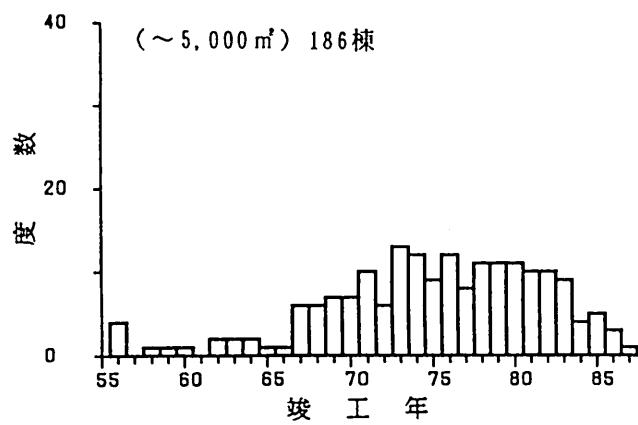


図 2-5.c 竣工年別建物度数（延床面積別）  
「病院」

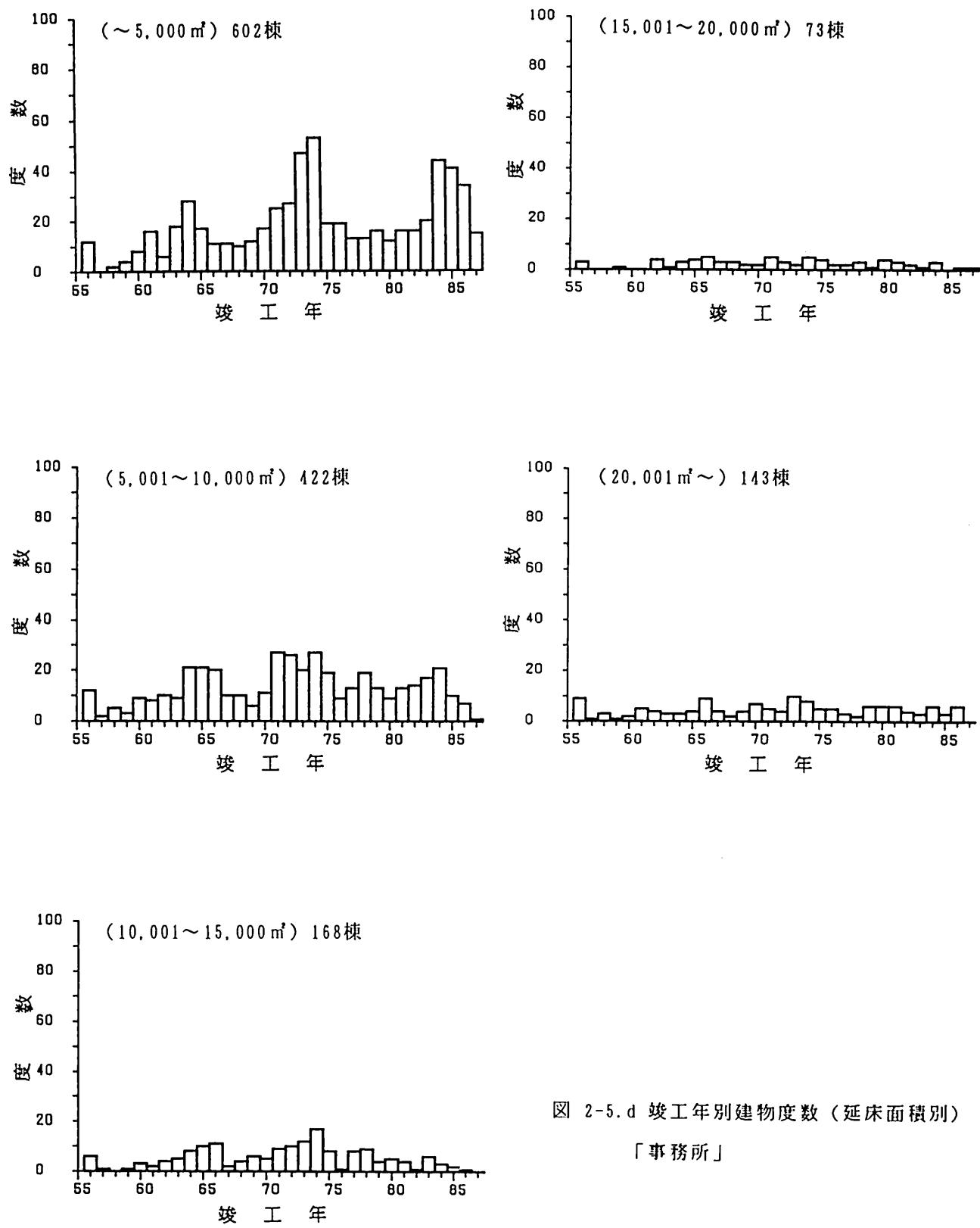


図 2-5.d 竣工年別建物度数（延床面積別）  
「事務所」

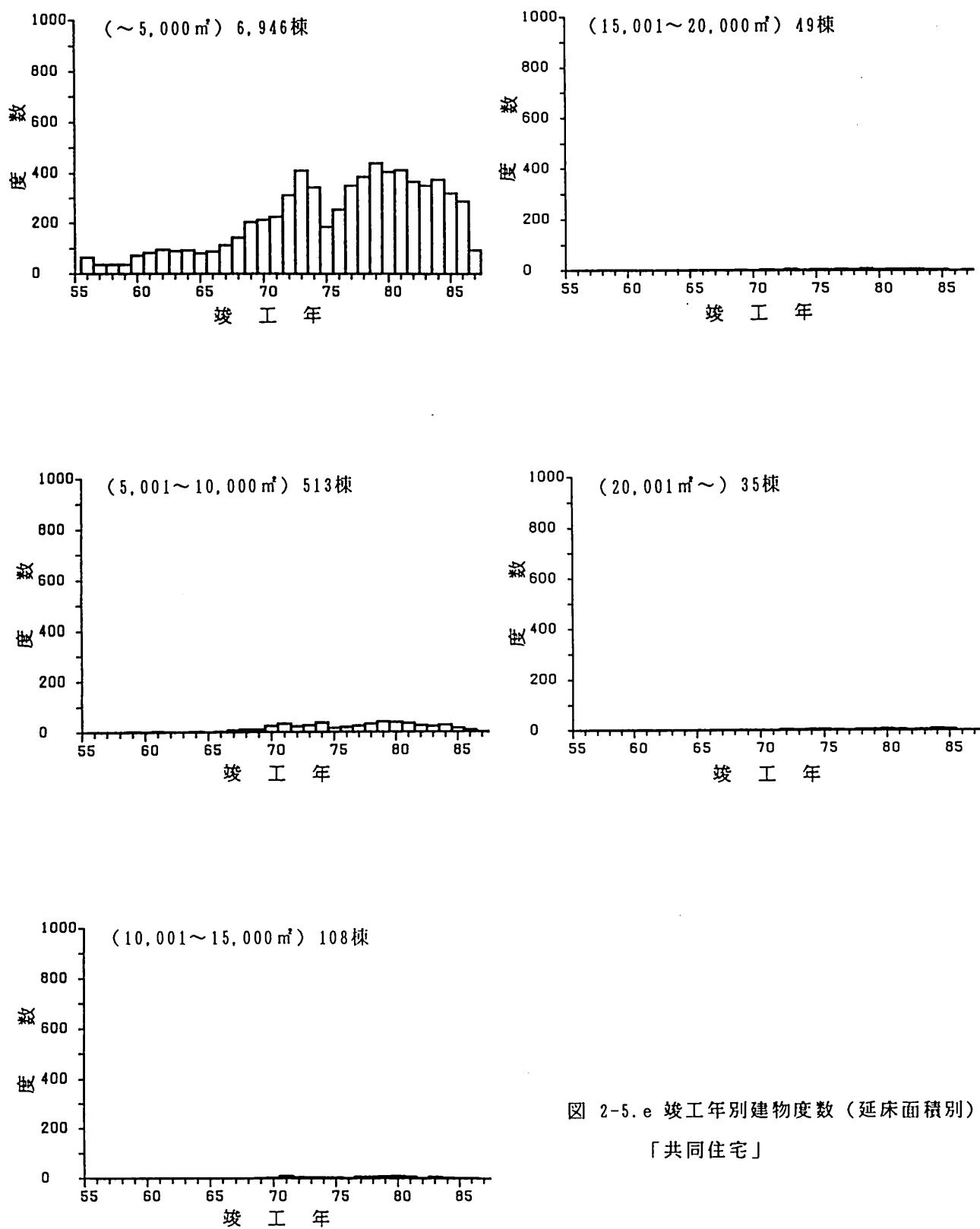


図 2-5.e 竣工年別建物度数（延床面積別）  
「共同住宅」

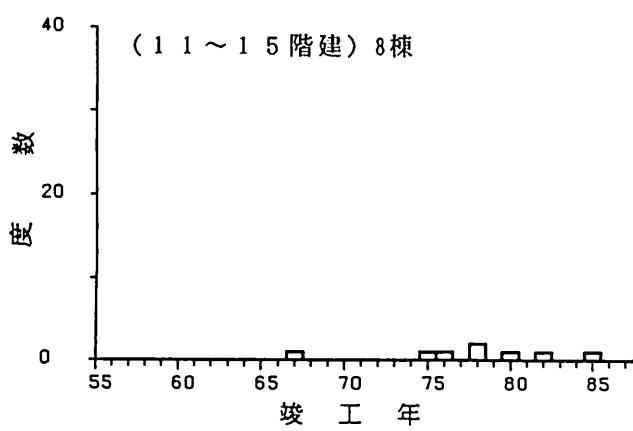
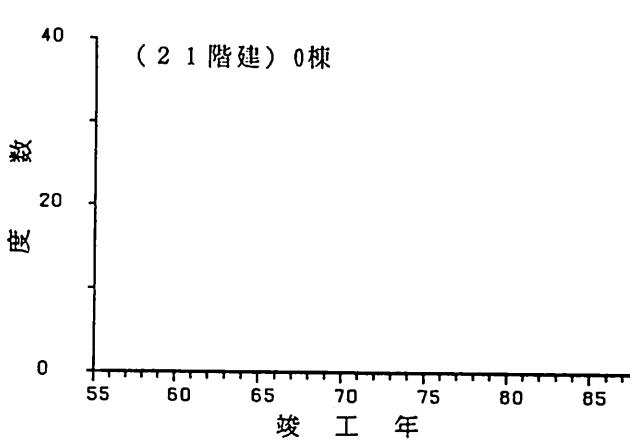
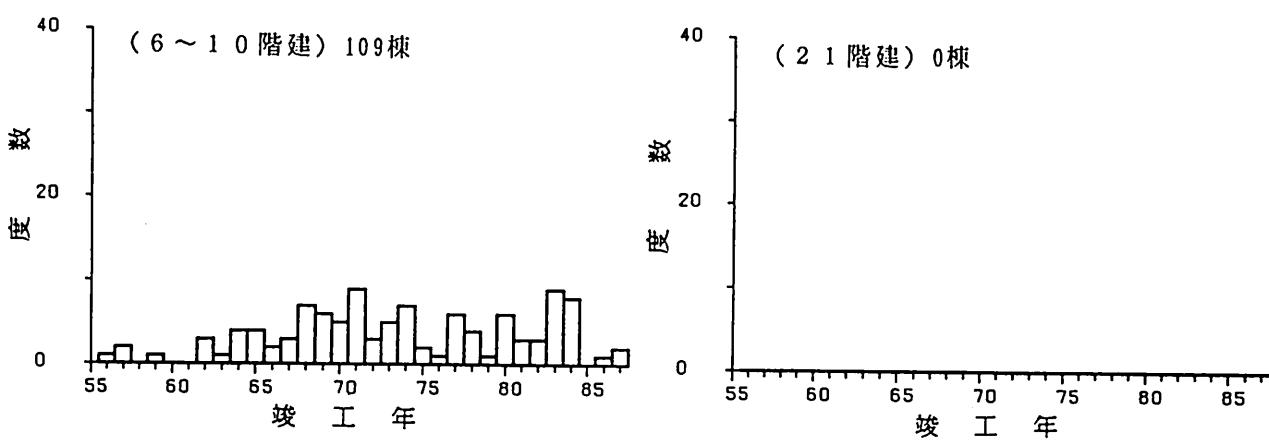
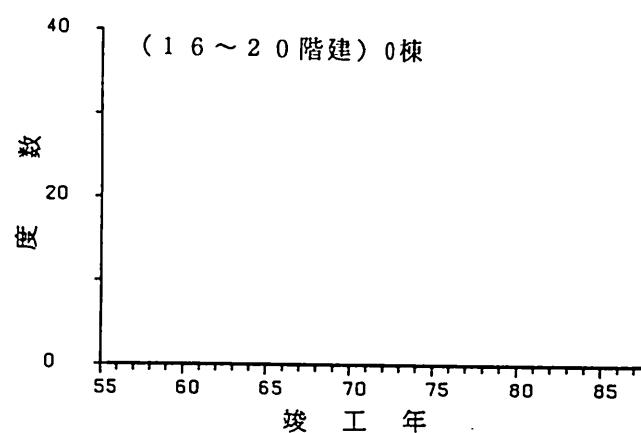
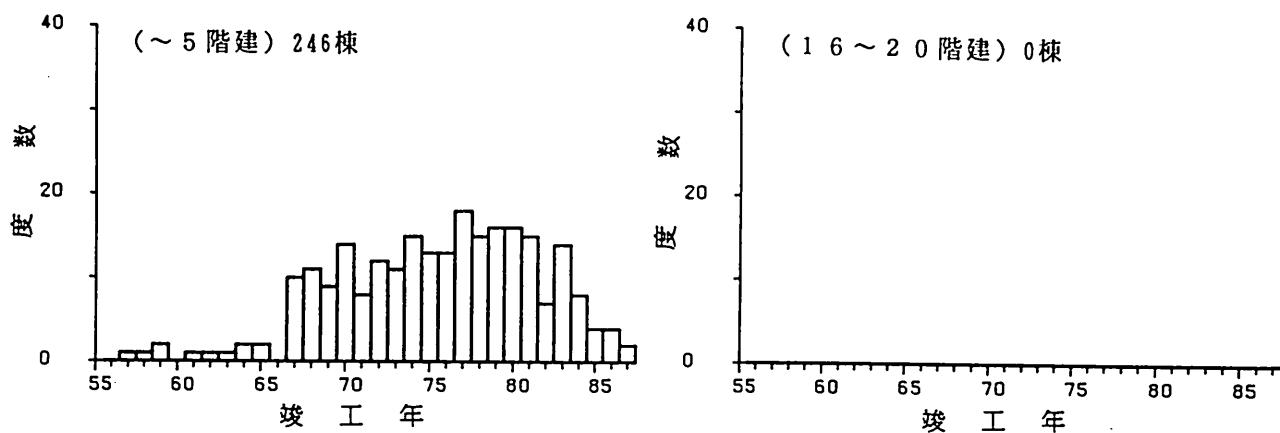


図 2-6.a 竣工年別建物度数（階層数別）  
「物販店舗」

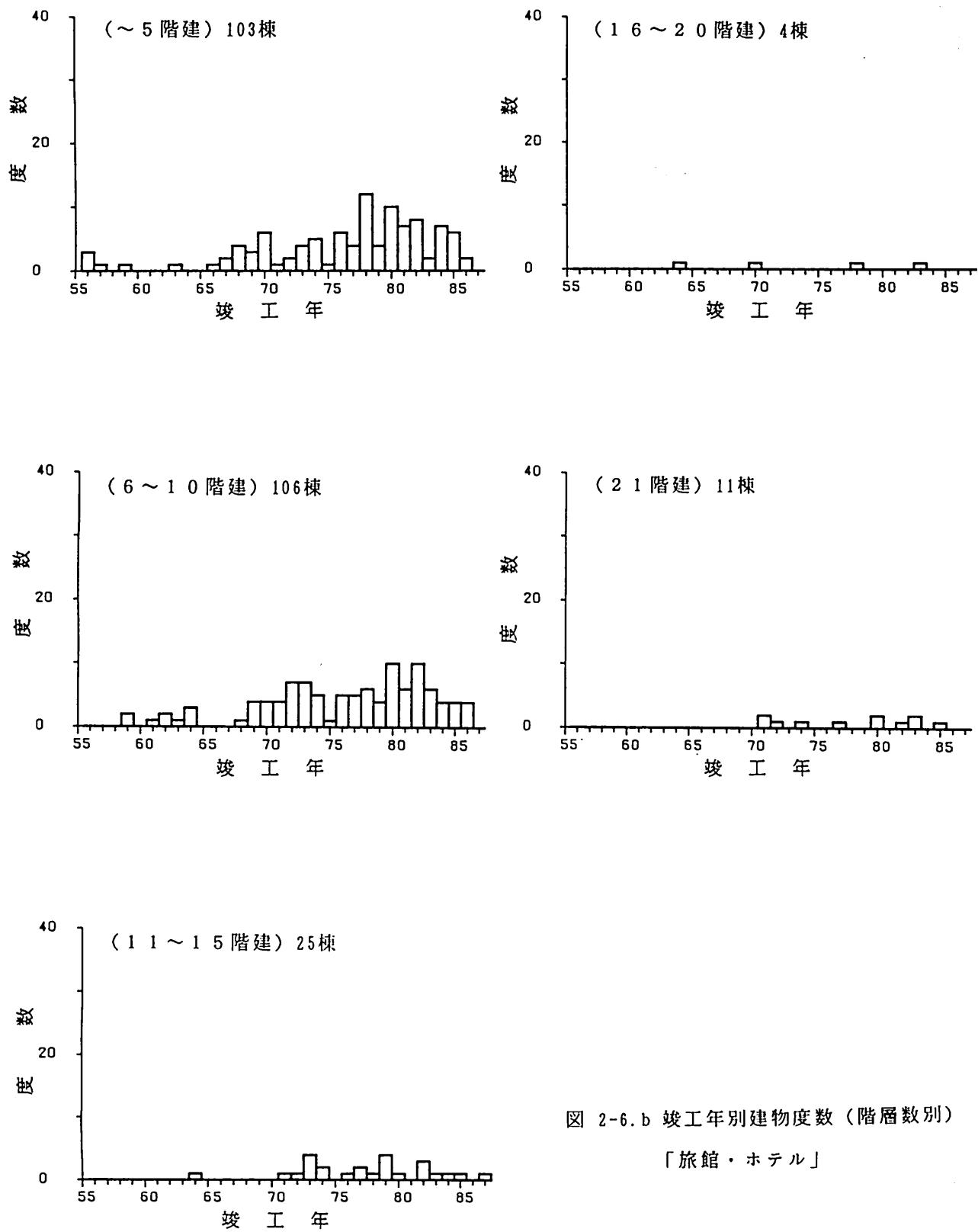


図 2-6.b 竣工年別建物度数（階層別）

「旅館・ホテル」

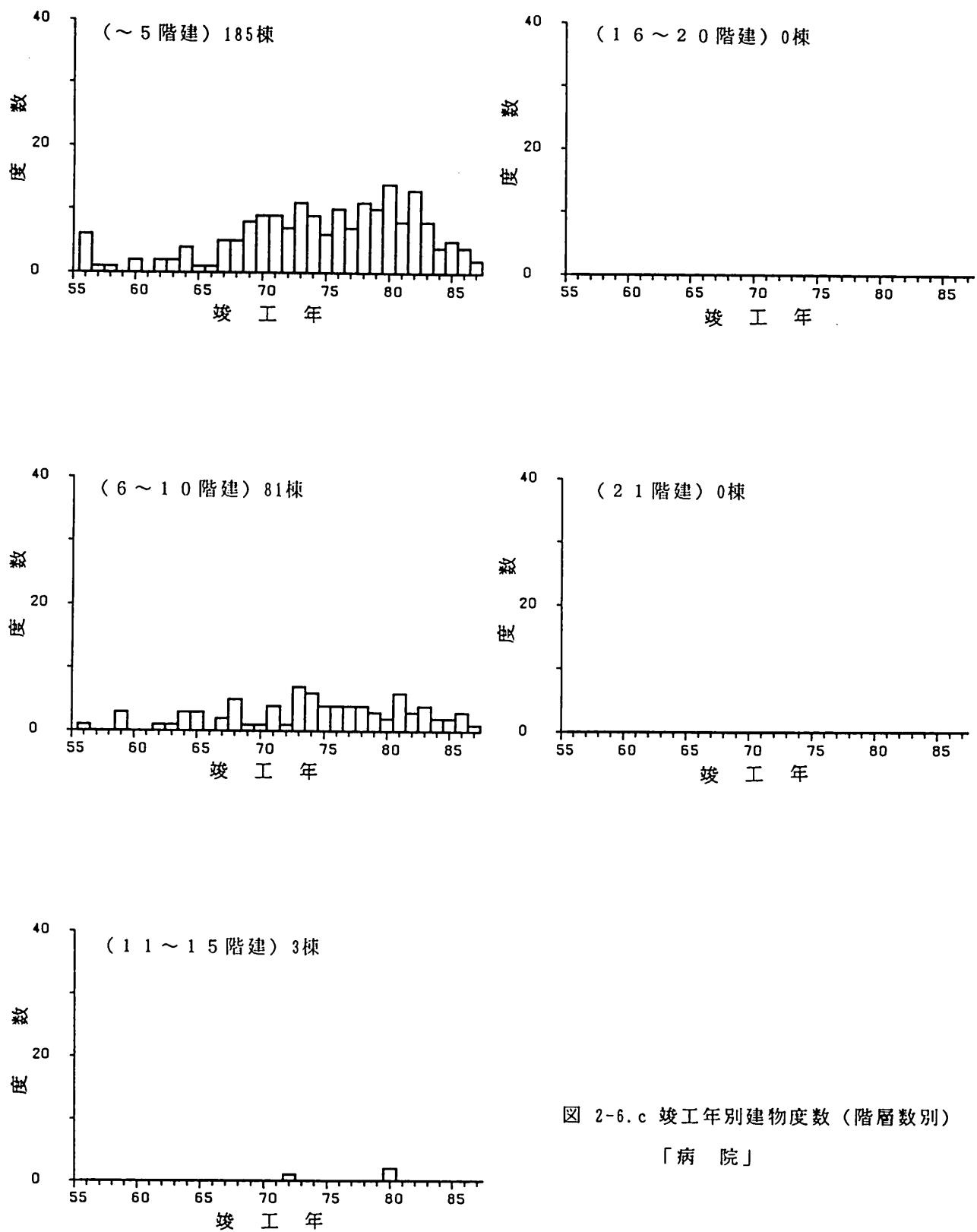


図 2-6.c 竣工年別建物度数（階層数別）  
「病院」

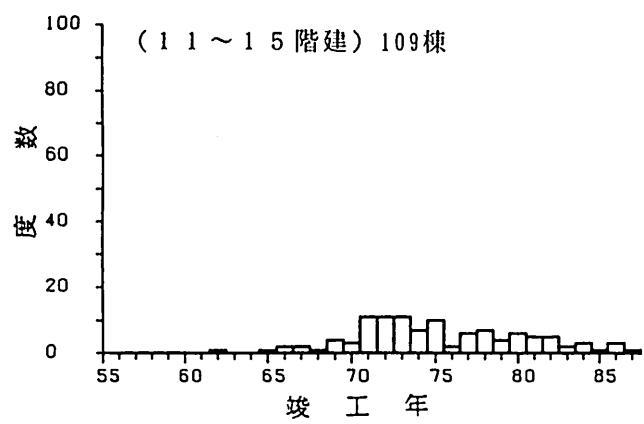
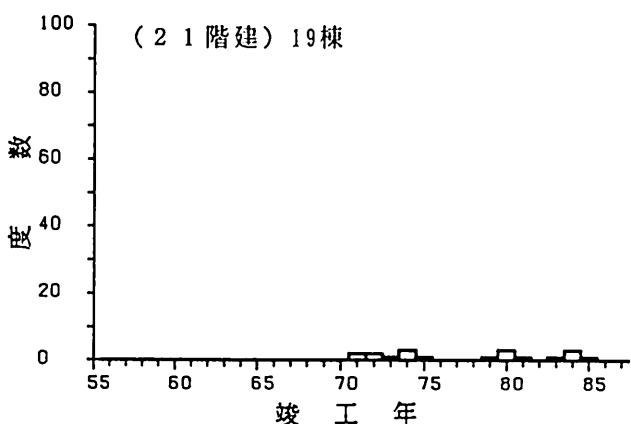
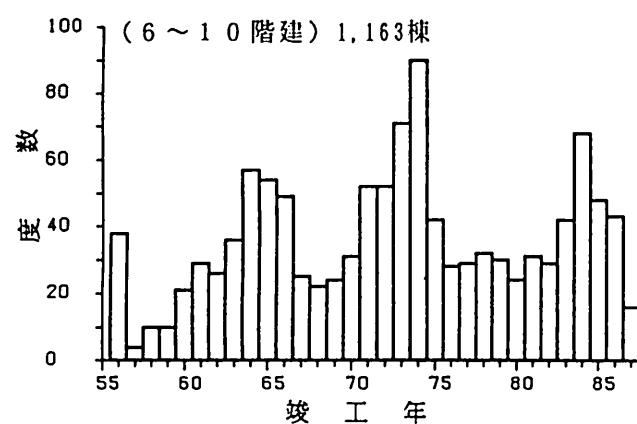
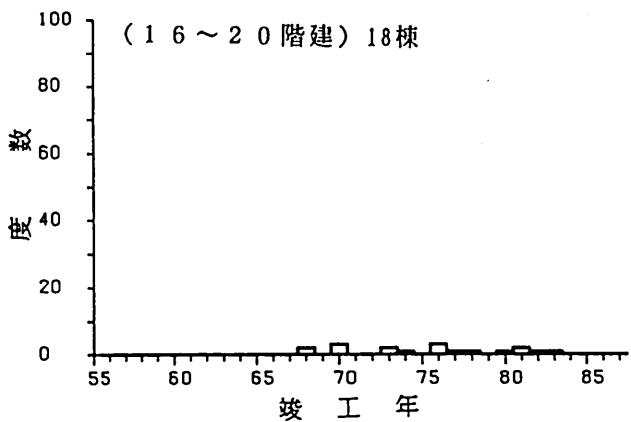
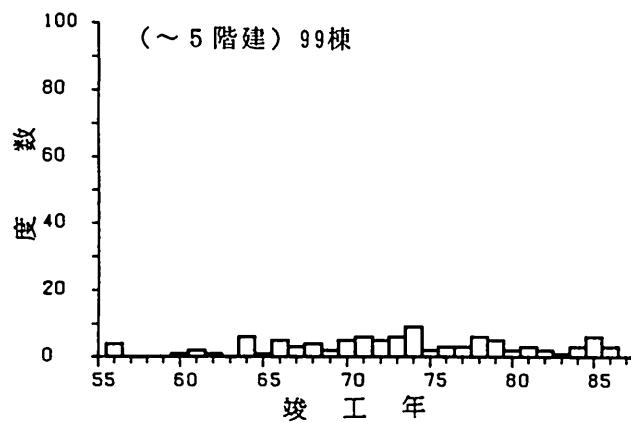


図 2-6.d 竣工年別建物度数（階層数別）  
「事務所」

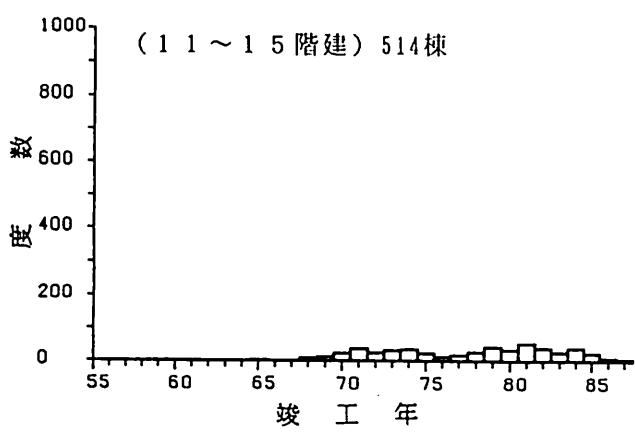
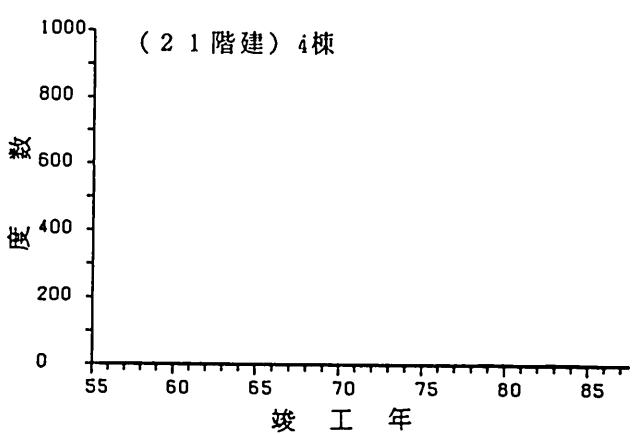
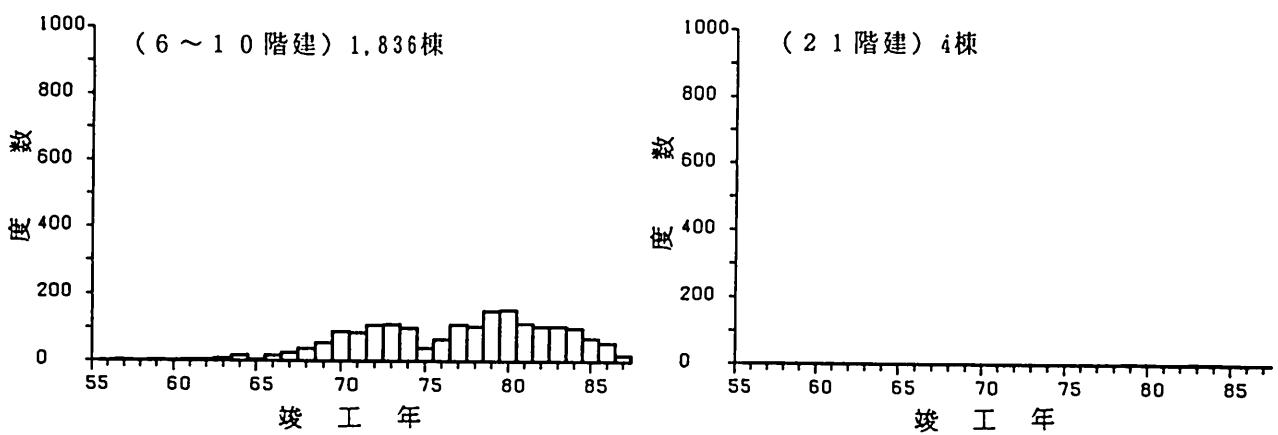
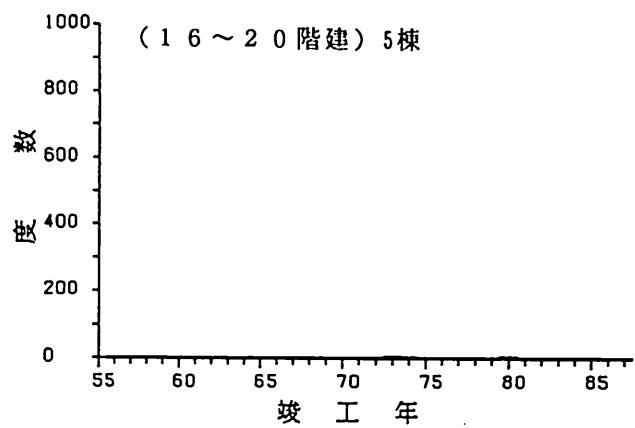
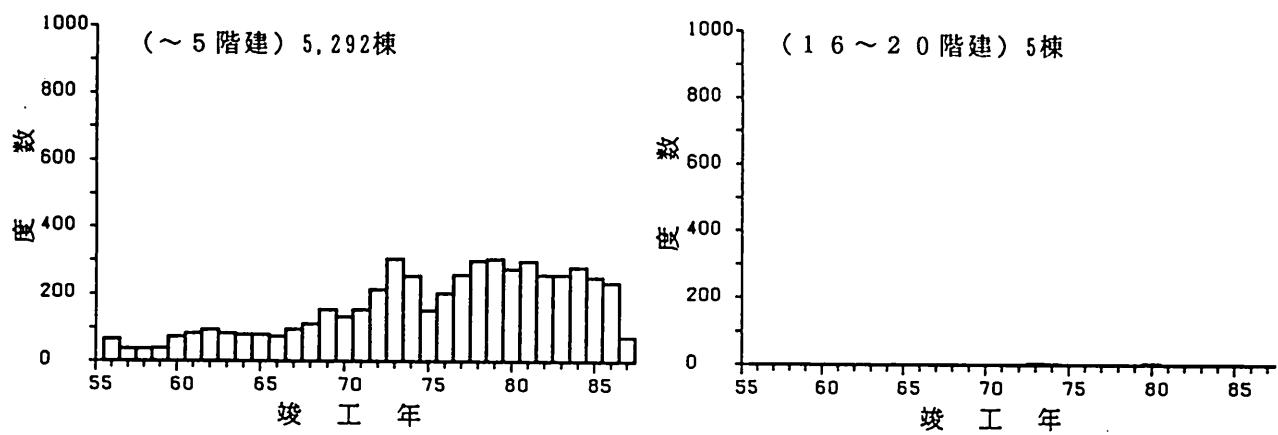


図 2-6.e 竣工年別建物度数(階層数別)  
「共同住宅」

### 3.2 調査対象建築設備

本項では、建築設備と建築設備定期検査実績を概観する。建築設備に関しては、表2-3に示した4種の設備が、この数十年間に既存建築物にどの程度設置されてきたかを用途別、規模別にみる。次に建築設備定期検査制度は建築基準法によって以前から規定されていたが、監督行政庁への報告結果が公式の形でまとめられ始めたのは最近数年間のことである。本論文で利用した建物データベースには、過去1年～4年間の定期検査結果が収録されており、ここから建築物用途・規模別に定期検査の回数、検査間隔等の検査実績を一覧にする。

#### 3.2.1 建築設備の設置状況

ここでは、建築物の用途毎および $5,000\text{m}^2$ で区切った延床面積毎に、換気、排煙、非常用照明、給排水設備の設置率の推移を建築物の竣工年に対して明らかにする。

図2-7は、建築物用途別にそれぞれの設備の設置率の推移を示したものであり、図2-8は、延床面積 $5,000\text{m}^2$ 毎に設置率推移を示したものである。

ここで、t年における設備の設置率  $p(t)$  は以下の式によって算定される。

$$p(t) = \frac{\sum_{i=1900}^t (\text{当該設備の設置されている } i \text{ 年に竣工した建物数})}{\sum_{i=1900}^t (\text{i年に竣工した建物数})} \quad (2.1)$$

定期検査の対象となる4種の設備のうち、給排水設備は1959年、排煙設備と非常用照明設備は1971年に、建築基準法で設置が義務づけられたものであり、図2-7、図2-8から1971年以降ほとんどの建築物用途・延床面積において、排煙設備、非常用照明設備の設置率の高くなることが読み取れる。

ただし、検査されていない設備は、建物データベースに存在が記録されないので、本論文で算定している設置率は、設備の存在を正確に表現していない。

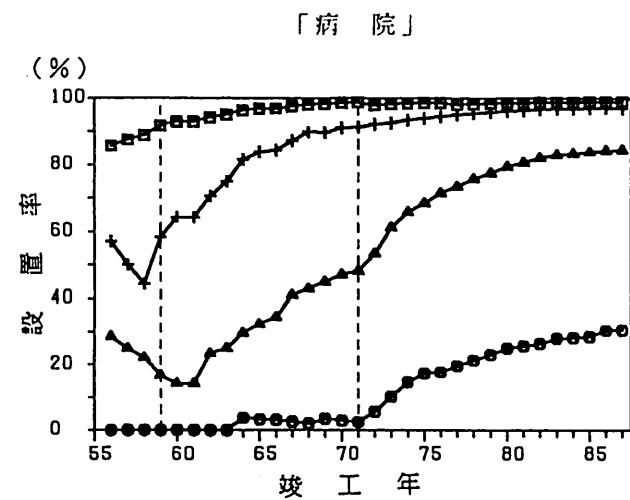
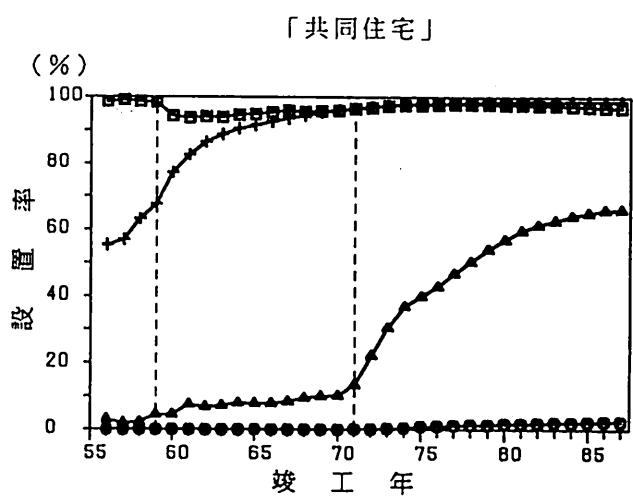
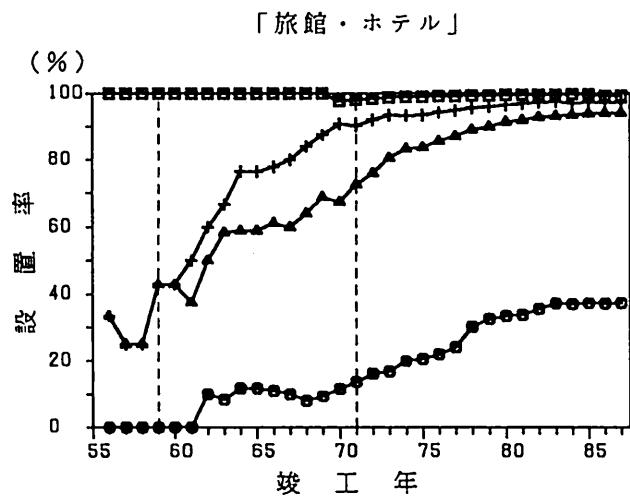
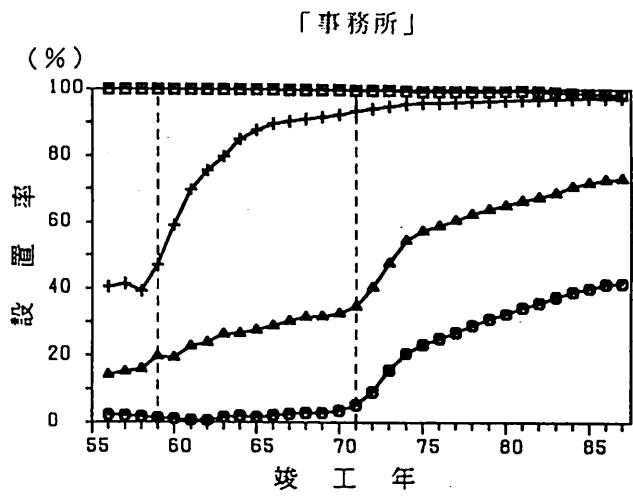
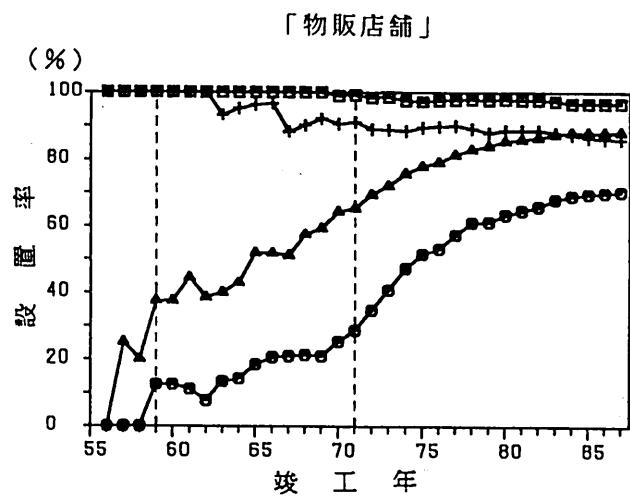


図 2-7. 設備設置率の推移

- 換氣設備
  - 排煙設備
  - △ 非常用照明設備
  - + 級排水設備

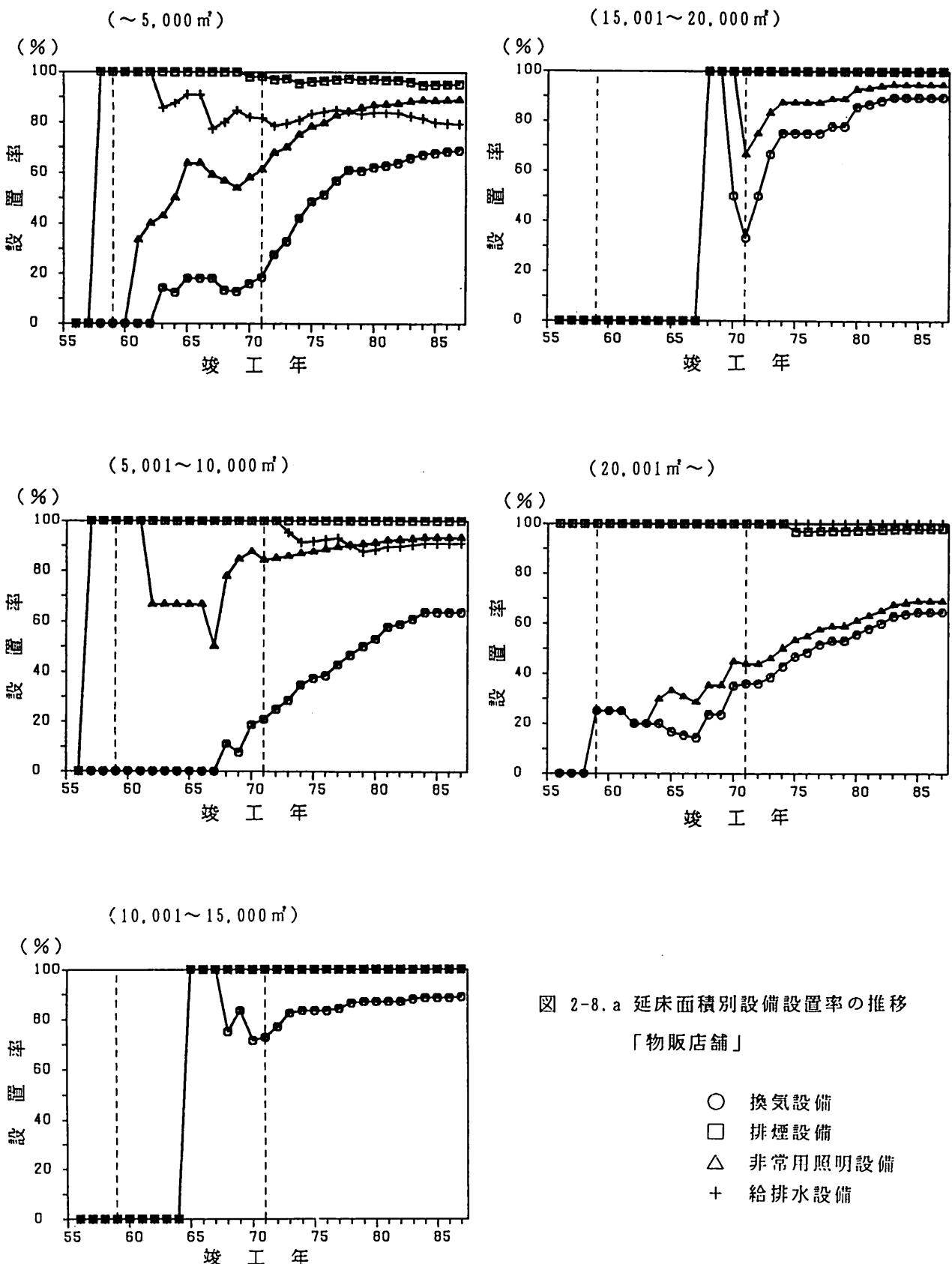


図 2-8.a 延床面積別設備設置率の推移  
「物販店舗」

- 換気設備
- 排煙設備
- △ 非常用照明設備
- + 給排水設備

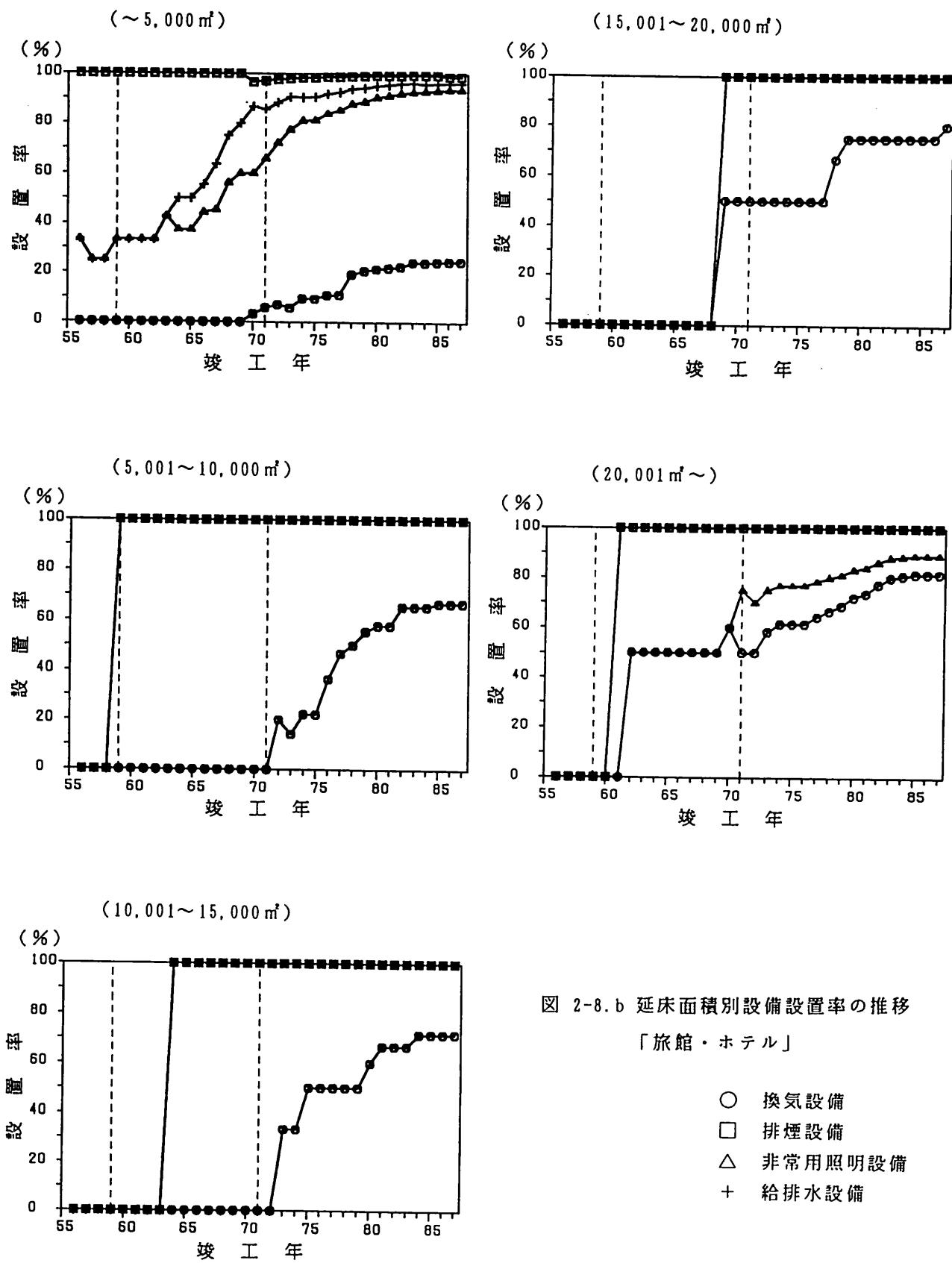


図 2-8.b 延床面積別設備設置率の推移  
「旅館・ホテル」

- 換氣設備
- 排煙設備
- △ 非常用照明設備
- + 給排水設備

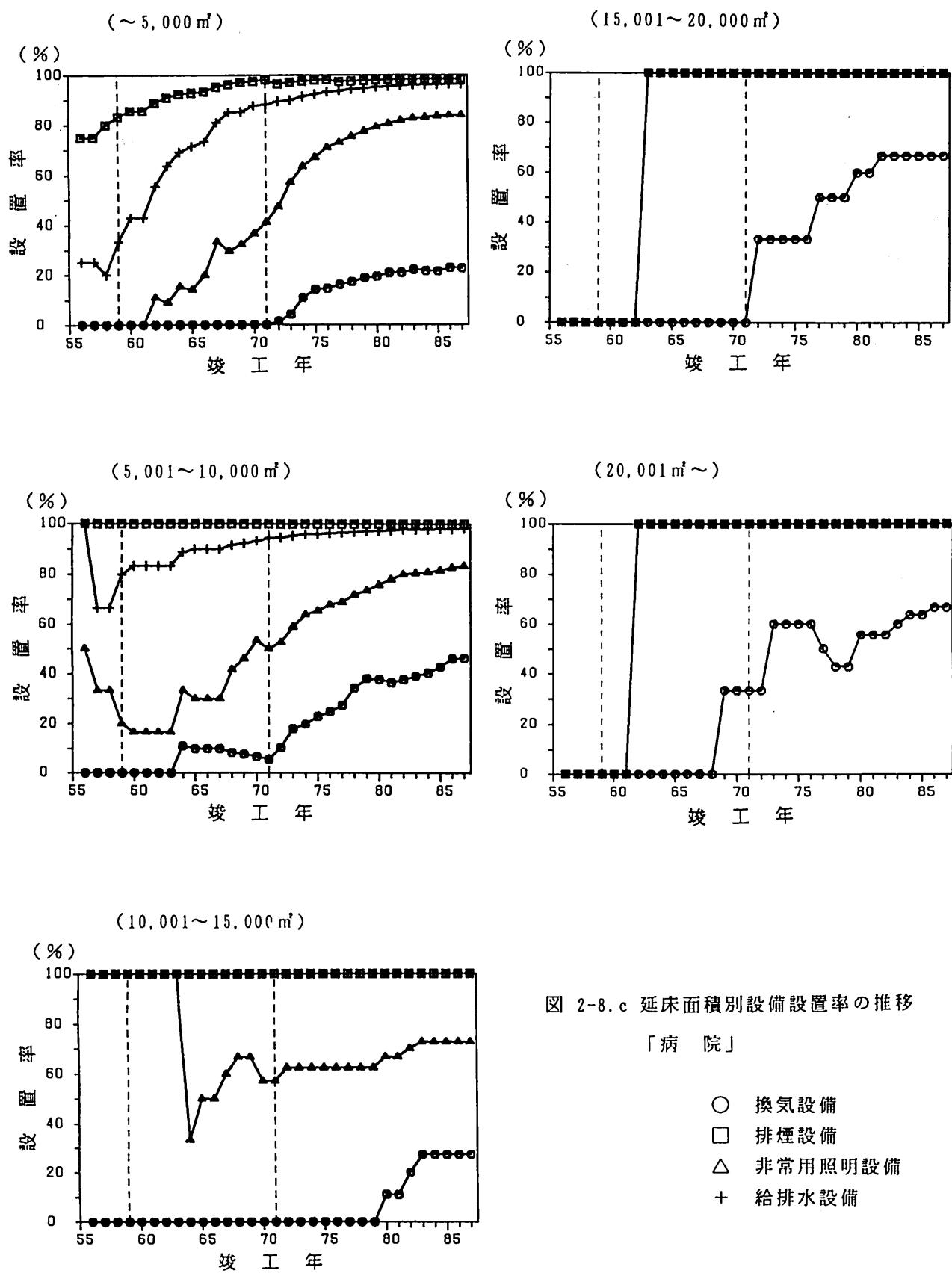


図 2-8.c 延床面積別設備設置率の推移  
「病院」

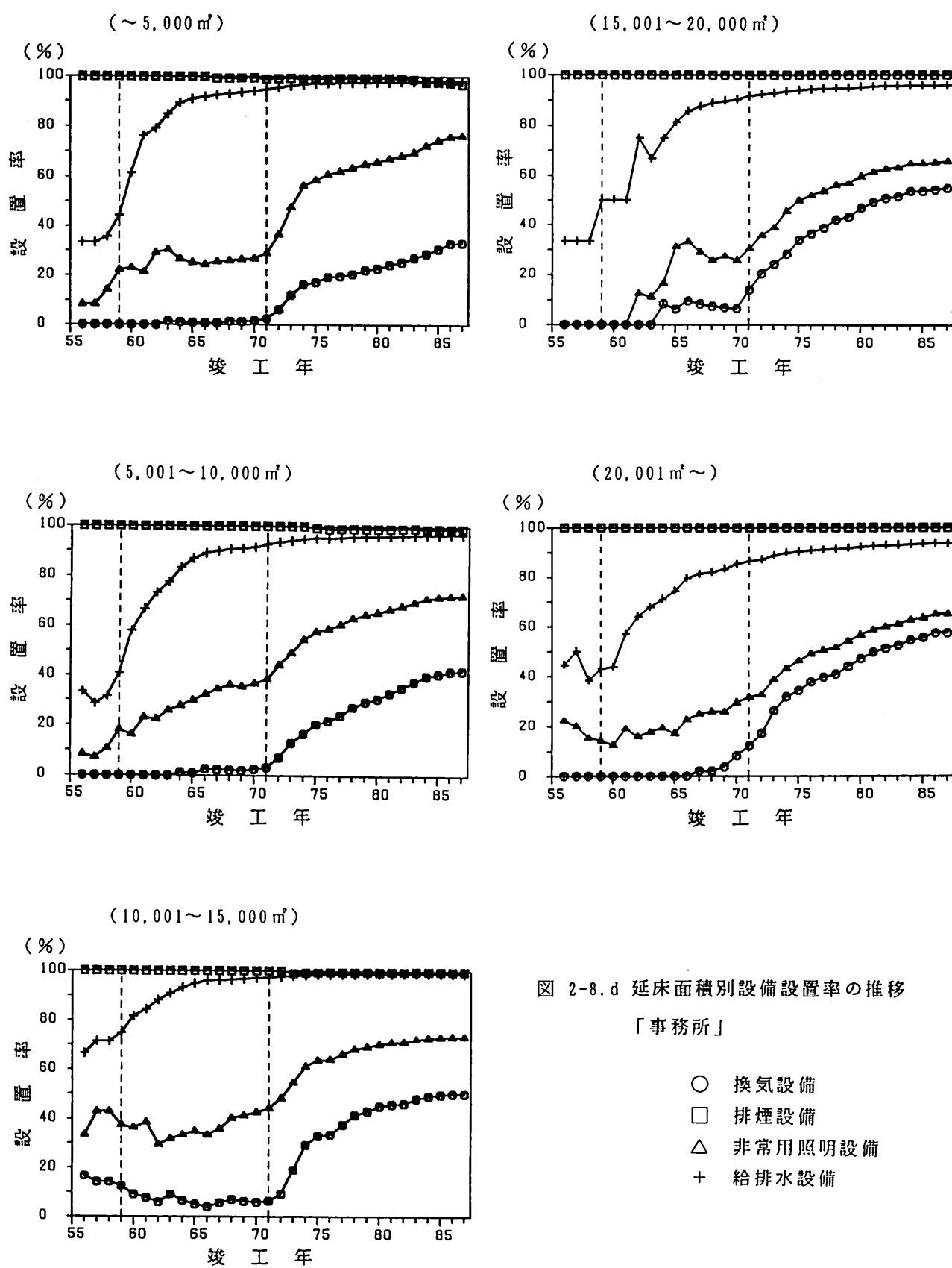


図 2-8.d 延床面積別設備設置率の推移  
「事務所」

- 換気設備
- 排煙設備
- △ 非常用照明設備
- + 給排水設備

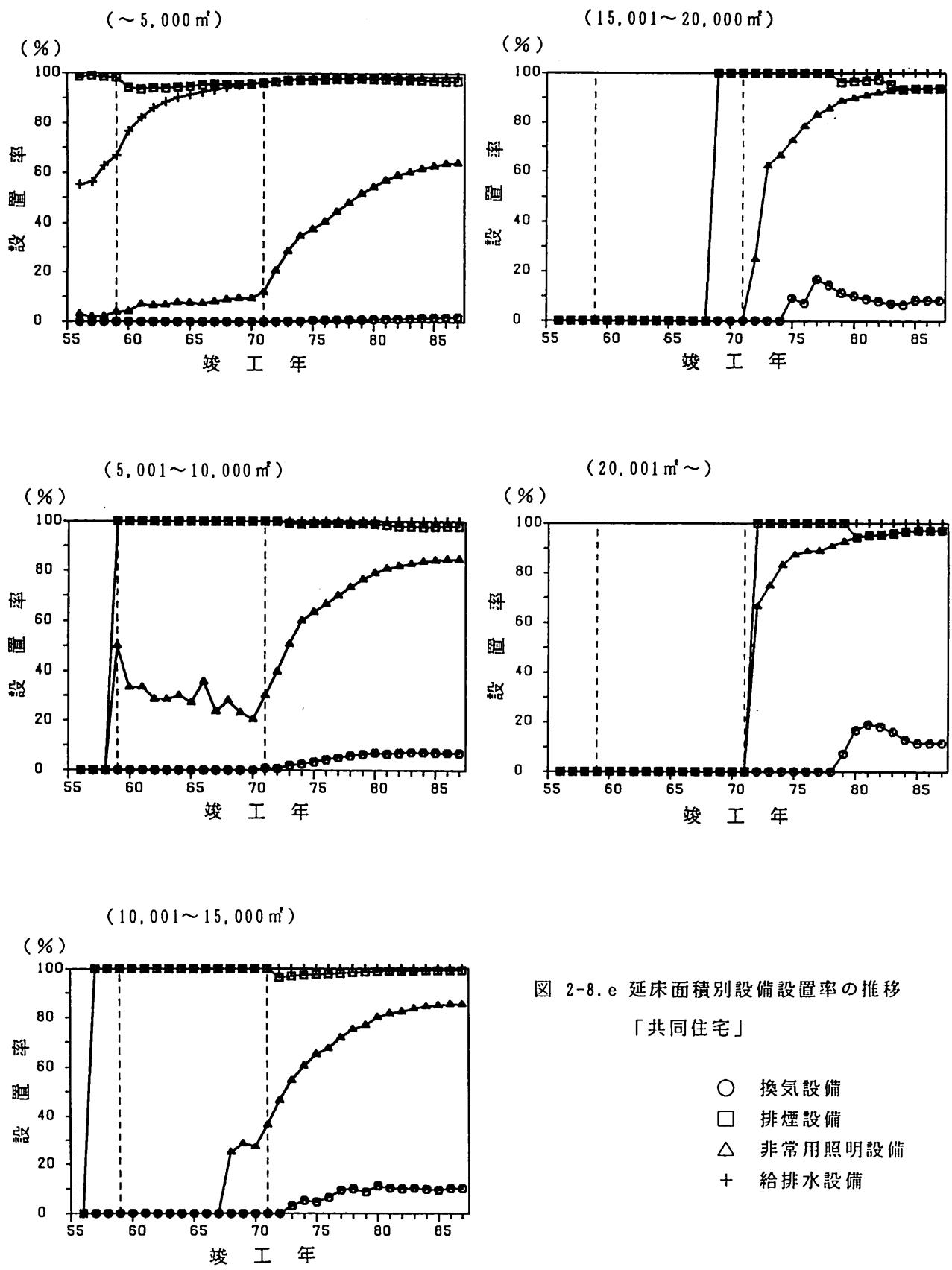


図 2-8.e 延床面積別設備設置率の推移  
「共同住宅」

- 換気設備
- 排煙設備
- △ 非常用照明設備
- + 給排水設備

### 3.2.2 建築設備定期検査実績

ここでは、建築物用途・延床面積別の建築設備定期検査実績を、検査の回数・検査間隔の点から明らかにする。

表2-11は、建物データベースに記録されている各建築物の検査回数を、建築物用途・規模別に集計し示したものである。建物データベースに記録される検査回数の最大は建築物1棟当たり4回であり、表2-11は、検査回数が1回から4回までのそれぞれの建築物の数を集計したものである。ただし延床面積の区分は、第5章の図5-1に示されている、非常用照明器具の抜取検査の際の延床面積区分に従っている。

表2-12は、各建築物用途について、建築物の竣工から最初の定期検査までの平均経過年数と、定期検査が複数回実施されている場合の、平均検査間隔年数を、検査回数・延床面積別に示したものである。表中、検査回数1回の場合は

表 2-11. 定期検査実施回数別建物数

規 模 用 途		m <sup>2</sup> ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~	計
物販店舗	1回	44	51	16	6	6	1	2	126
	2回	15	28	11	14	3	6	5	82
	3回	29	41	36	17	13	10	33	179
	4回	17	69	26	11	13	7	10	153
旅館・ホテル	1回	48	37	11	3	0	2	1	102
	2回	36	21	9	5	1	3	5	80
	3回	30	34	18	9	4	2	14	111
	4回	4	12	11	1	3	0	7	38
病院	1回	32	60	19	9	3	0	1	124
	2回	12	27	20	17	6	2	4	88
	3回	18	66	41	18	7	4	7	161
	4回	3	23	10	5	0	2	0	43
事務所	1回	-	202	250	97	39	22	26	636
	2回	-	158	280	234	131	56	111	970
	3回	-	6	32	33	29	10	10	120
	4回	-	1	0	2	4	0	7	14
共同住宅	1回	2,135	1,632	370	107	32	10	10	4,296
	2回	851	891	265	114	34	14	12	2,181
	3回	1,165	1,383	455	168	59	31	19	3,280
	4回	346	403	144	38	12	11	7	961

検査間隔の欄に-が記入してあり、データのない場合は空白にしてある。

表2-11から、どの建築物用途においても60%前後の建築物で2回以上定期検査が実施されていることが分かり、表2-12からは、建築物竣工後初めて定期検査の記録が得られるまで平均的に10年前後ないしはそれ以上経過していること、定期検査間隔がほぼ1年とみなせることが

表 2-12. 用途別定期検査間隔(年)

## 「物販店舗」

規 模 検査回数		㎡ ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1回	竣工一初回	8.22	7.78	11.86	10.36	12.25	13.98	4.97
	検査間隔	-	-	-	-	-	-	-
2回	竣工一初回	10.81	9.77	11.88	8.58	6.82	5.97	8.41
	検査間隔	1.32	1.17	1.21	1.10	1.05	1.17	1.21
3回	竣工一初回	11.06	10.52	11.93	11.98	13.75	10.65	15.24
	検査間隔	1.10	1.09	1.12	1.13	1.08	1.02	1.05
4回	竣工一初回	9.91	8.65	10.16	14.90	10.11	7.89	16.14
	検査間隔	0.99	1.01	1.01	1.02	0.98	1.02	1.00

## 「旅館・ホテル」

規 模 検査回数		㎡ ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1回	竣工一初回	8.54	8.94	9.94	9.18		4.56	2.46
	検査間隔	-	-	-	-	-	-	-
2回	竣工一初回	8.02	15.35	11.01	10.52	6.60	13.09	8.68
	検査間隔	1.11	0.98	1.13	1.22	1.00	1.22	1.18
3回	竣工一初回	9.68	8.05	8.55	10.79	10.32		11.35
	検査間隔	1.07	1.07	1.07	1.01	1.05		1.10
4回	竣工一初回	9.12	6.31	10.91	23.28	12.83		9.94
	検査間隔	1.01	1.00	1.02	1.09	1.05		1.02

分かる。建築物竣工から最初の定期検査記録が得られるまでの平均経過年数に関する結果は、設備の故障率を解析する場合の解析手法の選択、稼動開始から故障するまでの時間の取扱い方に関して重要なポイントとなることが予想される。

## 「事務所」

規 模 検査回数		㎡ ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1回	竣工一初回	-	13.05	12.82	14.26	16.20	13.77	13.77
	検査間隔	-	-	-	-	-	-	-
2回	竣工一初回	-	12.08	13.27	15.07	15.71	16.72	16.04
	検査間隔	-	1.02	1.05	1.06	1.07	1.04	1.02
3回	竣工一初回	-	13.36	13.50	16.41	15.67	13.45	11.54
	検査間隔	-	1.01	1.00	0.98	0.98	0.96	0.98
4回	竣工一初回	-	7.52		19.64	10.34		24.84
	検査間隔	-	1.01		0.99	0.99		0.99

## 「病院」

規 模 検査回数		㎡ ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1回	竣工一初回	14.78	10.60	9.28	8.49	19.84		8.70
	検査間隔	-	-	-	-	-	-	-
2回	竣工一初回	19.43	9.50	10.67	14.14	31.38	9.44	12.77
	検査間隔	1.09	1.26	1.11	1.21	1.46	1.27	1.16
3回	竣工一初回	15.40	11.92	8.24	14.80	11.46	11.38	8.44
	検査間隔	1.04	1.07	1.10	1.07	1.09	1.00	1.02
4回	竣工一初回	8.50	7.70	10.01	7.92		16.82	
	検査間隔	1.00	1.00	1.00	1.00		0.98	

## 「共同住宅」

規 模 検査回数		㎡ ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001 ~
1回	竣工一初回	9.10	10.71	8.88	8.87	9.15	4.51	10.05
	検査間隔	-	-	-	-	-	-	-
2回	竣工一初回	9.43	9.93	8.11	9.87	9.21	8.39	3.96
	検査間隔	1.21	1.19	1.18	1.17	1.28	1.22	1.16
3回	竣工一初回	11.41	10.52	9.28	9.00	8.89	6.94	6.84
	検査間隔	1.07	1.07	1.09	1.09	1.09	1.14	1.15
4回	竣工一初回	10.50	11.08	9.34	8.44	9.05	7.94	5.00
	検査間隔	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02	1.01	1.05

以上、利用資料から得られる情報を整理して示してきたが、図2-9は、火災データベースをデータベースi)、建物データベースをデータベースii)として、それぞれの調査期間を一括して示したものである。データベースi)の調査期間は、出火建築物すべてについて同一であるが、データベースii)の調査期間は、竣工時刻、建築設備定期検査期間とも建築物毎に異なることから、調査対象建築物によってすべて異なっている。図2-9から、データベース毎の調査期間が異なること、火災データベースの調査期間が比較的短期間なことが分かる。調査期間

に関するこのような事情に加えて、第4章、第5章で解析している出火事象、故障事象とも発生頻度が低いことを考え併せると、特に2種類のデータベースを併せ解析する必要のある火災については、データベース内の情報を有効に利用できる解析手法が必要となる。

第3章では、事象の生起頻度が低く、標本毎に観測期間が異なる事象の、生起時間間隔の確率モデルを解析する手法の一つである、多重時間打切りの条件の下での最尤法を示している。第4章、第5章では、その手法に基づいて、出火事象、設備の故障事象の生起時間間隔について統計的性質を解析し、出火率、故障率を推定している。

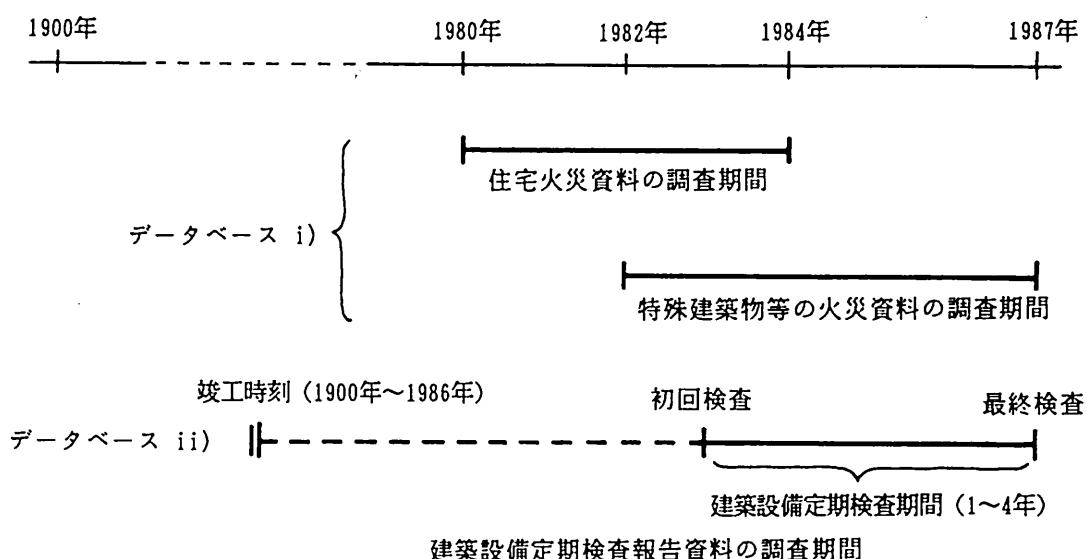


図 2-9. 各データベースにおける調査期間

## 第3章 統計的解析手法に関する考察

JIS品質管理用語によると、信頼性とは「系、機器、部品などの機能の時間的安定性を表す度合い、または性質」(JIS Z 8115 R1)と定義されている。そして信頼性を定量的に表現する信頼度「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」(JIS Z 8115 R4)が定義されている。一方、「規定の機能を果たす能力の停止」(JIS Z 8115 F1)として故障が定義されるが、その定量化表現が故障率「系、機器、部品が、ある時間故障なく動作した後、引き続く単位時間内に故障をおこす割合」(JIS Z 8115 F26)である。

故障の発生は、一般的には系、機器、部品にとって不可避の現象とされるが、同一と考えられる機器を同一の環境、条件の下で一定期間動作させ続ける信頼性試験を行った場合でも、故障発生の有無、或いは動作開始から故障が発生するまでの時間（故障時間）等は試験毎にそれぞれ異なる。ただ多数の同一機器について同一の環境、条件下で、故障時間を見るとそこには統計的規則性が認められる。このことから機器等の故障時間は試験毎に不確定なものとして、確率過程でモデル化され、その統計的性質によって記述される。このようなモデルとデータに基づいて、故障時間分布の決定、パラメータの推定等を行う数学的手法は一般化されており、利用できるデータの種類に応じて適宜選択される。

一方、建築物全体を一つの系とみなすとき、そこに望まれざる燃焼が発生することを出火・火災とすれば、出火・火災は系の機能を阻害する要因となり、系としては故障状態になったと考えられる。このことから、建築物における出火事象の生起時間間隔（出火時間）が確率過程でモデル化できるならば、出火率の推定は、出火時間の確率分布のパラメータ推定の問題となり、信頼性理論において一般化されている解析手法が利用できる。

本章では、信頼性データ解析のうち、故障データを用いた故障時間分布のパラメータ推定法について述べ、推定例の一つを示している。ここで述べる手法は第4章、第5章で行う出火率、故障率の推定手法の基礎となるものである。

## § 1. 故障データ解析

### 1.1 故障データ

故障データを解析する目的の一つは、系、機器、部品の動作開始から故障が発生するまでの時間、すなわち故障時間の分布を同定し、そのパラメータを推定することによって、信頼性の数学的表現を導くことである。解析に用いられるデータは、目的、収集法等の違いから種々の形で得られるが、図3-1は代表的な故障データを模式図にして示したものである。

適切に計画された長期間に亘る寿命試験或いは信頼性試験の結果、図3-1.Aに見られるように全ての機器が故障してデータが終了するという完全データが得られることもあるが、多くの場合試験時間、観測期間には限りがあり、一部の機器の故障をもって試験、観測が終了されたり、正確な故障時間が不明であったり、故障時間に関して一部の情報しか得られなかったりする。従って、使用実績の記録であるフィールドデータは、図3-1.Bのように全ユニットの動作開始から観測終了までを予め決めておいた時間とする定時打切り（タイプIセンサリング）データ、図3-1.Cのように動作開始から一定数の故障が発生した時点で観測を終了する定数打切り（タイプIIセンサリング）データ、図3-1.Dのようにある点検から次の点検までの間に故障したということしか分からない区間データ、或いはそれらの複合したものとして得られることが普通である。

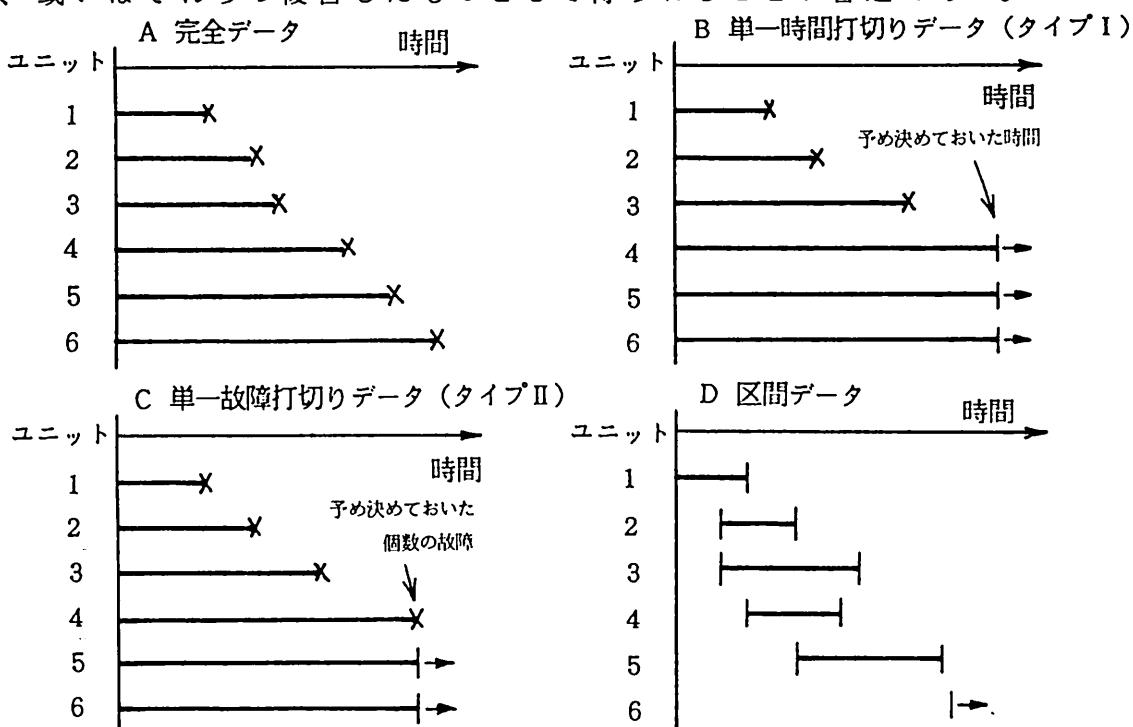


図 3-1. 故障データの種類 (× 故障時間, | → 動作時間)

いずれのデータが利用できるとしても、解析における主たる関心は故障時刻にあるのではなく、動作から故障までの時間、すなわち故障時間にある。データとして用いられるこれらの故障時間は、同一のユニットを同一の条件下で動作させたとの仮定の下で解析されるが、その場合たがいに独立で同一の分布 (i. i. d.: identical independent distribution) に従う確率変数と見なされる。即ち確率変数  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  が同一分布  $F(y)$  に従い、

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n, \quad X_1 = \min_i Y_i, \quad X_n = \max_i Y_i$$

であるとき、 $X_1, X_2, \dots, X_n$  は順序統計量の性質をもつことになる。

多くの場合、故障データは順序統計量として扱われ、順序統計量は母集団分布と故障の順位  $i$ 、標本数  $n$  に依存する標本分布に従うため、母集団分布のパラメータ、特性値を推定するのに広く用いられる。

ここで統計量という用語は、(1)統計量の値を決定するのに用いられる手続き、(2)与えられた標本に対して決定された値、(3)標本分布、のことであり、未知の母集団値  $\theta$  を近似する統計量  $\theta^*(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$  は、特定の標本に対する場合には推定値、手続きや標本分布を指す場合は推定量と呼ばれる。

## 1.2 故障時間の統計的モデル

同一と考えられる機器、設備を同時に稼動させ始めても、個々の故障時刻は異なる。前述したように、稼動開始から故障に至るまでの時間、すなわち故障時間は確率変数として取り扱われる。ここでは代表的な故障時間分布関数について要約して述べる。

一般に、故障時間  $T$  が確率密度関数  $f(t)$  をもつとして、時刻  $t$  までに故障する確率、すなわちその分布関数は  $F(t) = \int_0^t f(x) dx$  と表される。 $f(t)$  については経験的にいくつかの分布形が得られているが、主なものとして

- i) 指数分布或いはそれから誘導されたもの
- ii) 正規分布

が挙げられる。部品・機器・系の故障時間分布に関して、現在知られている密度関数は指数形のものが非常に多い。

以下では、指数形分布および正規形分布の特徴について述べる。

### 1.2.1 指数形モデル

指数形の基本的な分布は、(3.2)式、及び図3-2に示す密度関数をもつ一般に指数分布とよばれるものである。この

分布では、平均値  $E(t)$  は  $1/\lambda$ 、分散は  $1/\lambda^2$  で与えられ、真空管の寿命、ボールベアリングの寿命がこれに従うことがよく知られている。その他の多くの系、機器、部品の寿命或いは故障時間がこの分布でよく近似できるといわれているが、その最大の特徴は、一定時間  $t$  故障が発生しないという条件の下で、その時間経過した直後の  $\Delta t$  時間以内に故障する確率が、 $t$  とは無関係に  $\lambda \Delta t$  で表現されることである。この分布で記述される故障は、履歴によらずまったく不規則に生起する原因に基づいて発生するものであり、これはポアソン過程から導かれる。

ある事象の生起が不規則であると考えられる場合、一定時間内の事象の生起数を確率変数  $X$  (整数) とすると、 $t$  時間の間にその実現値が  $x$  となる確率は、下記のポアソン分布で表現される。

$$Pr\{X=x\} = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \quad (3.1)$$

ここで、 $\lambda$  はポアソン率とよばれ、一定時間に生起する事象数の平均値を示す。事象の生起がこのような確率過程で表せる場合には、各事象間の時間も確率変数となる。事象間の時間を確率変数  $T$  とすると、 $\{T \leq t\}$  となる確率は、(3.1) 式で  $x=0$  として与えられ、

$$Pr\{T \leq t\} = e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

と表される。(3.2)式の確率密度関数は、

$$f(t) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda t) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

によって与えられる。不規則に発生する原因で故障が生起する場合、故障時間分布は(3.3)式で表現されることになる。

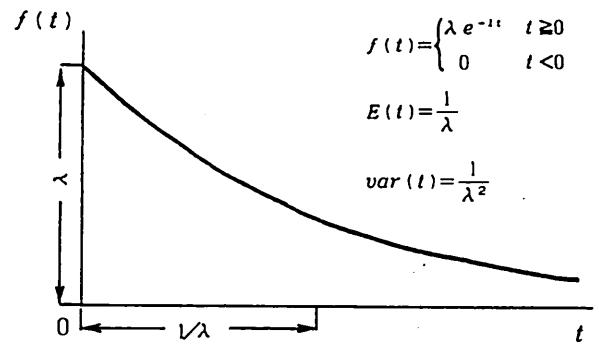


図 3-2. 指数分布の確率密度

指数分布を導出するモデルは、不規則に生起する原因で必ず故障が発生するものであるが、この概念を拡張したいいくつかのモデルが考えられている。以下に代表的な2つの拡張モデルを示す。一つは故障原因是1種類であるが故障に至る確率を考慮するもの、他の一つは原因が複数回与えられた後故障に至るものである。

故障原因が1種類だけと考える場合、その原因によって故障する確率が時間 $t$ の関数であるとする。故障原因発生のポアソン率を $\lambda$ とすれば、確率密度関数は、

$$f(t) = \lambda p(t) \exp\{-\lambda P(t)\} \quad (3.4)$$

となる。ここで、

$$P(t) = \int_0^t p(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

この拡張モデルにおいて最も重要な場合は、経過時間に対する劣化の程度を簡単なパラメータで表現できる下式を、 $p(t)$ の関数として採用した場合である。

$$p(t) = \frac{m t^{m-1}}{\lambda t_0} \quad (3.6)$$

これを(3.4)式に代入すると、

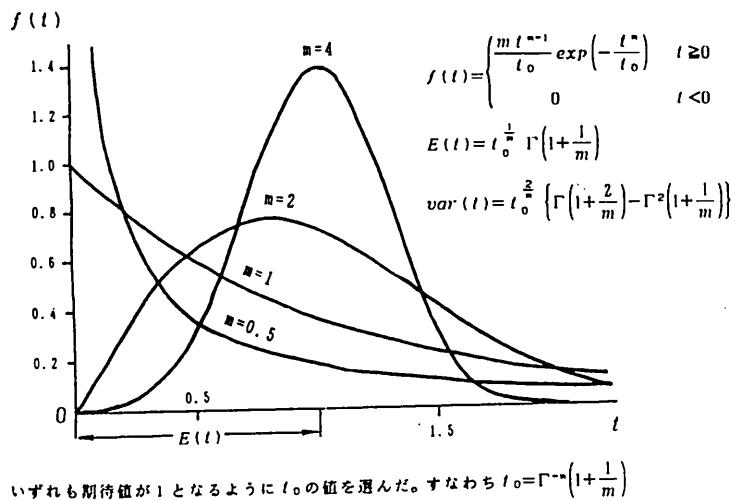
$$f(t) = \begin{cases} \frac{m t^{m-1}}{t_0} \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

が得られ、この分布関数は、

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (3.8)$$

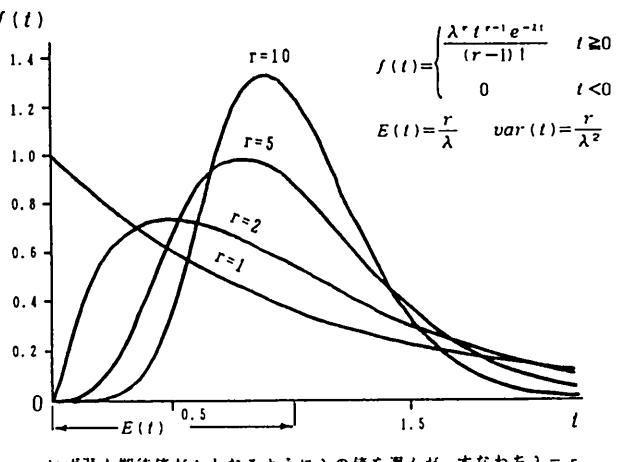
となる。(3.8)式の $m$ は形状母数(shape parameter)、 $\eta$ (或いは $t_0 = \eta^m$ )は尺度母数(scale parameter)と呼ばれる。図3-3に $m$ による密度関数形を示した分布がすなわちワイブル分布として知られるものであり、 $m$ の値を変えることで劣化程度を表現できるため、非常に広い範囲で故障時間分布、寿命分布として利用されている。

もう一つの拡張モデルは、同一の故障原因が $r$ ( $\geq 1$ )回引き続いて起こった場合故障するというモデルである。この確率密度関数は、



いずれも期待値が1となるように $t_0$ の値を選んだ。すなわち $t_0 = \Gamma^{-1}\left(1 + \frac{1}{m}\right)$

図 3-3. ワイブル分布の確率密度



いずれも期待値が1となるように $\lambda$ の値を選んだ。すなわち $\lambda = r$

図 3-4. ガンマ分布の確率密度

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\lambda^r t^{r-1} e^{-\lambda t}}{(r-1)!} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

と与えられるが、これは引数 $r$ のガンマ分布と呼ばれる。 $(3.9)$ 式の $r$ 、 $\lambda$ はワイブル分布と同様にそれぞれ形状母数、尺度母数と呼ばれる。図3-4に $r$ に対する密度関数を示した。

ここで、上述の拡張モデル、ワイブル分布とガンマ分布において、それぞれの形状母数が1の場合は、 $(3.3)$ 式に一致し、指数分布がワイブル分布、ガンマ分布の特殊な場合であるとともに、ワイブル分布、ガンマ分布が指数分布から直接導出されていることが理解される。

### 1.2.2 正規形モデル

正規形は一般の統計の分野では広く用いられる分布であり、その確率密度関数（図3-5）は、

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.10)$$

で表わされ、上式は $t < 0$ の領域をもつ分布形として定義される。従って、厳密には故障時間、寿命の確率変数には適用できないが、現実の故障時間或いは寿命には、特に摩耗型の部品には近似的にこの分布形を示すものは少なくない。例えばEpsteinは<sup>8)</sup>、

1) 疲労累積の結果、引き続いて $r$ 個の原因が起こり、その効果の累積によっ

て寿命が尽きるモデル（前項ガ  
ンマ分布と同様のモデル）では、  
 $r$  が大きくなるとその形は正規  
分布に漸近する

- 2) 製品中の物質が使用され尽くし  
たとき寿命が尽きるモデル、例  
えば電池等がこれにあたるが、  
その寿命分布は正規分布で近似  
できる

ことを指摘しており、また(3.9)式中の $\mu$ が $\sigma$ よりかなり大きい場合 ( $\mu > 3\sigma$ )  
には実用上支障がないと言われており<sup>10)</sup>信頼性の分野でも広く利用されている。

### 1.3 パラメータ推定

不確定性をもつとみなされる現象の全体像（母集団）を客観的に定量化する  
には、確率・統計論的手法は有用な数理手法の1つである。前述したように、  
部品・機器・系の動作に関する時間的挙動等を明らかにしようとしてきた信頼  
性工学の展開においても、確率・統計理論がその根拠となっている。

現象の観察あるいは観測結果が統計的に処理できるような標本として得られ  
た場合、その処理方法はパラメトリックな方法とノンパラメトリックな方法の  
2種類に大別できる。それぞれの方法の詳細・相違は多くの成書に論ぜられて  
いる<sup>10)</sup>のでここでは述べないが、基本的には用語からも明らかなようにパラメ  
トリックな方法とは、標本（母集団）分布に既知の理論分布を仮定した上で特  
性値、或いはパラメータを求めるものであり、ノンパラメトリックな方法とは、  
分布形を仮定せず特性値を求めるものである。信頼性工学の分野ではどちらの  
方法もよく用いられ、特に後者は寿命・故障時間解析における確率プロット法  
或いは累積ハザード法においてしばしば用いられる。確率プロット法、累積ハ  
ザード法は、予め用意された各種分布の確率紙へのデータプロットにより、  
プロットした点が直線であればその分布が適合するとして、分布のパーセント点、  
パラメータ、故障率等の簡単な点推定値を得るものである。またプロットした  
点が滑らかな曲線を描けばノンパラメトリック分布として各種推定値を得るこ

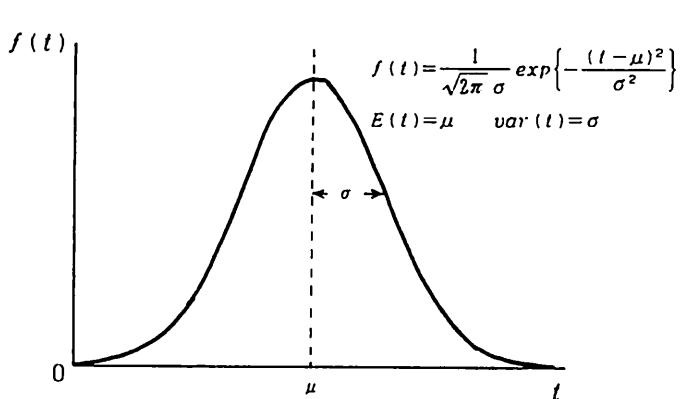


図 3-5. 正規分布の確率密度

ともできる。この種の図的解析法は、数学的により厳密な統計的解析手法をとる前に、解析すべきデータの特性把握、異常データの検出、各種分布の適合性の判断を行うのに便利であり、ここで得られた推定値が実用上十分と考えられる場合も少なくない。しかしながら一般に工学の分野においては、以下のような理由からパラメトリック分布に基づく手法がよく用いられる。

- i) 間隔尺度或いは比例尺度のような、その数値自身に物理的意味のある形でデータが得られる。
- ii) パラメトリック法を適用する際に、仮定される統計モデルが実用上妥当性をもつことが確認されている。
- iii) ii)の条件の下で必要な観測の精度が得られているとき、ノンパラメトリック法に比べてデータの節約ができる。

本項では上述した理由からパラメトリック法について、パラメータ推定法を要約して述べる。

ここで、推定パラメータの統計学上の性質については、以下のように述べられている<sup>9)</sup>。

機器等の故障時間分布として指数分布、正規分布、対数正規分布、ワイブル分布等種々の分布形が導出、提案されているが、それらの分布にはいくつかのパラメータが含まれ、一般的にはその値が与えられない。そこでパラメータを推定する必要が生ずるが、その場合パラメータの値そのものを推定しようとする点推定と、真のパラメータ値がどれほどの確かさでどの範囲にあるかを推定しようとする区間推定がある。

点推定とは、確率変数  $X$  の分布関数  $F(x; \theta_1, \dots, \theta_n)$  が与えられている下で、 $X$  の実現値  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (標本値) が得られた場合に、未知パラメータに依存しない関数  $g_i(x_1, \dots, x_n)$ ,  $i=1, \dots, k$  を作り、 $\theta_i$  の推定値として  $g_i$  の値を採用することである。ここで  $X$  は確率変数であったので、その実現値は標本毎に確率的変動をするはずで、 $g_i$  も 1 つの確率変数となる。そこで  $\theta_i$  の推定量として  $g_i(X_1, \dots, X_n)$  という統計量を考える必要があるが、このようにして得る点推定量がよい推定量であるためには以下のようない性質が要求される。

#### (1) 不偏性 (unbiasedness)

(2) 一貫性 (consistency)

(3) 有効性 (efficiency)

(4) 充足性 (sufficiency)

しかしながら点推定によって導かれた値が真の値と一致することは一般には望み得ない。そこで真の値  $\theta$  が確率  $(1 - \alpha)$  で下限  $u$  と上限  $v$  の範囲に存在することを明らかにする区間推定の方法が考えられる。これは確率変数  $X$  の  $n$  個の実現値が  $x_1, \dots, x_n$  であった場合、実現値からなる関数  $u(x_1, \dots, x_n)$  、  $v(x_1, \dots, x_n)$  を定め、

$$u \leq \theta \leq v \quad (3.11)$$

と推定する方法である。これによれば一組の標本毎に  $u$  、  $v$  が定まり、そのたびに  $\theta$  の値は  $u \leq \theta \leq v$  に存在すると結論することになるが、その結論が真である確率は、

$$\Pr\{u(X_1, \dots, X_n) \leq \theta \leq v(X_1, \dots, X_n)\} \quad (3.12)$$

と与えられる。この確率は区間  $(u, v)$  を大きくとれば大きく、小さくとれば小さくなる。一般には適当な小さな値  $\alpha$  ( $0.1, 0.05$  etc.) をとり、(3.11)が  $(1 - \alpha)$  となるように  $u$  、  $v$  を定める。このとき区間、

$$[u(X_1, \dots, X_n), v(X_1, \dots, X_n)] \quad (3.13)$$

を信頼係数 (confidence coefficient)  $1 - \alpha$  の信頼区間 (confidence interval) と呼ぶ。

### 1.3.1 多重時間打切りデータの最尤法による解析

前述した推定値を求めるには、最尤法、最小2乗法、モーメント法等が知られているが、標本サイズが大きい場合には（漸近的に）最小の分散を与える<sup>11)</sup>、また種々の分布形、変動係数、データ数に対して最も安定した手法であること<sup>12)</sup>等から、ここでは最尤法について述べる。

最尤法は母数の推定量を直接誘導する方法であるが、密度関数  $f(x, \theta)$  をもつ確率変数  $X$  に関して  $x_1, \dots, x_n$  なる標本値が得られたとき、 $\theta$  がとり得る値のうちこれらの標本値が実現する確からしさを最大にする  $\theta$  を求めるということが点推定における最尤法の論理的根拠である。ただし、最尤法によって得

られた推定値  $\hat{\theta}$  、或いはその母集団値  $\theta$  の推定量  $\theta^*$  が、前述したようなよい推定量の性質をもつかどうか、一般的には明かではない。

特定の標本値  $x_i$  が実現する確からしさは、 $x_i$  の確率密度関数の値に比例する。標本が無作為抽出によって得られたとして、 $n$  個の独立な観測値  $x_1, \dots, x_n$  が確率変数  $X_1, \dots, X_n$  の実現値であり、かつ  $X_1, \dots, X_n$  が結合確率密度関数をもつとき、

$$f(x_1, \dots, x_n; \theta) \quad (\theta ; \text{未知パラメータ}) \quad (3.14)$$

と表現される。このとき (3.14) を  $\theta$  の関数と考え、

$$L(\theta) = f(x_1, \dots, x_n; \theta) \quad (3.15)$$

として、 $L(\theta)$  を尤度関数 (likelihood function) とよぶ。この  $L(\theta)$  を最大にする  $\hat{\theta}$  を未知パラメータ  $\theta$  の推定値とする。 $\hat{\theta}$  を得るには  $L(\theta)$  を  $\theta$  について微分し、微係数を 0 とおけば通常絶対最大値が得られる<sup>13)</sup>。すなわち、

$$\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (3.16)$$

尤度関数は一般に積の形で与えられることから、尤度関数  $L(\theta)$  の対数をとり、

$$\frac{\partial \log L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (3.17)$$

とする方が便利である場合も多い。また 2 個以上の未知パラメータをもつ密度関数に対してはその尤度関数は、

$$L(\theta_1, \dots, \theta_m) = f(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) \quad (3.18)$$

となり、最尤推定値は次の連立方程式、

$$\frac{\partial L(\theta_1, \dots, \theta_m)}{\partial \theta_i} = 0 \quad (i=1, \dots, m) \quad (3.19)$$

の解で与えられる。

最尤法の概略は上述のとおりであるが、1.1にも述べたように実際に得られるフィールドデータが完全データであることはほとんどなく、特に本論で扱ったような建築設備の定期点検記録データは通常はタイプ I (時間) の打切りを受けたデータと考えるべきである。さらにこれらのデータは竣工時期、設備の設置時期等が異なった複数の建物から得られることが普通であり、そのため未故障の設備の稼動開始から点検までの稼動時間はそれぞれ異なる。すなわち多重の時間打切りを受けたデータとも考えねばならない。そこで以下に多重時間打切りを受けたデータの最尤法を詳述する。なおここでは、故障時間分布の項で

挙げた指指数型の代表的分布形である  
 1 母数分布の指指数分布を例に述べる。  
 ワイブル分布、正規分布等多母数の  
 分布において最尤推定値の分散、共  
 分散の計算法は異なるものの、一般  
 理論は1母数と同じでありここでは  
 詳述しない。

多重時間打切りデータとは、図3-  
 6に示すような形で与えられるデータ  
 であり、このようなデータに対する  
 最尤法は理論上完全データと同一で  
 ある。ただし時間打切りをされてい  
 るため尤度関数が異なる。

今  $n$  個の標本ユニットの寿命が独立に同一の確率密度  $f(x; \theta)$  をもつ分布に従う場合、 $r$  個が故障時間  $x_1, \dots, x_r$  で故障をし、 $(n - r)$  個が打切り時間  $x_{r+1}, \dots, x_n$  で生存したとする。このとき標本尤度は、各ユニットが統計的に独立であるならば、故障ユニットの尤度、

$$L_i(\theta) = f(x_i; \theta) \quad (3.20)$$

と生存確率で表される生存ユニットの尤度、

$$L_i(\theta) = R(x_i; \theta) \quad \text{ただし} \quad R(x_i; \theta) = \int_{x_i}^{\infty} f(x; \theta) dx \quad (3.21)$$

との積で表され、指指数分布の場合、

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^r \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{x_i}{\theta}\right) \prod_{i=r+1}^n \exp\left(-\frac{x_i}{\theta}\right) \quad (3.22)$$

と表される。またこの（自然）対数尤度は、

$$\ln L(\theta) = r \ln\left(\frac{1}{\theta}\right) - \left(\frac{1}{\theta}\right) \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.23)$$

となる。最尤推定値  $\theta$  は上式の標本尤度  $L(\theta)$ 、或いは対数標本尤度  $\ln L(\theta)$  を最大にする  $\theta$  であり、これは以下の方程式、

$$\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad \text{或いは} \quad \frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (3.24)$$

の解である。すなわち、

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta} = -\frac{r}{\theta} + \frac{1}{\theta^2} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.25)$$

従って、

[最尤推定値] (3.26)

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{r}$$

となり、ユニットの総動作時間を故障数で割ったものとなる。この  $\hat{\theta}$  が  $L(\theta)$  或いは  $\ln L(\theta)$  を最大にするかどうかは確認せねばならないが、前に述べたように通常は絶対最大値を与える。

ここで、前に触れたように最尤推定量  $\theta^*$  がどのような性質をもった推定量であるかは一般には不明である<sup>11)</sup>が、漸近理論<sup>11)</sup>によれば、 $\theta^*$ （最尤推定量）は  $n$  が大きいとき近似的に平均  $\theta$ 、分散  $\frac{1}{n I(\theta)}$  の正規分布に従うと見なされことから、最尤推定量が BAN 推定量（最良漸近推定量：best asymptotically normal estimator）となることが示されており<sup>11)</sup>、1.2.1に示したよい推定量の性質のいくつかをもつことが明らかにされている。ここで、

$$I(\theta) = E \left( \frac{\partial}{\partial \theta} \ln f(X; \theta) \right)^2 \quad (3.27)$$

である。最尤推定量  $\theta^*$  は、漸近的に  $\left( \theta, \frac{1}{n I(\theta)} \right)$  の正規分布に従うことから、その分散は漸近分散とよばれる。故障数  $r$  が大きい場合最尤推定量  $\theta^*$  の漸近分散  $Var(\theta^*)$  はフィッシャーの情報量<sup>14)</sup>（Appendix.A-1参照）の逆数に等しく以下のように求められる。

[最尤推定量  $\theta^*$  の漸近分散]

$$Var(\theta^*) = \frac{1}{E_0 \left( -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L(\theta) \right)_0} \quad (3.28)$$

ここで添字 0 は  $\theta = \theta_0$ （真値）において計算することを示している。この信頼限界は (3.27) 式で  $\theta_0$  を  $\theta^*$  で置き換えた最尤推定値、或いは標本局所フィッシャ

－情報量の逆数である局所推定値を用いる。

[最尤推定値の漸近分散]

$$Var(\hat{\theta}) = \frac{\theta_0^2}{\sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\eta_i}{\theta_0}\right) \right\}} \quad (3.29)$$

となる。この分散の最尤推定値は $\theta_0$ を最尤推定値 $\hat{\theta}$ で置き換えたものとなる。しかしながらここには各ユニットの計画打切り時間 $\kappa_i$ が含まれており、この時間が故障ユニットについては未知である場合が多いので、その場合は分散の

[局所推定値]

$$var(\theta^*) = \frac{1}{\left\{ -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L(\theta) \right\}_{\theta=\theta^*}} \quad (3.30)$$

を利用する。タイプIデータにおいては最尤推定値と局所推定値はごく近い値をとる。

ここまで得られた結果から故障率の最尤推定値は、

$$\lambda = \frac{1}{\hat{\theta}} \quad (3.31)$$

で与えられ、漸近分散は、

$$Var(\hat{\theta}) = \frac{\hat{\theta}^2}{\sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\eta_i}{\hat{\theta}}\right) \right\}} \quad (3.32)$$

と与えられる。

また $\theta_0$ の信頼区間は、標準正規分布の $[100(1+\gamma)/2]$ パーセント点を $K_\gamma$ として、例えば $\gamma = 0.5$ の場合、

$$\{\hat{\theta} - K_{0.5}[Var(\hat{\theta})]^{1/2}, \hat{\theta} + K_{0.5}[Var(\hat{\theta})]^{1/2}\} \quad (3.33)$$

で与えられる。

## § 2. データベースを利用した故障率解析

### 2.1 定期点検記録の概要

ここで解析した定期点検記録は、表3-1に示す10棟の建物に設置された159組の防火扉より得られたものである。

表 3-1. 点検記録収集建築物一覧

点検記録簿には、表 3-2に挙げた故障モードそれぞれについて○（正常に作動）、△（異常が発見され即座に修理を行った）、×（異常が発見され修理の要請をした）の記号をもって記載されている。また、発見された異常が故障であるか否かが区別されている。ただし「故障」とは、扉を完全には閉鎖できず防火区画を形成できない場合のこと

で、本論で扱うものはこの「故障」である。従って（F）～（I）のモードは、煙感知器連動防火扉の基本的性能を

建物	用 途	階数	防火扉	竣工年月	点 検 期 間
No. 1	事務所	8	20	1979. 11	1981. 2. 25～1983. 1. 19
No. 2	物販店	5	10	1975. 10	1978. 6. 26～1983. 7. 14
No. 3	事務所	8	8	1974. 4	1978. 5. 25～1983. 5. 9
No. 4	事務所	9	11	1974. 1	1978. 12. 15～1981. 12. 9
No. 5	事務所	8	17	1974. 5	1977. 9. 7～1983. 2. 19
No. 6	競艇場	6	35	1974. 9	1979. 5. 14～1983. 3. 19
No. 7	ホテル	6	19	不 明	1980. 5. 28～1984. 6. 18
No. 8	物販・事務	9	20	1980. 4	1981. 4. 12～1984. 7. 9
No. 9	会議場	5	15	1979. 5	1977. 6. 1～1984. 11. 10
No. 10	自治体庁舎	5	4	不 明	1976. 2. 8～1984. 7. 28

表 3-2. 故障・異常モード

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

損なうものではないため解析から除外し、また（J）のモードは、記録簿全体でこのモードについて記載のあった延べ1,073回・枚の点検において10回程度記録されており、「故障」と考えられるが、本節の解析対象は、機器そのものの故障としているので解析から除外した。

図3-7は、建物別に故障扉の点検結果を図示したものである。No.1～No.6の建物の記録簿には、扉寸法及び片開きか両開きかの別が記載されているものの、扉の重量、ヒンジの数・種類に関する記載は無い。扉の幅は約800mm～2,000mm、扉の高さは約2,000mm～2,400mmの間にあり、またNo.1の建物では、20組の扉全てが両開きで、他の建物では90%以上が片開きの1枚扉である。本解析で対象とした扉は全て甲種防火戸であるため、扉重量はほぼ扉面積に比例していると考えられるが、扉の寸法・開き方と図3-7に示された扉の故障の間には、故障モード・頻度に関して相関が無いことを確認している。従って、同一の故障モード、特に（A）、（B）の故障モードが同一の扉に何度か現れるのは、扉自体よりもむしろ、点検保全員の技術レベル、躯体そのものの変形或いは躯体との

接合部の変形、点検保全員の主観等の現在の技術水準では不可避な要因が影響しているものと考えられる。

一方、図3-7から、No.5、No.6、No.7の建物において故障の発生した扉数が全扉数の70%前後に及び、他の建物と比較して使用環境条件に差があることも予想される。しかし、上述したように扉の寸法、開き方と故障モードに相関がみられず、しかも同一メーカーの製品であること、サンプル数が十分でないことを考慮して、扉の大きさや片開き・両開きの別及び重量・ヒンジの種類に関わらず全て同一種類の扉とみなし、また用途別・建物別環境条件の差に起因する故障傾向は存在しないものと仮定した。

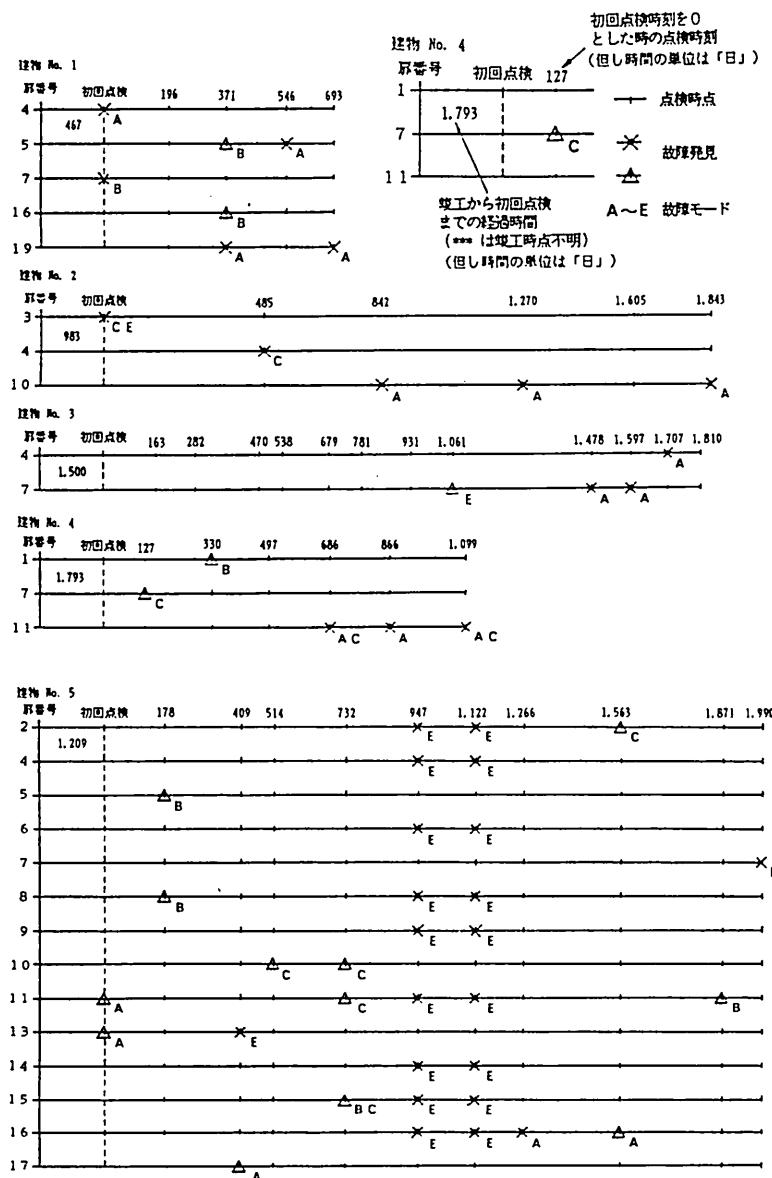
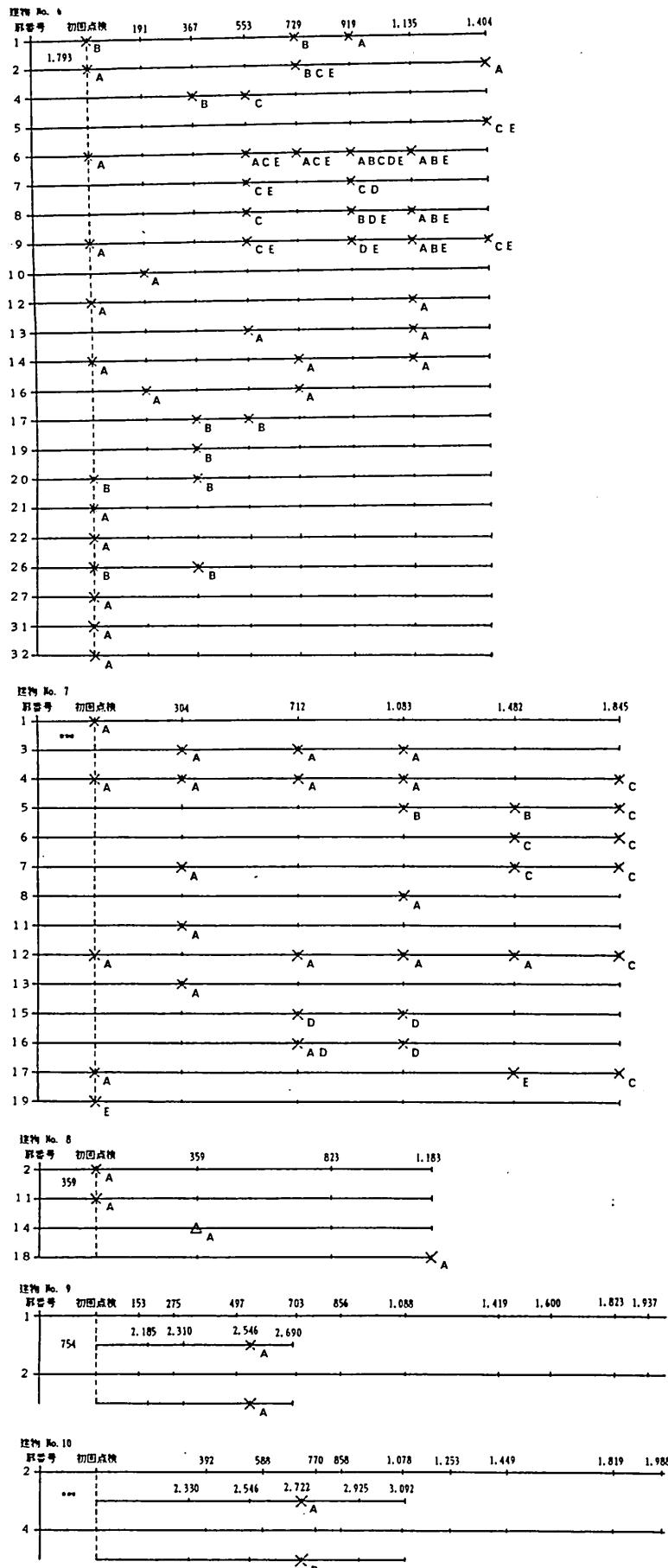


図 3-7. 建物別点検結果  
(故障発生の扉のみ)

前述したサンプル数の問題の他に、表3-1、図3-7に見られる通り、No.7とNo.10の建物は竣工時点が不明であること、全ての扉に関して設置時点が不明であること、初回点検時に既に故障している扉があるにもかかわらず設置から初回点検までの記録がないこと、調整・修理作業の開始時刻及びその作業に要した時間の記録がないこと等から、故障時間の解析データとして扱う場合には以下の仮定を付した。

- i)扉の設置時点は建物の竣工時点に一致するものとするが、竣工時点が不明な建物の場合(No.



7, No. 10)はデータから除く。

i)全建物の全扉の各故障モードは、独立で同一の分布(i. i. d.: identical independent distribution)に従う。

ii)初回点検時に発見された故障は、各建物毎に竣工時点から初回点検時点までの間に故障時間分布が一様な確率密度を持つように均等に振り分ける。

iv)×、△印で表される記録は同等に故障と扱い、故障発見に引き続く点検で正常に動作している場合、故障が発見された翌日には修理が完了しているものと見なす。しかし故障が発見された点検以降、引き続く点検で同一モードの故障が記録されている場合は、その連続した故障発見点検の最後の点検で修理されたものと見なす。また機器

図 3-7. 建物別点検結果  
(故障発生の扉のみ)

は修理によって完全に使用初期の状態に戻されるとし、修理の時点を再生点と見なす。

v)初回点検時の故障とそれに引き続く故障を除いて初めて発見された故障の発生時点は、故障を発見した点検時点とその直前の点検時点の中間点とする。

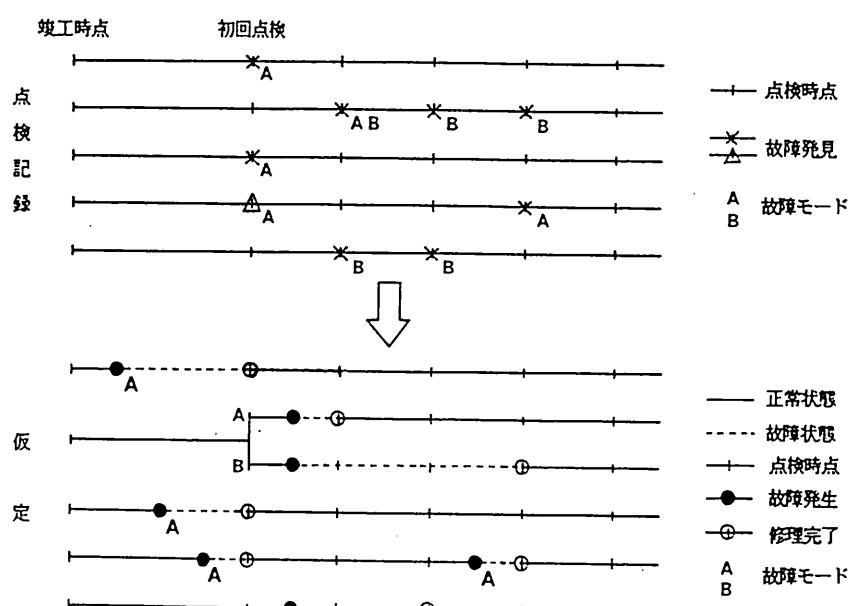


図 3-8. 点検データ処理の模式図

以上の仮定にしたがって得られた故障時間のデータから、次項では煙感知器連動防火扉の故障率を推定する。なお、仮定iii)、iv)、v)を図3-8に示す。

## 2.2 故障率の解析

信頼性工学では、システム或いはそのシステムを構成するユニット、コンポーネントの寿命分布の代表的分布形として、①偶発故障期間における寿命分布として最も基礎的な分布とされる指数分布、②疲労・摩耗故障をよく記述する正規分布、③指数分布を拡張したワイブル分布、ガンマ分布、等々が使用されているが、多くの機器は初期故障期間を除いて比較的長期にわたる偶発故障期間内で使用されると考えられ、その場合故障の発生はポアソン過程に従うこと<sup>15)</sup>、また取り扱いが容易であること等の理由から故障時間分布として指数分布を仮定することが多い。しかし建物に設置されるようになってからの歴史が短い煙感知器連動防火扉のような機器の場合、その故障率の変化はもとより耐用年数も明らかではなく、ここで収集・整理したデータを偶発故障期間内のものとして指数分布を仮定して解析することが妥当であるかどうか不明であり、別

の分布形の適合性も含めて、検討しておく必要がある。

煙感知器連動防火扉は、その全体が〔煙感知器〕 - 〔連動制御器〕 - 〔磁着・解放装置〕 - 〔扉〕の要素から構成されたシステムとしてその機能を果たす設備である。このシステム内のそれぞれの要素は、各々異なった動作特性を持ち、また建物内での設置位置も異なるため、要素毎の故障原因の種類及び強度が異なると考えられる。その結果、各要素は固有の故障分布を持つと推測されるが、ここでは、煙感知器連動防火扉を表3-2中(A)～(E)の故障モードに対応した要素に分割できる、即ち(A) - 扉・枠、(B) - ドアヒンジ、(C) - 磁着・解放装置、(D) - 連動制御器、(E) - 煙感知器からなるシステムとして解析を行った。故障の情報をデータとして効率よく利用することを考えて、前項に述べた仮定を行ったが、同時にデータの扱いをより厳密にするためにこのデータを单一時間打切りデータであるとの仮定を加え、ここで収集されたデータを2,800日の定時打切り寿命試験から得られたものとする。ただし、建物No.1とNo.8は、竣工時点から最終点検時点までの経過時間が2,800日に満たないため解析データから除外している。

上述したように故障原因が異なると考えられるため、一般に要素毎の故障分布或いはそのパラメータには差異が存在すると考えられるが、要素毎の解析には、サンプル数及び発生故障の絶対数の不十分さから、分布形を仮定してもパラメータ推定に良い精度は期待できない。そこでそれぞれの故障モードを検討すると、(A)～(C)のモードに対応した要素は扉本体とその付属部分であり、主に機械的ストレスを受ける部分である<sup>16)</sup>と考えられる。一方(D)・(E)のモードに対応する要素は、結線の緩みによる接触不良といった機械的ストレスによって生じる故障の他に、絶縁体も含めた結・配線の腐食、塵埃の堆積による感度低下等(A)～(C)のモードとは異なった故障・動作不良のメカニズムをもっている<sup>16)</sup>と考えられる。ここから(A)～(C)に対応する要素からなるユニットと(D)・(E)に対応する要素からなるユニットの二つのユニットにまとめた場合を図に表したもののが図3-9(a), (b)の実線である。以下に、推定の精度を確保する点から、上述の二つのユニットに関して故障率が時間に関して一定となる指數分布と故障率が時間に関して単調増加となる正規分布といった代表的な分布型を仮定した場合の解析結果を示す。指數分布、正規分布の密度関数及び

故障率関数はそれぞれ、

$$\begin{cases} f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \\ \lambda(t) = \lambda = \text{const.} \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\begin{cases} f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ \lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x) dx} \end{cases} \quad (3.35)$$

表 3-3. 最尤推定法による結果

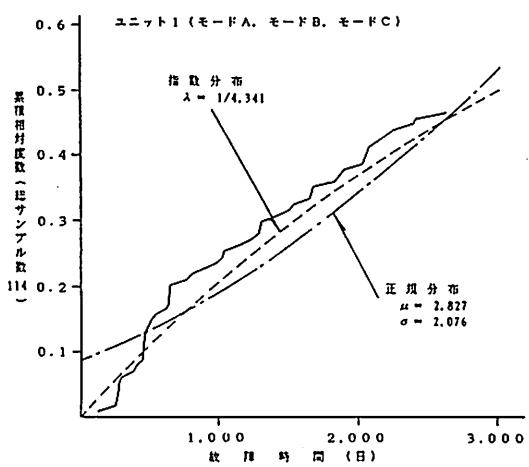
で表わされるが、本節の目的は、上式中のパラメータ  $\lambda$ 、 $\mu$ 、及び  $\sigma$  を推定することである。以下では (A)～(C) のモードに対応するユニットをユニット 1、(D)・(E) のモードに対応するユニットをユニット 2 と呼ぶこととする。

	分布型	点推定値	90% 信頼区間
ユニット 1	指数分布	$\lambda = 1/4,341$	$\lambda (1/5,907, 1/3,491)$
	正規分布	$\mu = 2,827$ $\sigma = 2,076$	$\mu (2,053, 3,664)$ $\sigma (1,717, 2,435)$
ユニット 2	指数分布	$\lambda = 1/13,504$	$\lambda (1/19,778, 1/8,833)$
	正規分布	$\mu = 102,566$ ( $\mu = 5,000$ ) <sup>a</sup> $\sigma = 114,188$ ( $\sigma = 2,200$ ) <sup>a</sup>	$\mu (64,656, 168,795)$ $\sigma (77,539, 150,837)$

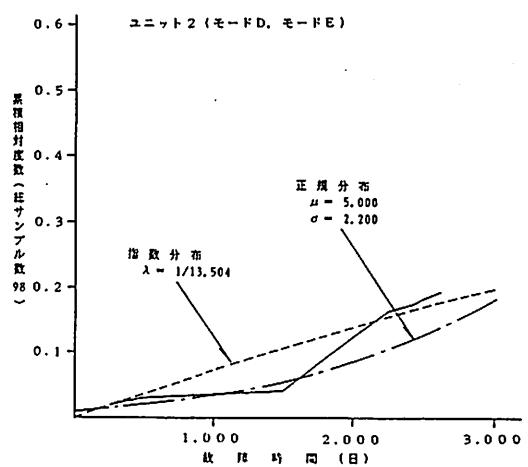
<sup>a</sup> 正規確率紙へのハザードプロット法による推定値

表 3-3 は、収集データがタイプ I のセンサリングを受けた（即ち定時打ち切り寿命試験により得られた）データ<sup>13)</sup>として、各ユニット、各分布型について最尤推定法を用いて推定した場合の点推定値と信頼水準 90% の信頼区間を示したものである。正規分布が仮定される場合には計算が非常に繁雑となる。従って予め用意された数表を用いた簡易計算法が与えられており<sup>17)</sup>、表 3-3 の正規分布を仮定した場合の値はこの簡易計算法によったものであるが、ユニット 2 では故障の発生数が全サンプルの 20% に満たないため推定の精度がかなり低い。

各ユニットが表 3-3 の点推定パラメータをとる時の故障時間分布を、指数分布の場合 (-----)、正規分布の場合 (-----) について図 3-9(a), (b) に示した。ユニット 1 に関しては、図 3-9(a) に実線で示したデータの累積相対度数が破線で示した指数分布の曲線によく一致すること、正規分布を仮定した場合の平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  がほぼ等しいこと、及び前述したように機械的ストレスを受けるユニットであることから指数分布を仮定してもよいことが分かる。ユニット 2 に関しては、表 3-3、図 3-9(b) の結果からは、先に予想した正規分布が適合するとは必ずしも言えない結果となっている。



(a) ユニット1



(b) ユニット2

図 3-9. ユニット別故障時間累積相対度数

## 第4章 建築物の出火率解析

一般に火災は出火から鎮火に至るまでの時系列現象として捉えられる。建築火災は、ほぼ火災成長期、火災最盛期、火災減衰期のように進行するといわれる<sup>18)</sup>。これは、火災をその物理的フェーズから述べているものであり、災害の発生という観点からは、出火原因、出火場所、出火時刻さらにはその建築物の利用形態等といった様々な要因によって、火災の物理的進展とは別に、建築物毎に異なる多くの火災危険の進行局面が出現する。そのため、建築物の火災安全性の評価に関する多くの研究がなされてきた。火災危険度評価に関する辻本等の研究<sup>19)</sup>はその例である。これらの研究は、火災事象の物理的な各局面とそれに付随して生ずる危険状態の出現が不確定なものであるとの前提から、その理論的根拠を確率論に求めるものが多く、この考え方は、系・機器・部品の信頼性を研究する信頼性工学と同一のものである。しかし、前述した様々な要因の多くを、統計的に明らかにしないまま理論を展開しているため、火災安全評価の結果に説得力の欠ける点があることが指摘される。

火災危険度評価法に、信頼性解析で利用されている手法を適用する場合、基礎的な情報の一つは出火率である。すなわち解析対象である「危険」が生起する可能性が重要な要素となる。図4-1は、火災危険に関する研究の1つである、N F P A（全米防火協会）の作成した防火プログラムの中の、出火防止に関する

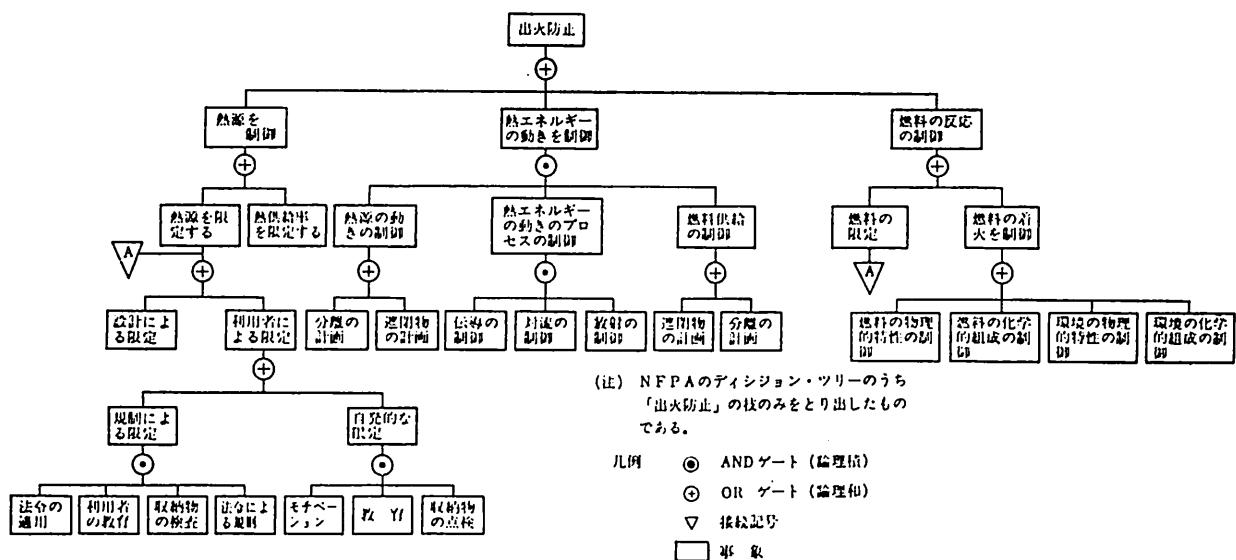


図 4-1. N F P A (全米防火協会) のディシジョンツリー

るデシジョンツリー(DT:decision tree)を示したもの<sup>20)</sup>である。これはフォールトツリー(FT:fault tree)とも見なすことができ、図4-1に示された各事象について、ANDゲートならばいずれかが、ORゲートならば全てが失敗したとき出火することを意味している。システムズアプローチは事象の生起率を求める手法の一つとなり得るが、出火に関連する各事象の定量化がなされていない現時点では、出火率を推定する手法として利用はできない。従って出火率を推定するもっとも適切な方法は、信頼のおける出火データに基づく統計的解析によるべきと考えられる。

一方、過去の火災研究においては、出火率はきわめて大略的な数字しか示されてこなかった。限定された建築物用途からの比較的少数のサンプルを用いて、出火率の解析をした研究<sup>21)</sup>もあるが、広範な用途・規模についての解析例はない。不特定多数の人々の利用が予想されるため、法規によって厳重に安全性確保が要求される特殊建築物に限っても、建築物の利用形態が異なれば出火危険性が異なると考えられるが、出火率が建築物用途別に異なるかどうかは明確にされていない。その理由の一つは、用途別の精確な建物数(母数)が把握されていなかったことである。

本論文で利用する建物データベースは、部分的に不完全ではあるが、用途別、規模別の建物数の推定に利用できるものであり、本章では、この建物データベースと火災データベースを併せ解析することで、初めて特殊建築物のいくつかの用途と事務所用途について出火率を推定することができた。

## § 1. 出火率の定義

火災の定義を、自治省消防庁防災課による火災報告取扱要領<sup>22)</sup>でみると、「火災とは、人の意図に反して発生若しくは拡大し、又は放火により発生した消火の必要がある燃焼現象であって、これを消火するために消火施設又はこれと同程度の効果のあるものの利用を必要とするものをいう」である。これは消防行政上からの定義であり、他の定義もなされるが、本論文で用いる火災データベースは、上述した火災の定義に基づいて作成されたものである。従って、本論文において出火は、消防庁の定義する火災の発生、と定義される。

出火率は、一定期間における火災の生起数を表わす指標である。消防庁が毎年公式に発表する火災年報、消防白書では、建築火災の他、林野火災、車両火災等が含まれること、全国規模での集計であること等から、年間出火件数を一定地域内の人口で除す「人口1万人当たり年間出火件数」（件数／万人・年）を出火率として用いている。これは火災の発生には自然条件、物理条件だけでなく、人間の意識・行為・活動が深く関与すると考えてのことにもよる。しかし、建築火災についてのみ見るととき、消防庁の用いている出火率の表現方法は適切なものではない。

図4-2は、エネルギー需要率と火災死者率の推移を示したものである<sup>23)</sup>。前出N F P A の D T においても、出火防止プログラムの柱の一つは熱源の制御にある。不特定多数の人々が利用する建築物においては、熱源の数量・使用エネルギー量は利用人数に比例すると考えられる。その意味では人口当たりの出火件数は妥当と考えられるが、建築物の利用人数をどのように算定するか、用途別の建築物利用形態の相違をどのように扱う

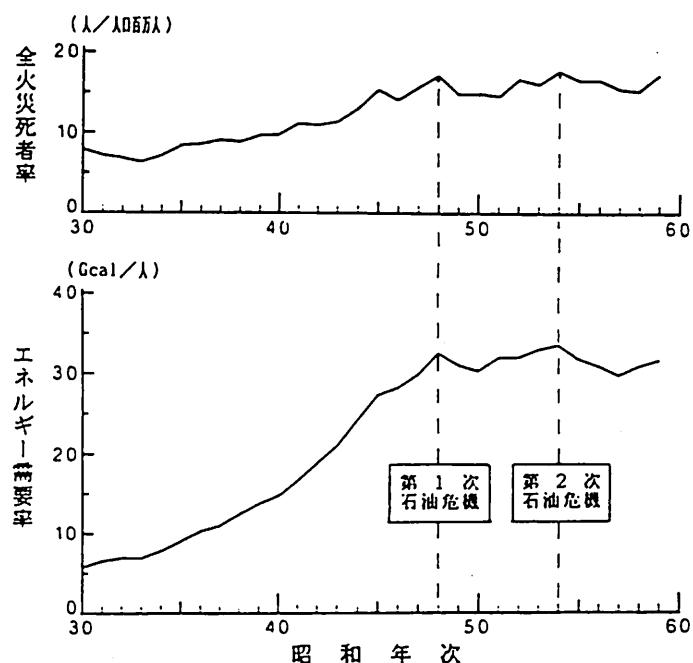


図 4-2. エネルギー需要率と火災死者率の経年変化

か等の点で、人口の推定が困難である。一方、建築物の特性のうち、変動せずかつ入手が簡単な情報である建築物の規模を単位とする方法が考えられる。建物データベース、及び本章で使用する火災データベースにおいて、建築物の規模を表現する情報は、建築面積、延床面積、階層数である。これらの情報を基にした場合、出火率の表現方法は次の4種類が考えられる。

- i) ある規模範囲の建築物における年間出火件数（件数／棟・年）
- ii) 建築面積 1 m<sup>2</sup> 当りの年間出火件数（件数／m<sup>2</sup>・年）
- iii) 延床面積 1 m<sup>2</sup> 当りの年間出火件数（件数／m<sup>2</sup>・年）
- iv) 1 階層当たりの年間出火件数（件数／階・年）

前述したように、火災の発生がエネルギー消費量と強い相関をもつならば、建築火災においてもエネルギー消費量と関係の深いことが予想される。建築物内のエネルギー消費量を決定する要因には、利用者数、利用時間、エネルギー消費設備の数量等があるが、これらの要因と相関をもつ建築物の特性の一つとして延床面積が挙げられる。特に、建築物の規模と出火の可能性との間の関係を考察する場合、建築物規模についての基本的情報のひとつである延床面積（m<sup>2</sup>）が有用と思われる。本章では、データベースで利用できる情報と、上述の事情を考慮して、「延床面積 1 m<sup>2</sup> 当りの年間出火件数（回／m<sup>2</sup>・年）」を出火率として定義し、推定する。

## § 2. データベースを利用した出火率の推定

### 2.1 建物数の推定

第3章では、事象の生起時間間隔が確率過程でモデル化され、その生起時間間隔がある確率分布に従う事象について、確率分布のパラメータを推定する方法と推定例を示した。第3章では機器、設備の故障を中心に述べたが、出火事象についても同様のモデルが適用できると考えて出火率を推定する。

§ 1. で述べたように出火率は様々に定義でき、例えば [回／棟・年] とすれば建築物 1 棟に 1 年間で何回火災が発生するかを表し、[回／m<sup>2</sup>・年] とすれば床面積 1 m<sup>2</sup> 当り 1 年間で何回出火するかを表す。いずれの指標でも必要とされる基本的な情報は、対象とする用途・規模の建物数、及び出火した建物数、の 2 つである。前者の情報は膨大な数であり、建築物用途を特殊建築物に限っ

ても用途・規模別の建物数は精確に把握されていない。

建物データベースは、東京都内にあって建築設備定期検査報告書を提出した建築物の情報から構成されている。その建物数は報告が義務付けられている建物数の約1/3にあたるといわれているが、用途毎、規模毎に報告書を提出する割合は異なると考えられる。建物データベースには、建築物の延床面積、階数の情報が入力されており、この情報と表2-7に併記した東京消防庁の統計値とから、用途・延床面積別の建物数を推定する作業を行った。

表4-1は、建物データベース、及び東京消防庁の統計から得られる建物数を、延床面積、階層数毎に集計し、クロス表で表示したものである。表2-7に併記した東京消防庁の統計値は、階層数別にしか得られず各表下欄にその値を示してある。表4-1に示される情報を図4-3に図示しているが、図中 $p_{ij}$ が規模別の報告率である。各規模の報告率 $p_{ij}$ を推定し各規模の建物数 $k_{ij}/p_{ij}$ を推定する作業が必要とさ

れるが、ここで利用できる情報からは不可能であるので、推定する出火率が各延床面積区分での床面積1m<sup>2</sup>当りの出火数[回/m<sup>2</sup>・年]であることを考慮して、以下の方法により各延床面積区分の報告率 $p_{ij}$ を推定する。

$$p_{ij} = \frac{K_{ai}}{\sum_j k_{ij} T_j / K_{fj}} \quad (4.1)$$

表4-1. 延床面積・階層数に対する建物数クロス表  
「物販店舗」

階層数 延床面積	~3F	4F ~6F	7F ~9F	10F ~14F	15F ~19F	20F~	計
~1,000	37	13	2				52 (15)
1,001 ~3,000	102	16	7	2			127 (25)
3,001 ~6,000	25	21	12				58 (33)
6,001 ~10,000	5	16	12	2			35 (30)
10,001 ~15,000	5	14	8				27 (22)
15,001 ~20,000	2	9	8				19 (17)
20,001~	1	6	29	8	1		44 (43)
計	177	95	78	12	1		363 (186)
東消統計値		1,213	233	23			1,469

( )内は4F以上の合計値

「旅館・ホテル」

階層数 延床面積	~3F	4F ~6F	7F ~9F	10F ~14F	15F ~19F	20F~	計
~1,000	25	48	10				83 (58)
1,001 ~3,000	11	35	25	3			74 (63)
3,001 ~6,000	1	5	18	14			38 (37)
6,001 ~10,000			5	10			15 (15)
10,001 ~15,000		2	2	3			7 (7)
15,001 ~20,000		1	1	2	1		5 (5)
20,001~		2	2	8	4	11	27 (27)
計	37	93	63	40	5	11	249 (212)
東消統計値		817	218	66	2	8	1,111

( )内は4F以上の合計値

### 「病院」

この作業により推定された延床面積別報告率を表4-2に示す。表4-2に示される推定報告率には、事務所用途の延床面積3,000m<sup>2</sup>以下、他の用途の延床面積1,000m<sup>2</sup>以下の規模の建築物については、表2-3からも明らかなように一定の規模以下の建築物が除外されること、階層数別の報告率を延床面積別の報告率に置き換えていること等から、誤差が含まれると推測される。またここでは階層数別建物数の真の値として東京消防庁の統計値を採用しているものの、特殊建築物と防火対象物における用途区分の考え方若干違いがみられ、その結果、表4-1の各規模区分において、建物データベースの分析からはその規模区分に建築物が存在する場合でも、東京消防庁統計には同じ規模区分に建築物のない場合がある点に留意すべきである。

階層数 延床面積	~3 F	4 F ~6 F	7 F ~9 F	10 F ~14 F	15 F ~19 F	20 F~	計
~ 1,000	31	21	1				53 (23)
1,001 ~ 3,000	40	61	8	1			110 (70)
3,001 ~ 6,000	14	44	7	1			66 (52)
6,001 ~10,000	2	29	7				38 (36)
10,001 ~15,000		9	1	1			11 (11)
15,001 ~20,000		4	2				6 (6)
20,001~		5	3	3	1		12 (12)
計	87	173	29	6	1		296 (210)
東消統計値		722	100	19	4		845

( )内は4 F以上の合計値

### 「事務所」

階層数 延床面積	~3 F	4 F ~6 F	7 F ~9 F	10 F ~14 F	15 F ~19 F	20 F~	計
~ 1,000							
1,001 ~ 3,000		66	169	42			277
3,001 ~ 6,000		79	307	61			447
6,001 ~10,000		54	188	57	1		300
10,001 ~15,000		30	88	49	1		168
15,001 ~20,000		11	38	21	3		73
20,001~		7	52	42	18	24	143
計		247	842	272	23	24	1,408
東消統計値		4,820	3,682	765	34	22	9,323

### 「共同住宅」

階層数 延床面積	~3 F	4 F ~6 F	7 F ~9 F	10 F ~14 F	15 F ~19 F	20 F~	計
~ 1,000	1,314	1,182	92	8			2,596 (1,282)
1,001 ~ 3,000	692	1,604	477	171			2,944 (2,252)
3,001 ~ 6,000	43	295	299	234			871 (828)
6,001 ~10,000	4	56	104	154	5		323 (319)
10,001 ~15,000		5	20	68	9		102 (102)
15,001 ~20,000		1	2	35	5	3	46 (46)
20,001~			2	26	2	1	31 (31)
計	2,053	3,143	996	696	21	4	6,913 (4,860)
東消統計値		21,331	2,662	1,723	27	4	25,747

( )内は4 F以上の合計値

	階層数 ( $f_{ij}$ )	計
延床面積 ( $a_{ij}$ )	各セル $K_{ij} (p_{ij})$	$K_{..j}$
計	$K_{..j}$	$K_{..j}$
東消値	$T_j$	$T$

ここで図中  
 $a_{ij}$ : 延床面積区分  
 $f_{ij}$ : 階層数区分  
 $K_{ij}$ : (i, j)区分の報告建物数  
 $p_{ij}$ : (i, j)区分の報告率  
 $K_{..i}$ : i区分の小計  
 $K_{..j}$ : j区分の小計  
 $K_{..j}$ : 報告建物総計  
 $T_j$ : j区分東消統計値  
 $T$ : 東消統計値総計

図 4-3. 報告率推定のためのクロス表説明図

表 4-2. 延床面積別定期検査報告率

規模 用途	$m^2$ ~1,000	1,001 ~3,000	3,001 ~6,000	6,001 ~10,000	10,001 ~15,000	15,001 ~20,000	20,001~
物販店舗	0.087	0.109	0.109	0.123	0.109	0.122	0.241
旅館・ホテル	0.127	0.158	0.286	0.444	0.238	0.314	0.571
病院	0.252	0.245	0.247	0.248	0.249	0.254	0.268
事務所		0.129	0.146	0.147	0.151	0.164	0.269
共同住宅	0.155	0.179	0.245	0.305	0.382	0.425	0.423

## 2.2 出火率の推定

出火事象を、機器・設備の故障と同様に確率過程としてモデル化できるとした場合、前章で述べたように、故障時間の仮定された分布の下で最尤法によりパラメータを推定する方法が、出火率の推定法としても適用される。ただし火災データベースには、出火率の推定に最尤法を適用しようとする場合、支障をもたらすと考えられる以下の制約が存在する。

- ①自治省のデータベースは、出火建築物の竣工時期が不明である
- ②母数となるべき建物データベースに含まれる建築物について、竣工後の火災履歴が不明である
- ③前項で推定した用途・規模別建物数の確度が保証されない

一方、出火率の推定に用いるデータベースには、

- ①火災データベースに含まれる全てのデータが、同一の時刻から記録が始まり同一の時刻で記録が終了している
- ②火災データベースでは出火時刻が明確である
- ③建物データベースに含まれる建築物の竣工時刻が明確である

等の資料上の明確さがある。上述した利用できる資料の特徴とは別に、表2-8から分かるように、年間の出火頻度が低く、解析にあたってはデータ収録全期間にわたる資料の利用が望ましい。

図4-4<sup>24)</sup>は、住宅の出火率 [回／棟・年] の竣工年に関する推移を、構造種別毎に示したものである。建築物の古さと出火率との関係は、火災研究の一つのテーマと考えられるが、火災データの多くの場合、出火建築物の竣工年的情報が欠如しているため、現在のところ図4-4に示した以外の資料はない。この図は、昭和20

年以前、21～35年、36～45年、46～50年、51～55年、56～59年のそれぞれの期間に竣工した住宅についての、昭和55年～59年の5年間における平均出火率を示している。図中の耐火造は、一般には鉄筋コンクリート造と考えられるが、この場合住宅用途については他の構造とは異なって竣工の新旧による出火率にほとんど差がみられない。本論文で対象としている規模の建築物は、大半が鉄筋コンクリート造、鉄骨造の耐火構造とみられ、図4-4の結果を併せて考えると、ここで推定する出火率は、竣工年、或いは経過年数によって変化しない、すなわち時間に対して一定と見なされる。このことは、本論文で解析する出火事象が、定常ポアソン過程でモデル化できることを示している。

火災の発生がポアソン過程に従う場合、任意の時刻から出火するまでの時間を出火時間と呼ぶと、出火時間分布は指数分布に従い、出火時間  $T$  を確率変数、その実現値を  $t$  とするとき、その密度関数は、

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (4.2)$$

と表される。ここで  $\lambda$  は出火率であり、時間に対して一定となる。非出火時間分布関数、出火時間分布関数は、故障の場合の信頼度関数、不信頼度関数に一致し、

$$R(t) = \int_t^\infty \lambda \exp(-\lambda x) dx = \exp(-\lambda t) \quad (4.3)$$

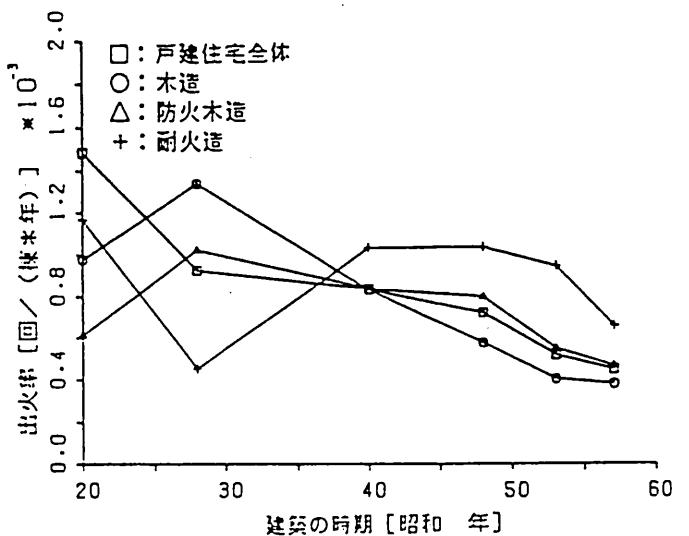


図4-4. 竣工時期に対する出火率推移（構造別）

$$F(t) = \int_0^t \lambda \exp(-\lambda x) dx = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (4.4)$$

となる。このとき竣工後  $x$  時間経過した建築物が、その後  $t$  時間出火しない確率は、

$$\frac{\bar{F}(x+t)}{\bar{F}(x)} = \frac{R(x+t)}{R(x)} = \frac{e^{-\lambda(x+t)}}{e^{-\lambda x}} = e^{-\lambda t} = \bar{F}(t) \quad (4.5)$$

$$\text{ただし、 } F(t) = 1 - R(t) = 1 - \bar{F}(t)$$

と表される。これは建築物の経過時間  $x$  に関わらず、その時刻に出火しないならば確率的には信頼度 1、すなわちその時刻を竣工時点とみなせることを表している。この性質は指数分布の無記憶性とよばれる。一方、一般に確率過程において、ある時点以後の時間的挙動がその時点以前の時間的挙動に独立な時、すなわちその時点から新しく過程が始まると見なせるとき、この時点は再生点とよばれる。出火時間の分布に指数分布が仮定される場合、再生点は指数分布の無記憶性から、出火しないことが確認された時点となる。

前述したように、出火率が一定ならば出火時間の分布に指数分布が仮定されるが、この場合再生点を火災データの記録開始時刻にすることができ、制約事項①、②を考慮する必要がなくなる。現状のデータベースを用いる限り③の制約事項は依然解決されず、このことに起因する推定誤差は取り除かれない。

図4-5は、本論文で使用したデータベースから得られるデータについて、各建築物の出火時間がどのように扱われるかを示したものである。火災データベースのデータ収録期間中に竣工する建築物を考えて多重時間打切り

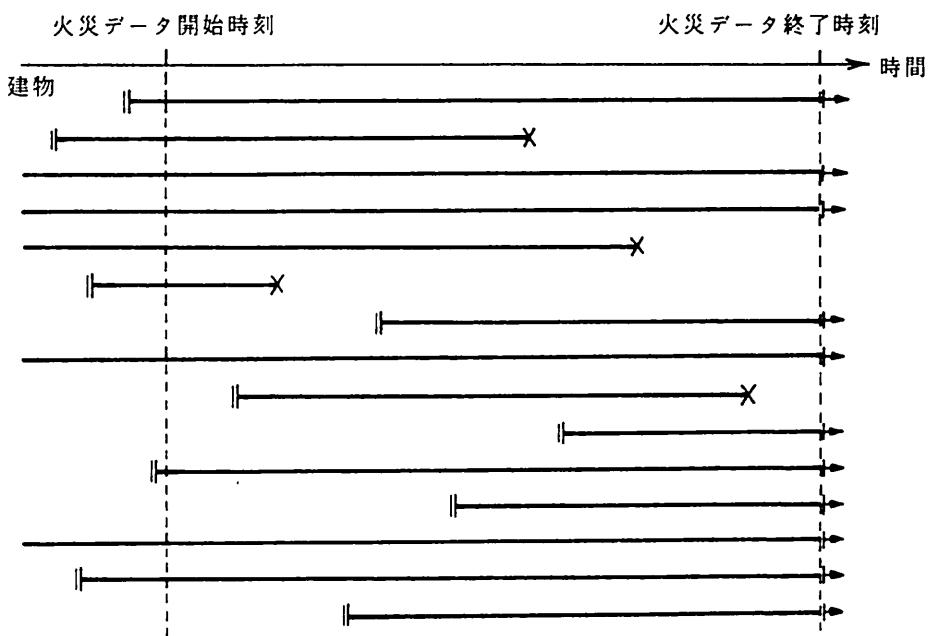


図 4-5. 建物竣工・出火時刻・非出火時間の図

( || 竣工時刻, X 出火時刻, | → 非出火時間)

したが、図4-6は、図4-5に示すデータを、多重時間打切りデータの形に再整理したものを見ている。

以上のことから、出火率の推定手法に、多重時間打切りデータに対する1母数最尤推定法が適用できると判断される。

最尤法による出火率の推定は、故障率の推定の場合まったく同一である。図4-6の時

開始点を再生点とし、全てのデータの観測終了時刻までを、多重時間打切りデータとみなし、出火時間分布に指数分布を仮定して推定する。推定手順の詳細は第3章に述べたが、推定する出火率は延床面積1m<sup>2</sup>当たりのものであることから、ここでは床面積1m<sup>2</sup>を一つの独立したユニットと考え、1ユニット当たりの出火率を推定する。ここで、1つの延床面積区分内にある全建築物が解析対象であるので、推定の対象となるユニット数は、全ての建築物の延床面積の総和と等しい。従って、(3.25)式に示した最尤推定値は、全ユニットの非出火時間の和を、出火ユニット数で除して、

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{N} \quad (4.6)$$

$\hat{\theta}$  : 最尤推定値

$x_i$  : 非出火時間

$m$  : 全ユニット数

$N$  : 出火ユニット数

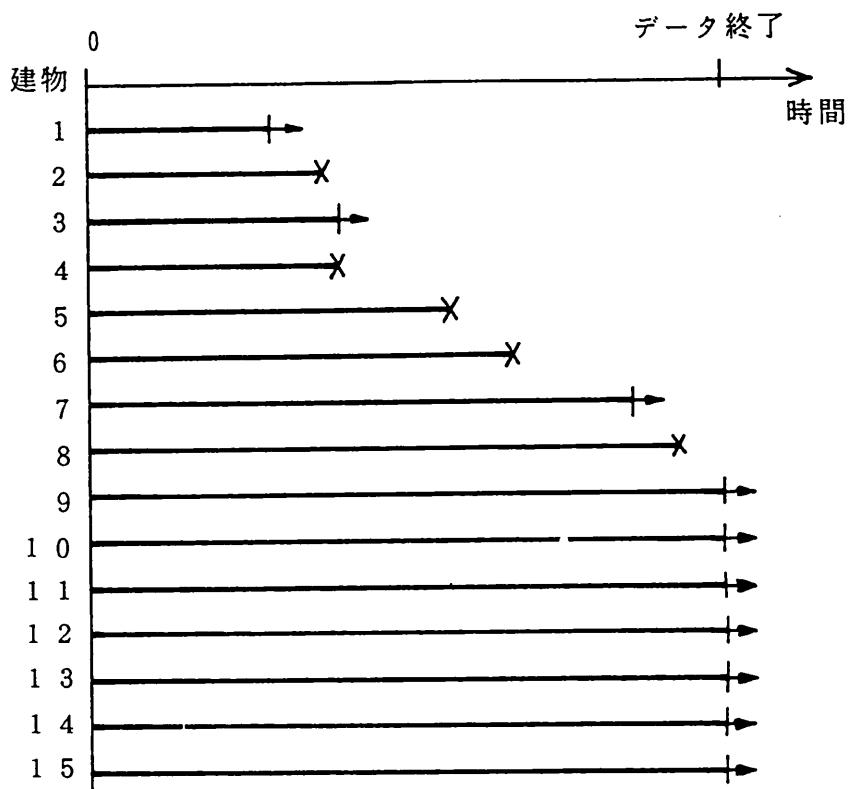


図 4-6. 多重時間打切り出火データ  
(X 出火時間, + 非出火時間)

と表され 火率は、出火時間分布が指數分布であるから、時間によらず一定となり、式(4.6)の最尤推定値の逆数 $1/\hat{\theta}$ で与えられる。

表4-3は、§2.で整理したデータに基づいて推定した出火率を、建築物用途・延床面積別に示したものである。

表 4-3. 用途別・延床面積別推定出火率 (回／m<sup>2</sup>・年)

規模 用途	m <sup>2</sup> ～1,000	1,001 ～3,000	3,001 ～6,000	6,001 ～10,000	10,001 ～15,000	15,001 ～20,000	20,001～
物販店舗	$1.31 \times 10^{-6}$	$2.99 \times 10^{-6}$	$1.37 \times 10^{-6}$	$1.33 \times 10^{-6}$	$3.58 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-6}$	$4.04 \times 10^{-7}$
旅館・ホテル	$2.91 \times 10^{-6}$	$6.77 \times 10^{-6}$	$2.43 \times 10^{-6}$	$3.81 \times 10^{-6}$	$4.96 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-6}$	$3.95 \times 10^{-7}$
病院	$2.78 \times 10^{-6}$	$4.14 \times 10^{-6}$	$1.79 \times 10^{-6}$	$1.59 \times 10^{-6}$	$3.32 \times 10^{-7}$	$4.30 \times 10^{-7}$	$8.63 \times 10^{-7}$
事務所	—	$7.32 \times 10^{-7}$	$4.26 \times 10^{-7}$	$2.24 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-7}$	$1.12 \times 10^{-7}$	$1.15 \times 10^{-7}$
共同住宅	$7.78 \times 10^{-6}$	$6.33 \times 10^{-6}$	$2.74 \times 10^{-6}$	$3.46 \times 10^{-6}$	$6.19 \times 10^{-6}$	$4.87 \times 10^{-6}$	—

### § 3 . 推定結果の考察

表4-3全体を通して見ると、建築物の延床面積1 m<sup>2</sup>当たりの出火率は、およそ $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 回／m<sup>2</sup>・年となることが分かる。建築物用途別に見ると、本論文で解析対象とした5用途について、事務所用途の出火率が延床面積の増大につれて減少する一方で、事務所用途全体を通しては $10^{-7}$ 回／m<sup>2</sup>・年の位にあること、共同住宅用途の出火率が、どの延床面積区分においても $10^{-6}$ 回／m<sup>2</sup>・年の位にあること、事務所、共同住宅以外の用途の出火率が、延床面積の相違によって2桁の範囲で減少する傾向にあることが大きな特徴となっている。さらに建築物の延床面積別にみると、最大の出火率を示す延床面積1,000 m<sup>2</sup>以下の旅館・ホテルでは、最小の出火率となる延床面積15,001～20,000 m<sup>2</sup>の事務所の、300倍近くも出火し易いことが示される。

小栗<sup>25)</sup>が推定している出火率は、建築物1棟当たりのものであるが、本論文で対象とした建築物用途について見ると、用途別の出火率を $3.16 \times 10^{-3}$ 回／棟・年～ $7.93 \times 10^{-3}$ 回／棟・年となっており、住宅の出火率を推定している研究<sup>26)</sup>では、全住宅の出火率を $1.69 \times 10^{-6}$ 回／m<sup>2</sup>・年と推定している。これらの研究からは、建築物1棟の出火率がおよそ $10^{-3}$ 回／棟・年と示されるが、本論文で推定された出火率は、表4-3の値を建築物1棟当たりに換算すると、 $10^{-2}$ 回／棟・年

$\sim 10^{-3}$ 回／棟・年と、これらの研究で推定されている値に比べいくらか高い値となる。

上述の研究<sup>25), 26)</sup>で推定された出火率と、本論文で推定された出火率が異なる理由の一つとして、推定法の相違があげられる。これらの研究<sup>25), 26)</sup>が示す出火率は、任意の時刻における出火建物数を、その時刻に存在している建物数で除した、単なる比率として推定されているのに対して、本論文での出火率は、出火事象を確率過程モデルとした上での、パラメータ推定法に基づいて推定されている。出火時間の分布に出火率一定の指數分布を仮定して出火率を推定する場合、その値は上述の比率に近い値をとるはずであるが、比率の形で推定された出火率が、本論文で推定された出火率よりも低くなることから、推定手法、或いは出火時間の分布の選択が重要であることが分かる。確率・統計論に基づく火災危険度評価に用いる変数の一つとして出火率を推定する場合、本論文で得られた結果は、理論上、出火確率計算に直接適用できる点で意義深いと考えられる。

しかしながら、本論文で利用したデータベースには以下の問題点が存在する。建物データベースには、延床面積20,001m<sup>2</sup>以上の共同住宅用途の建築物で、延床面積40,000m<sup>2</sup>を越える建築物は存在しないが、火災データベースでは、延床面積20,001m<sup>2</sup>以上の住宅用途の出火建築物のうち、延床面積40,000m<sup>2</sup>を越える出火建築物が12棟ある。この原因としては、例えば、建物データベースで別棟と扱われている建築物を、火災データベースでは1棟として扱っていることなどの、建築物の棟に対するデータベース毎の取扱い方の相違が考えられる。そのため、延床面積20,001m<sup>2</sup>以上の規模の共同住宅の出火率は推定されていない。

## 第5章 防災設備の故障率解析

建築物には利便性・安全性等の観点から様々な設備が備え付けられ、それらは機械的・電気的に動作するものも多い。このような機器・設備は、寿命或いは故障により、または経済的理由等により新品に取り換えられる、すなわち更新されることもあるが、部品交換、修理等の保全によりその性能・動作を確保しながら使用され続ける場合もある。信頼性の分野では、前者のような場合のシステムを非修復系、後者のような場合を修復系と呼んでいるが、本論文で故障解析の対象とする防災設備の多くは修復系として取り扱われる。修復系の機器・設備の性能・動作保持は、一般には機器・設備の状態を「点検」し、調整・修理等の「保全」によって行われる。信頼性工学の分野では、各種の修復システムに関する点検・保全方策が数多く議論されている<sup>27)</sup>。

一方、建築設備の分野では、近年、ようやく一般の建築設備の故障・保全に対する調査・研究が系統的に行われる<sup>28)</sup>ようになったが、対象とする設備の多くについて、信頼度、故障率等に関して十分な結果は得られていない。

防災設備に関しては上述の事情に加えて、通常動作状態にないため定期点検によってしか故障を発見できないという事情もあり、故障率の推定はもちろんのこと点検結果の整備もほとんどされていないのが現状である。

第2章に概要を示した建物データベースは、様々な用途・規模の多数の建築物から得られた大量のデータを収録しており、設備の種類は限定されるものの、防災設備の定期検査データも含まれている。本章では、建物データベースに収録されている防災設備の定期検査データを利用して、過去にほとんど解析されなかった防災設備の故障率を、建築物用途・規模別に推定している。

本論文で故障率の解析に用いる建築設備定期検査データは、機器の種類・故障履歴が不明、故障時刻が非常に広い時間間隔の中でしか分からない等、故障率を推定するための基本的情報のいくつかが欠如している。その結果、竣工時点での動作が確認された後、公式な定期検査の行われるまで、おそらく故障が放置されていたと思われるデータが多く見受けられることとなっている。本章では、このような定期検査データの性質を考慮して、第3章で述べた解析手法を

展開し、いくつかの解析方法を試みている。

本章では、まず、データの全体像を把握するために、ワイブル確率プロット法による図的解法を試みている。次に、

- ①建築物の竣工から定期検査までの時間・検査回数が建築物毎に異なる、
- ②最初の検査で故障の発見される建築物もあれば、最後の検査まで故障が発見されない建築物もある、
- ③故障時刻が竣工から第1回検査までの間、或いは検査と検査の間に起きたことしか分からない、

等を考慮して、定期検査データを多重時間打切りを受けた区間データと分類し、最尤法によりその故障率を推定している。

上述した手法は、第3章に述べたように、故障率等の推定によく利用されるものである。しかし、本論文で扱う故障データには、上記③に見られるような制約があり、定期検査開始以前と以後で、解析される故障時間の性質が変化する可能性がある。従って、故障率の現状把握が目的である場合、最尤法が最良の方法であるかは疑問である。そこで、定期検査開始以前と以後で故障時間の性質が変わることを考慮し、本論文で提案する瞬間故障率の近似推定法による推定も行い結果を比較している。

## § 1. 防災設備と解析データ

### 1.1 防災設備の解析対象

第2章では、建築基準法施行細則で指定される特殊建築物等から提出された、建築設備定期検査報告書に基づくデータベースの概要を示した。建物データベースの情報のうち、本章で用いるものは、主に設備の定期検査データであるが、表5-1は、検査の対象となる換気・排煙・非常用照明・給排水の4種類の設備毎に、各検査項目で要改善が指摘された建物数を集計し、用途別に示したものである。ただし、次の点に注意する必要がある。

建物データベースでは、建築物毎に設備の有無とその検査結果が記録されているが、設備毎にどの検査項目にも要改善がなければA、要改善があればB（検査時に改善）、或いはC（改善を指示）の総括評定が示され、要改善であった検査項目番号が列記されるという形式になっている。従って、換気・排煙・非常用照明・給排水の各設備が設置されているかどうかは分かるが、例えば換気設備の検査項目6.(機械式換気設備の外観検査)のような場合、要改善が指摘されていなければ、その検査項目の対象となる機器等の状態が良好であったのか、或いは設置されていないのかは識別できない。さらに、一部の機器を除いて、設置されている機器或いはシステムの方式に関する記載もない。そのため、同種の設備であっても、建築物用途・規模に応じて採用される機器、システムが異なったり、小規模の建築物では設置されない機器・設備があることを考え併せれば、建物データベースを利用する場合、建築物の用途・規模の全体を通じて故障率が推定できる設備は極めて限られる。

建物用途 換気設備検査項目	物販店舗	旅館・ホテル	病院	事務所	共同住宅
1. 换気空調設備関係図書の保管	0	0	0	0	0
2. 検査記録の保管	0	0	0	0	0
3. 保守管理の状態	0	0	1	1	10
4. 换気設備の設置	0	0	7	8	20
5. 自然換気設備の検査	0	0	0	8	37
6. 機械換気設備の外観検査 (空気調和設備の送風設備を含む)	25	24	38	228	1,486
7. 機械換気設備(中央管理方式の空気空気調和設備を含む)の性能検査	21	20	34	261	1,332
8. 中央管理方式の空気調和設備の室内環境検査	1	0	2	12	1
9. 防火ダンパーの検査(延焼の恐れのある部分に設けられたダンパーを含む)	8	3	5	42	98
10. 空気調和設備主要機器の外観検査	1	0	4	13	4

表 5-1.a 設備別総括評定結果及び  
検査項目別要改善結果  
(換気設備)

	対象棟数	評定B	評定C
物販店舗	520	25	6
旅館・ホテル	329	21	5
病院	413	30	14
事務所	1,711	187	118
共同住宅	10,388	1,037	482

建物用途 排煙設備検査項目	物販店舗	旅館・ホテル	病院	事務所	共同住宅
	0	0	0	0	0
1. 排煙設備関係図書の保管	0	0	0	0	0
2. 検査記録の保管	0	0	0	0	0
3. 保守管理の状態	1	0	0	0	0
4. 排煙口の外観検査	12	0	1	13	3
5. 排煙口の性能検査	10	1	1	8	3
6. 防煙壁の外観検査	1	0	0	3	0
7. 防煙壁の性能検査	1	0	0	0	0
8. 排煙風道の外観検査	2	0	0	3	0
9. 排煙風道の性能検査	1	0	0	4	0
10. 排煙機の外観検査	0	0	1	0	0
11. 排煙機の性能検査	1	0	1	5	0
12. 煙排出口の検査	0	0	0	2	0
13. 自家用発電装置の外観検査	1	0	0	1	0
14. 自家用発電装置の運転試験	1	0	0	1	0
15. 直結エンジンの外観検査	0	0	1	4	1
16. 直結エンジンの運転試験	0	0	1	3	1

表 5-1.b 設備別総括評定の結果及び  
検査項目別要改善結果  
(排煙設備)

	対象棟数	評定B	評定C
物販店舗	351	11	6
旅館・ホテル	104	1	1
病院	113	3	4
事務所	704	24	7
共同住宅	242	3	2

表 5-1.c 設備別総括評定の結果及び  
検査項目別要改善結果  
(非常用照明設備)

建物用途 非常用照明設備検査項目	物販店舗	旅館・ホテル	病院	事務所	共同住宅
	0	0	0	0	0
1. 電気設備関係図書の保管	0	0	0	0	0
2. 検査記録の保管	0	0	0	0	0
3. 保守管理の状態	1	1	0	0	3
4. 照明器具の外観検査	21	10	13	44	255
5. 照明器具の性能検査	37	10	20	74	389
6. 照度測定	39	8	17	53	261
7. 分電盤の検査	0	0	0	1	2
8. 切替回路の検査(別置電源方式)	1	0	0	3	1
9. 喰電池の外観検査	1	0	0	4	0
10. 喰電池の性能検査	2	0	0	5	1
11. 充電機の外観検査	1	0	0	1	0
12. 充電機の性能検査	1	0	0	1	0
13. 自家用発電装置の外観検査	0	0	0	0	0
14. 自家用発電装置の運転試験	0	0	0	0	0

	対象棟数	評定B	評定C
物販店舗	476	36	10
旅館・ホテル	301	12	2
病院	355	17	4
事務所	1,258	62	28
共同住宅	6,918	390	51

表 5-1.d 設備別総括評定の結果及び  
検査項目別要改善結果  
(給排水設備)

建物用途 給排水設備検査項目	物販店舗	旅館・ホテル	病院	事務所	共同住宅
	0	0	0	0	0
1. 給排水設備関係図書の保管	0	0	0	0	0
2. 検査記録の保管	0	0	0	0	0
3. 保守管理の状態	0	0	0	0	5
4. 衛生器具、排水トラップ及び阻塞器の検査(共同住宅等の住戸にかかる部分は除く)	2	3	5	9	36
5. 配管一般及び防露・保温の検査	1	1	4	10	61
6. 給水設備の検査(中央式給冷水設備を含む)	2	6	3	15	115
7. 給湯設備の検査(共同住宅等の住戸にかかる部分は除く)	1	0	0	1	13
8. 排水通気設備の検査	1	3	4	17	95
9. 循環用利用水設備(中水道を含む)の検査	1	0	0	0	1

	対象棟数	評定B	評定C
物販店舗	455	10	0
旅館・ホテル	313	10	2
病院	406	14	2
事務所	1,701	45	6
共同住宅	10,610	303	35

本論文では、上述の事情と防災設備の故障率を推定するという目的を考慮して、非常用照明設備に注目して、照明器具の性能検査である検査項目5. を解析の対象とした。その理由は以下の通りである。

- ①非常用照明設備は、居住者の安全に関わる防災設備の1つである
- ②定期検査の対象となっている4種類の設備の中で、建築物用途・規模によるシステム、使用機器の相違が最も小さいと考えられる上、非常用照明設備が存在していれば必ず非常用照明器具が存在している
- ③検査項目5. で要改善が指摘されるのは、照明が点灯しなかった、或いはし続けなかった場合であり、要改善を機器の故障と判断することができる
- ④設置率が、「物販店舗」用途、「旅館・ホテル」用途の建築物で90%程度、「病院」用途の建築物で80%程度、「事務所」用途、「共同住宅」用途の建築物で70%程度と、用途によらず比較的高い
- ⑤表5-2は、各用途・規模の建築物を数例(2~7例)づつ抜出して、建築物1棟当たりの非常用照明器具数の平均と、器具1個当たりの平均床面積を示したものである。表5-2で、用途別に器具当たりの平均床面積を見ると、「病院」用途における延床面積10,001~15,000m<sup>2</sup>の建築物、及び「共同住宅」用途における延床面積3,000m<sup>2</sup>以下の建築物で大きく異なっているが、同一の用途内では器具当たりの平均床面積がほぼ一定しており、設置器具数が建築物規模に大略比例しているとみなせる
- ⑥法規で設置が義務付けられている(建築基準法第35条、昭和45年建設省告示第1830号他)設備であることから、非常用照明器具の構成要素である光源・電源等の規格が明確であり、製品による性能、寿命等のばらつきが少ないと考えられる

表 5-2. 非常用照明器具設置数及び器具当たり平均床面積

- ⑦電球・予備電源・切替スイッチ等経時劣化の要素を含む器具であるので、事前保全等の維持管理活動による動作状態の変化が明確に示されると予想される

規模 用途	(m <sup>2</sup> ) ~ 1,000	1,001 ~ 3,000	3,001 ~ 6,000	6,001 ~ 10,000	10,001 ~ 15,000	15,001 ~ 20,000	20,001~
物販店舗	13 57m <sup>2</sup>	27 96m <sup>2</sup>	77 62m <sup>2</sup>	147 44m <sup>2</sup>	321 35m <sup>2</sup>	502 36m <sup>2</sup>	844 44m <sup>2</sup>
旅館・ホテル	47 17m <sup>2</sup>	134 17m <sup>2</sup>	303 15m <sup>2</sup>	484 17m <sup>2</sup>	277 44m <sup>2</sup>	701 23m <sup>2</sup>	681 44m <sup>2</sup>
病院	19 36m <sup>2</sup>	46 24m <sup>2</sup>	146 34m <sup>2</sup>	128 61m <sup>2</sup>	91 137m <sup>2</sup>	398 39m <sup>2</sup>	442 59m <sup>2</sup>
事務所	-	79 31m <sup>2</sup>	120 38m <sup>2</sup>	311 32m <sup>2</sup>	292 36m <sup>2</sup>	879 21m <sup>2</sup>	1,539 14m <sup>2</sup>
共同住宅	11 94m <sup>2</sup>	13 87m <sup>2</sup>	20 226m <sup>2</sup>	35 213m <sup>2</sup>	64 165m <sup>2</sup>	61 193m <sup>2</sup>	107 209m <sup>2</sup>

なお、上述③の理由から、本論文では以後、要改善と故障の用語を同一の意味で使用している。

表5-3は、建築物用途・延床面積別に検査項目5.に要改善が指摘された建物数を検査細目別に集計したものである。図5-1は、建築設備定期検査業務規準指導書における検査項目5.の検査要領を示したものである。図5-1によれば、検査細目5.2は、検査

表 5-3. 非常用照明設備設置建物数及び検査細目別要改善数  
(最終検査結果による)

規模 用途	(㎡) ～1,000	1,001 ～3,000	3,001 ～6,000	6,001 ～10,000	10,001 ～15,000	15,001 ～20,000	20,001～
物販店舗	81	166	83	39	34	22	36
	5	8	7	0	0	0	1
	0	1	0	0	0	0	0
	6	11	7	0	0	0	1
旅館・ホテル	99	101	45	18	8	5	24
	2	5	1	0	1	0	0
	1	0	0	0	0	0	0
	2	5	1	0	1	0	0
病院	47	150	78	41	13	8	12
	2	6	2	0	1	1	0
	0	0	0	0	0	0	0
	2	7	4	1	1	1	0
事務所	—	271	405	254	147	59	101
	—	18	22	6	1	1	1
	—	3	1	1	0	0	0
	—	21	22	10	1	1	1
共同住宅	2,436	2,849	1,011	355	115	60	46
	107	123	56	18	6	4	6
	1	1	2	0	0	0	0
	117	131	61	22	6	4	6

1段 非照設備設置建物件数、2段 検査細目 5.1.(1)、3段 検査細目 5.1.(2)、4段 検査細目 5.2  
器具抜取り数が延床面積毎に指示されているため、建築物毎の設置器具数が不明であるという制約を受けない。このことに加えて、表5-3に示される検査細目別要改善建物数、及び非常用照明設備の本来の機能を考慮して、故障率の解析にあたっては、検査細目5.2に関する検査結果を用いる。

非常用照明器具に関して若干の説明を加えておく。表5-4は、一般に使用される非常用照明器具の種類を示したものである。建築設備定期検査報告書原本を数十例調査した限り、共同住宅用途を除くどの用途も、延床面積が小さな建築

No. 検査項目	検査細目	結 果	該当するものなし	検査要領	該当法規	重要度ランク	検査結果の登記事項												
5. 非常用器具の性能検査	5-1 道具は子偏電源で点灯するか (1) 電源内蔵形器具は分光器の照度または器具の点灯用スイッチで子偏電源に切替えられ点灯するか (2) 子偏電源が別置の場合、序電機出装置の操作で子偏電源に切替えられ点灯するか 5-2 電源内蔵形器具は子偏電源で30分以上点灯するか	良 要改善 良 要改善 良 要改善		<p>5-0-1 器具の点灯検査は抜取とし、検査数は4-0-1表と同じ。詳細は図1-1(1)による。ただし、2,000㎡以下の小規模の建物は全数検査が望ましい。</p> <p>5-1-1 抜取点灯検査は適切行動上有效な位置の器具を選定して行う。</p> <p>5-1-2 前記の点灯検査の他に30分以上の点灯試験を行う。検査数は抜取とし次表による。</p> <table border="1"> <tr> <th>建蔽面積</th> <th>検査数</th> </tr> <tr> <td>1,000㎡以下</td> <td>5ヶ所以上</td> </tr> <tr> <td>3,000㎡</td> <td>10ヶ所</td> </tr> <tr> <td>6,000㎡</td> <td>15ヶ所</td> </tr> <tr> <td>10,000㎡</td> <td>20ヶ所</td> </tr> <tr> <td>10,000㎡を超えるもの</td> <td>5ヶ所増し</td> </tr> </table> <p>5-1-3 別置子偏電源による点灯試験を行う場合は電池容量を考慮して30分以内に終了のこと。</p> <p>5-1-4 常時点灯方式で常時ランプライタで点滅させるものは、ランプライタの操作で子偏電源に切り替らないこと、およびランプライタの「点滅」の状態で一般電源を点滅することにより子偏電源に切替ることを調べる。</p>	建蔽面積	検査数	1,000㎡以下	5ヶ所以上	3,000㎡	10ヶ所	6,000㎡	15ヶ所	10,000㎡	20ヶ所	10,000㎡を超えるもの	5ヶ所増し	昭45、告第1830号 第1、第3	A	
建蔽面積	検査数																		
1,000㎡以下	5ヶ所以上																		
3,000㎡	10ヶ所																		
6,000㎡	15ヶ所																		
10,000㎡	20ヶ所																		
10,000㎡を超えるもの	5ヶ所増し																		

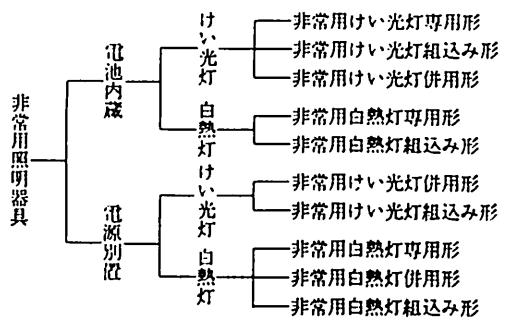
図 5-1. 非常用照明設備検査項目5.の検査要領  
(建築設備定期検査業務基準指導書)

物では、電池内蔵・蛍光灯、或いは電池内蔵・白熱灯の器具が多く使用されており、延床面積が大きくなると、電源別置、ないしは発電機・電源別置併用と電池内蔵の器具を混合して使用する建築物が増加してくる。また建築物内の場所によって、居室、廊下部分では白熱灯、階段部分では蛍光灯が多く使用されている。共同住宅用途では、延床面積の大小に関わらず、全ての建築物で電池内蔵の器具が使用されている。これらの器具は、建築基準法施行令第126条の5及び昭和45年告示第1830号に定められる、非常用照明装置の構造規準に適合しているものである。非常用照明器具を構成する部品のうち、検査細目5.2の主要検査対象は光源と電源であるが、保全が比較的困難と考えられる電源に関して以下に述べる。上述構造基準には、電源に関して予備電源を蓄電池とする旨の指定があるが、これが上述の内蔵、別置の電池にあたるもので、一般自家用として利用される電池は、鉛蓄電池及びアルカリ蓄電池が多い。蓄電池の性能として、充電電圧から放電終止電圧に降下するまでに要する時間が、例えば10時間であるような放電電流を10時間率放電と呼ぶが、10時間率放電を採用しているのが鉛蓄電池であり、5時間率放電を採用しているのがアルカリ蓄電池である。蓄電池の寿命性能は、鉛蓄電池よりアルカリ蓄電池の方が高く、保守も簡単であるとされている。

## 1.2 データの事前処理

本論文で利用した建物データベースをはじめとして、一般にフィールドデータと呼ばれる機器・設備の使用現場での記録から構成されるデータは、記録目的が、機器・設備の動作・故障に関する解析にはおかれていない場合が多いため、フィールドデータを用いて故障率の解析を行う場合、いくつかの妥当と考えられる仮定を設ける必要が生ずる。前述したように、建築設備定期検査報告書から作成された建物データベースについても、機器・設備の故障率解析に用いるには様々な制約が存在する。以下では、建物データベース内の定期検査データの性質を確認し、故障率を推定するためにはどのような仮定が必要となるかを検討した後、故障データとして使用するためのデータの再整理について述

表 5-4. 非常用照明器具の種類



べておく。

機器・設備の故障率を推定する場合に必要と考えられる情報のうち、非常用照明設備に関する情報を以下に列挙するが、○印を付した項目はデータベース内で既知なものを、●印の項目は未知なものを示す。

- 建築物の用途、建築面積、延床面積、及び地上・地下階数
- 建築物の竣工年月日、建築確認年月日
- 各建築物に設置されている設備の種類
- 各建築物における最新の定期検査及び過去1年～4年（検査回数1～4回）の定期検査の実施年月日とその結果
- 設置非常用照明器具に関する情報（器具の種類・型式・設置時期・寿命等々）
- 建築物毎の非常用照明器具数
- 竣工から第1回検査までの期間における使用・保全履歴
- 要改善が指摘された場合の修理の完了時刻、或いは連続した検査で要改善が指摘された場合の各検査後の修理の有無

上記●印の情報のいくつかは、故障率を推定するために不可欠な情報と考えられる。本論文では、これら未知の情報を補完するため、現時点でも最も妥当と考えられるいくつかの仮定をした。

各建築物に設置されている非常用照明器具の種類は、前述したように、小規模な建築物では電源内蔵型の器具が多く使用されており、建築物規模が大きくなるに従って光源については蛍光灯の、電源については電源別置型、或いは自家発電機型の使用が増加するようになる。ただし自家発電機を使用する建築物は全体からみれば少数であり、ほとんどの建築物では電源内蔵型か電源別置型との併用とみなせる。白熱灯、蛍光灯いずれの光源にしても、その寿命特性は摩耗型と考えられること、J I S等により規格が明確であること、さらに検査細目5.2は抜取検査であるため光源・電源が一対で検査されること等から、全て電源内蔵型器具と仮定される。

非常用照明設備の設置時期に関しては、関係法規の制定が昭和45年であり、図2-7に見られるように設備の設置率も昭和46年から急に高くなること、建築物竣工後の設置は大規模な内装改修を伴う可能性があること等から、解析の対

象である非常用照明設備設置建築物の大半を占める、過去20年以内に竣工したものにあっては、設置時期は竣工時期に一致すると仮定できる。

前述した未知情報のうち、第1項に対して以上の仮定をしたが、第2項、第3項を考慮して、故障時間を2通り算出して用いている。区間データ、多重時間打切りデータについては第3章で述べたが、ここで扱うデータも、基本的に多重時間打切りを受けた区間データと分類される。すなわち、建築物の竣工時点から初回定期検査時点までの時間・定期検査の回数は建築物毎に異なり、データとして得られている最初の検査で故障が発見されるものもあれば、最後の検査まで故障が発見されないものもあり、さらにその故障時刻は、竣工から第1回検査までの間、ないしは検査と検査の間であることしか分からぬといふデータである。

のことから、故障率を推定するデータとして、故障時間を2通りに整理できることと考えられる。

図5-2は、竣工時点（＝設置時点＝稼動開始時点）から最初に故障が発見されるまでの時間を故障時間と考えて、稼動開始以降の累積故障確率を求めることにより、故障率を推定する場合のデータ整理の方法を示している。このデータ整理では、左側に建築物竣工時点をそろえることで、右側で多重時間打切りを受けたデータとすることができる。ただし竣工から初回検査までの記録がないこと、各検査が定期検査であることから、故障が発見される検査までは区間データとなる。従って、初回検査で発見された故障は、竣工時点と初回検査時点の中間点で発生し、それ以外の検査で発見された故障は、一期前の検査との中間点で発生したと仮定される。

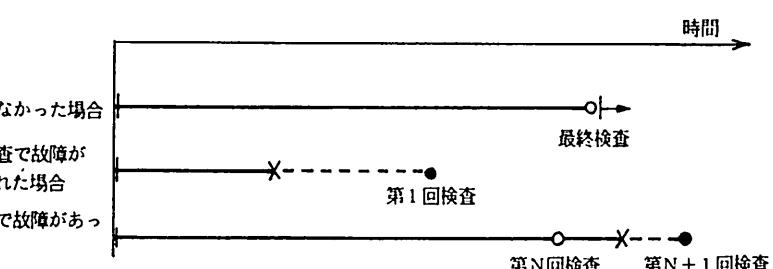


図 5-2. 初めて発見された故障に関する故障時間

（|| 竣工時刻、× 故障時間、| →動作時間）

図5-3は、短い時間間隔における平均故障率（これはほぼ瞬間故障率と考えてもよい）を推定する場合のデータ整理の方法を示している。このデータ整理方法は、最終の検査（L検査）とその一期前の検査（L-1検査）に注目し、L-1検査終了時点を稼動開始時点と考えるものである。建物データベースに含

まれる建築物の、用途別平均検査間隔は1.03年～1.09年であり、L-1検査からL検査までは約1年（365日）と見なせるが、これは竣工から最終検査までの時間に対して短いものである。図5-3に示したデータ整理に関して、L検査、L-1検査とも要改善と記録されている場合は、その期間中故障状態にあったと考えて、故障率の解析データからは除外している。

故障率の推定のために、上述の2通りのデータ整理が必要な理由を以下に示す。

表5-5は、建築物用途・延床面積別に、非常用照明設備の設置された建物数、第1回定期検査で検査細目5.2が要改善とされた建物数、及び第1回以外の定期検査で検査細目5.2が要改善とされた建物数を示したものである。表5-6は、建築物用途・延床面積別に、竣工から最終検査までの平均経過年数とその標準偏差を示したものである。

表5-5に示される結果から、初回検査で発見される故障が多く、図5-2に示したデータ整理に基づく解析の重要性が分かる。しかし、表5-6に示される結果、及び第2章に示した竣工年別建物数の推移を見ると、竣工後第1回検査までかなり長期間に及ぶ建築物があることが分かる。区間データに関して、時間区間

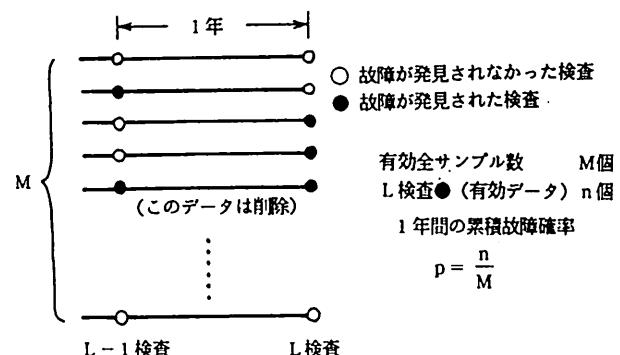


図 5-3. 各建物の最新1年間における故障の取扱い

表 5-5. 故障発見検査別要改善建物数

用途	規模	設置建物数								計
		~1,000	1,001～3,000	3,001～6,000	6,001～10,000	10,001～15,000	15,001～20,000	20,001～		
物販店舗	設置建物数	41	116	55	32	27	18	31	320	
	初回故障	2	1	5	3	0	1	0	12	
	他の故障	1	7	1	0	1	0	1	11	
旅館・ホテル	設置建物数	75	72	36	15	7	5	24	234	
	初回故障	0	1	1	0	1	0	0	3	
	他の故障	1	5	1	0	0	0	0	7	
病院	設置建物数	20	89	60	32	8	6	12	227	
	初回故障	0	3	2	0	0	0	0	5	
	他の故障	1	1	0	1	0	1	0	4	
事務所	設置建物数		215	332	217	123	48	93	1,028	
	初回故障		18	21	6	1	1	1	48	
	他の故障		3	5	8	1	0	0	17	
共同住宅	設置建物数	1,618	2,168	799	291	92	46	35	5,049	
	初回故障	67	82	43	15	5	6	4	222	
	他の故障	13	38	13	7	2	1	1	75	

表 5-6. 竣工後平均経過年数

がそれほど長期でなければ、故障時刻を区間の中間点と仮定してもよいとされている<sup>13)</sup>。

しかし、本論文で用いた建物データベースには、時間区間が長期にわたる建築物も多く含まれ、第1回検査までの使用・保全履歴が不明であるこ

規模 用途	(m <sup>2</sup> ) ～1,000	1,001 ～3,000	3,001 ～6,000	6,001 ～10,000	10,001 ～15,000	15,001 ～20,000	20,001～
物販店舗	9.0 6.76	10.4 5.03	13.1 5.13	12.8 7.15	13.5 5.60	10.0 4.86	12.6 7.06
旅館・ホテル	8.5 4.88	10.2 7.65	11.2 5.79	12.9 6.81	12.8 7.21	10.4 7.52	11.1 6.56
病院	11.6 5.37	10.3 5.13	10.0 4.97	11.6 10.93	18.7 15.54	14.0 7.38	11.5 7.65
事務所	— —	10.2 7.18	10.3 6.79	12.6 6.92	13.6 6.25	12.2 6.10	11.7 7.16
共同住宅	8.1 4.73	8.4 4.96	8.9 4.81	9.3 4.33	9.4 4.25	8.5 3.74	7.5 4.03

上段 平均、下段 標準偏差

とに対して行った、故障時刻を中間点とする仮定が、故障率の推定誤差を大きくすると考えられる。

一方、最終検査までの1年間を対象とする、後者のデータ整理に基づく解析は、故障時間の分布に指數分布を仮定することになるが、後節で詳述するよう、竣工から最終検査までの期間に比べて1年間が比較的短期間であることから、最終検査時点における故障率の推定値に、良い推定精度を与えることが予想される。

## § 2. 故障率の特性

### 2.1 故障率

系、機器、部品等の信頼性を数学的に表現する様々な尺度が提案されているが、重要な尺度の一つに故障率がある。第3章に述べたように、信頼性を表現する他の尺度として、確率を用いて表現する信頼度があったが、これは一般には時間を含めて確率分布として表現されるものである。

系、機器、部品の故障時間  $X$  が、確率密度関数  $f(x)$  なる確率分布に従い、その故障時間分布関数を  $F(x)$  とすると、動作を始めてから時刻  $t$  までに故障する確率が、故障時間を  $x$  として

$$Pr\{x \leq t\} = \int_0^t f(x) dx = F(t) \quad (5.1)$$

と表現され、また

$$Pr\{x > t\} = \int_t^\infty f(x) dx = R(t) \quad (5.2)$$

ここに、 $R(t)$ は信頼度である。 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、及び $f(t)$ には

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (5.3)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (5.4)$$

の関係がある。

故障率は、時間の関数として $\lambda(t)$ と表現され、故障率関数と呼ばれるが、 $t$ 時間後の稼動割合を $R(t)$ 、 $t$ 時刻の故障割合を $f(t)$ とすれば

$$\lambda(t) \equiv \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5.5)$$

と表現される。この $\lambda(t)$ を用いて、時刻 $t$ まで故障しなかったという条件の下で、すなわち稼動開始からの動作時間 $t$ の機器が $t$ と $t + dt$ の間で故障する確率は $\lambda(t)dt$ となる。(5.5)式は(5.4)式より

$$\lambda(t) = \frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} \quad (5.6)$$

と表されるので、

$$\begin{aligned} \int_0^t \lambda(x) dx &= \int_0^t \frac{1}{R(x)} \cdot \frac{dR(x)}{dx} dx \\ &= [-\log R(x)]_0^t \\ &= \log R(0) - \log R(t) \\ &= -\log R(t) \quad (\because R(0)=1) \end{aligned} \quad (5.7)$$

となる。従って、

$$R(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(x) dx \right\} \quad (5.8)$$

と表されることになる。一般に $R(t)$ は(5.8)式に示すような指数形で表現され、 $\lambda(t)$ の設定の仕方によって $R(t)$ が決まる。よく知られている故障時間分布、例えば指数分布、ガンマ分布、ワイブル分布等はいずれも指数形である。

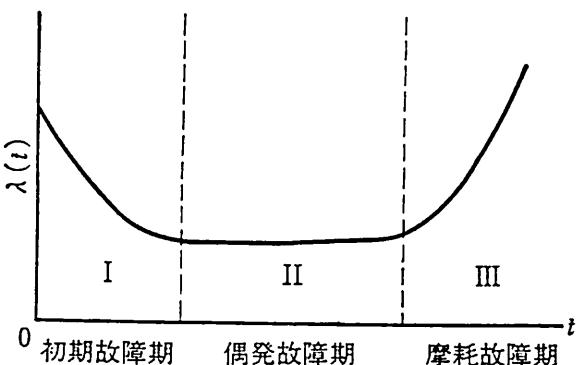
以上のように、故障率が信頼性を測る重要な尺度として定義されているが、系、機器、部品の動作開始から廃却に至るまでの $\lambda(t)$ は、一般に図5-4のように推移するといわれている。

I の期間は、初期故障期間と呼ばれ、この期間にはエーディング、或いは馴らし運転によって欠陥を除去するデバッギングが行われる。II の期間は、偶発故障期と呼ばれ、故障率が一定となる期間を表している。通常多くの機器はこの期間に使用されると考えられるが、

故障率が一定であるとは、時間的に不規則に故障が発生するため故障を予知できず、故障を予防するための事前保全等による処置が不可能な期間となる。III の期間は、故障率が単調に増加する摩耗故障期と呼ばれ、摩耗や疲労などの原因により次第に寿命がつきてゆく期間である。故障率関数の形によって故障時間分布関数が決定されることは既に述べたが、上記 I、II、III に相当する故障率関数から導かれる故障時間分布関数のうち、代表的なものを表 5-7 に示す。

表 5-7. 代表的な故障時間分布

図 5-4. 典型的な故障率関数



指掌分布は、故障率

が時間に対して一定の場合の故障時間分布であり、図 5-4 中 II の期間の故障時間分布を表現する。この分布は他の指掌形分布の基本をなし、单一のパラメータで表現できるため数学的な取り扱いが簡単であり、通常の使用期間で

分布形	確率密度関数 (P D F)	パラメータ	平均値、分散
指掌分布	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$\lambda$	$E(X) = \frac{1}{\lambda}$ $Var(X) = \frac{1}{\lambda^2}$
正規分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu$ $\sigma$	$E(X) = \mu$ $Var(X) = \sigma^2$
ワイル分布	$f(x) = \frac{m}{\eta} \left( \frac{x-\gamma}{\eta} \right)^{m-1} e^{-\left( \frac{(x-\gamma)}{\eta} \right)^m}$	$m$ $\eta$ $\gamma$	$E(X) = \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right)$ $Var(X) = \eta^2 \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{m} \right) - \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \right\}^2 \right]$
ガム分布	$f(x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}$	$\lambda$ $\alpha$	$E(X) = \frac{\alpha}{\lambda}$ $Var(X) = \frac{\alpha}{\lambda^2}$

の故障時間解析、保全時間解析等にしばしば用いられるものである。

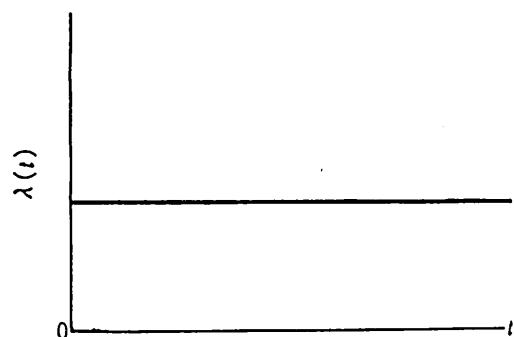
正規分布は、確率変数の定義域が  $(-\infty, \infty)$  であるため、厳密には故障時間分布として使用できないが、 $\mu > 3\sigma$  なる場合には実用上支障がないとされる<sup>7)</sup>。故障時間分布が正規分布の場合の故障率関数は、任意の  $\mu$ 、 $\sigma$  において、時間  $t$  に関して単調増加するが、そのことから摩耗、疲労による故障をよく記

述するといわれ、図5-4のⅢの期間を表現する分布となる。

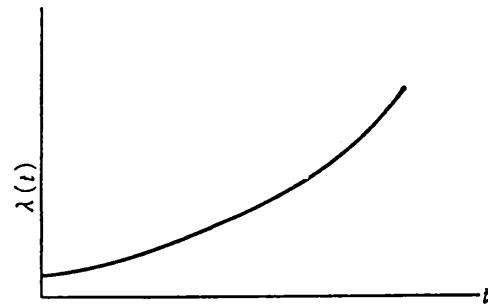
同一分布  $F(x)$  に従う確率変数の最大値、或いは最小値の漸近分布として極値分布が知られているが、最小極値分布に属するものの一つにワイブル分布がある。もともとワイブル分布は、真空管故障、疲労故障を記述するものとして提案されたが、ワイブル分布の故障率関数は時間に関し単調となり、表5-5に示すパラメータ  $m$  の値によって単調減少 ( $m < 1$ )、一定 ( $m = 1$ )、単調増加 ( $m > 1$ ) の性状を示す。そのため様々な故障形態に対応できるとされ、故障時間分布としてよく用いられる分布の一つとなっている。

ガンマ分布は、指数分布を拡張したもので、アーラン分布の名でも知られるが、形状パラメータ  $\alpha$ 、尺度パラメータ  $\lambda$  の2つのパラメータをもつ。ガンマ分布の故障率関数も、ワイブル分布と同様に、 $\alpha$  の値によって単調減少 ( $\alpha < 1$ )、一定 ( $\alpha = 1$ )、単調増加 ( $\alpha > 1$ ) の性状を示す。

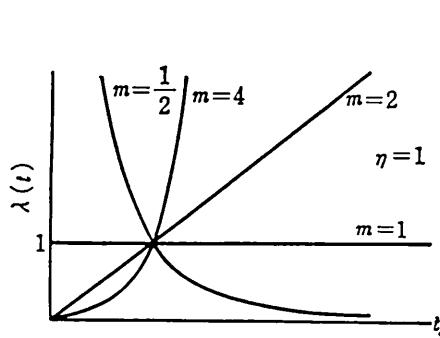
図5-5は、表5-7に示したそれぞれの分布による故障率関数を示したものである。



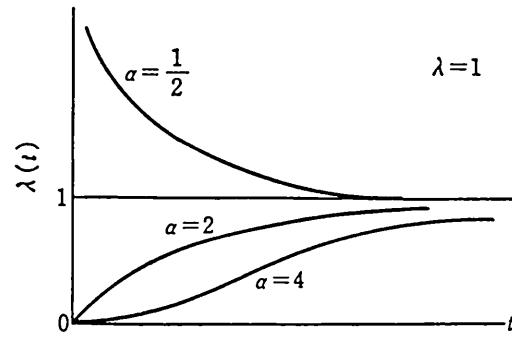
指数分布の  $\lambda(t)$



正規分布の  $\lambda(t)$



ワイブル分布の  $\lambda(t)$



ガンマ分布の  $\lambda(t)$

図 5-5. 故障時間分布別の故障率関数

これらの図は、時間に対する故障率関数の変化を表現しており、ここから故障の起こりやすさが時間的に変動することが分かる。一般に系、機器、部品は、時間が経過するにつれて故障しやすくなると言われる。例えば、図5-5の正規分布の故障率関数に見られるような、時間に関して増加型の故障率関数がそのことを示す。本章で解析する防災設備の多くは、竣工時に動作確認がなされて後、おそらく前述したデバッギングが十分になされていないか、或いは適切なエージング期間がとられていないと思われ、文献<sup>27)</sup>でも指摘されているように、フィールドデータの解析からはほとんど故障率増加型しか見いだされない。しかしながら、実際に使用されている機器の故障の起こり易さ、逆に言えば故障の起こりにくさは、機器が固有にもつ故障率だけで表現されるものではない。特に修復系の場合、機器等の時間的品質特性以外に保全活動等の影響を受ける。次項では故障率関数と保全との関係を述べる。

## 2.2 故障率と保全

系、機器、部品の故障の起こり易さを示す指標として、信頼度、故障率が定義されていることをここまで述べてきたが、逆に故障した系や機器の機能回復のされ易さを表す指標として保全度が定義されている。JIS Z 8115 M10によれば、保全度とは「系、または機器に故障を発生して後、規定の保全環境においてその修理がある時間内に完了する確率」とされている。保全とは系、機器の機能回復のための措置の総称であり、保全度の定義にある修理とは、部品、システム内コンポーネント或いはユニットの交換も含めて考えるものである。

上述した保全度の定義では、保全は故障時に行われるものとなっているが、一般には、故障時に行う保全を事後保全（C M :corrective maintenance）（JIS Z 8115 M3）、故障の発生を未然に防止する措置を予防保全（P M :preventive maintenance或いはpredictive maintenance）（JIS Z 8115 M2）として、それらを保全と総称している。予防保全は、清掃、注油など日常的に行われるものから、部品の修理・交換、システム全体の交換・調整など計画的に実施するものまで、システムを効率的に運営する作業の全てを含めて考えるものである。

信頼性の定量的表現として信頼度関数、故障率関数が定義されると同様に、保全についても保全度関数、保全率関数が定義されている。これは故障とまっ

たく同様に、例えば一定時間の間の保全完了率（保全率）が時間に依存せず一定（ $\mu$ ）と考えると、故障後保全が完了し正常に動作し始めるまでの時間、すなわち保全時間分布関数が、

$$G(t) = 1 - \exp(-\mu t) \quad (5.9)$$

と指数分布で表される。

一般に、保全時間分布関数としては対数正規分布がよくあてはまるといわれる。ただし、保全時間分布関数は個別に検証する必要があり、保全時間分布の決定はかなり困難であるのが普通である。

保全を伴う機器、システムは、故障のし易さと修復のされ易さの両面から評価され、使用期間全体を通して性能が検討されることになるが、信頼性の分野ではこのことを考慮して、信頼度を固有信頼度「系、機器、部品が規定の試験条件で規定の時間、規定の機能を適正に遂行する確率」(JIS Z 8115 R6)と使用信頼度「系、機器、部品の使用の時、使用者の保全および操作能力、装備環境、輸送取扱い、保管などの使用条件が固有信頼度を低減する確率」(JIS Z 8115 R7)に分けている。この関係を図示したものが図5-6<sup>29)</sup>である。図5-6によれば、システムの使用中における信頼度は、固有信頼度  $R_i$  と使用信頼度  $R_u$  の積で表される。一般に、機器、システムの使用信頼度は、使用環境・条件によって変

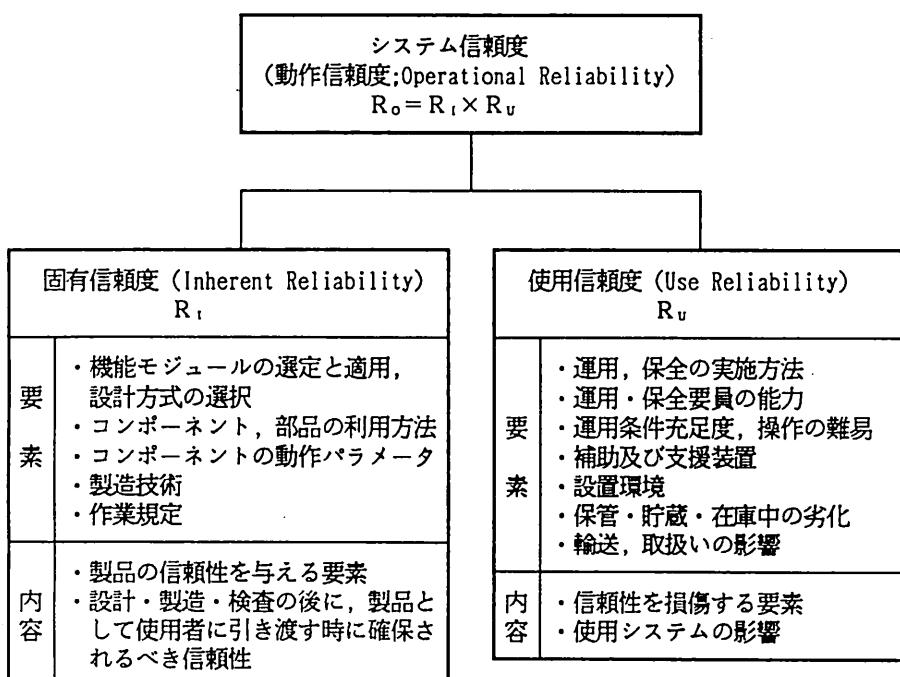


図 5-6. システム信頼度と構成諸要素

化するため、使用信頼度を一義的に決定することはできない。実用的な方法としてしばしば用いられるのは、使用方法、保守方法、使用環境の過酷さ等による固有信頼度の減少程度を示す調整係数(JIS Z 8115 D11)の一つの、環境係数Kを、実験室試験とフィールドデータの結果から算定することである。表5-8<sup>29)</sup>は、環境係数Kの一例を示したものであるが、この環境係数Kによって、使用現場での故障率は、基本故障率(固有信頼度を決定する故障率)を $\lambda$ として、

$$\lambda = K \lambda_0 \quad (5.10)$$

で表される。

信頼性工学においては、機器、システムの使用過程における信頼度の扱いが上述のように定式化される<sup>29)</sup>が、防災設備の多くについては、保全時間分布の決定が困難であるのに加えて、使用信頼度或いは環境係数の決定も困難であり、固有信頼度、したがって基本故障率も知られていない。従って、防災設備については、固有信頼度を規定する基本故障率とは別に、現場での使用・保全環境等の要因も含まれたものとして、より広く柔軟に故障率を捉え直す必要がある。

本論文で使用した建物データベースに含まれる建築物のうち、共同住宅に関してランダムサンプリ

表 5-8. Hughes社の発表した環境係数(K ファクター)

シグした15棟の建築物に対して、設備の維持管理実態の詳細調査が中高層共同住宅の品質性能確保に関する調査委員会<sup>30)</sup>で行われたが、調査結果の一部を表5-9に示す。表中非常用照明設備の不良箇所を見ると、建築物の経過年数によらず、ほとんどの建築物の管理者はバッテリーの劣化を不良原因に挙げており、建物データベース全体でこの傾

表 5-9. 定期検査対象建築物詳細調査の結果（共同住宅）

建物番号	規模	竣工年-調査年 (確認)	経過年数	非常用照明器具 設置数	不良箇所	処置
1	A	'76-'90	14	16 灯	点灯不良	器具交換
2	B	'81-'90	9	26 灯	球切れ, バッテリー不良	部品交換
3	A	'81-'90	9	9 灯	施工・竣工検査の不備	
4	B	'74-'90	16	89 灯	不点灯, 劣化	部品交換, 器具交換
5	A	'76-'90	14	—	—	
6	B	'82-'90	8	105 灯	バッテリー容量不足	器具交換
7	B	'73-'90	17	89 灯	球切れ, バッテリー劣化	部品交換
8	B	'74-'90	16	39 灯	バッテリー劣化	部品交換
9	A	'79-'90	11	13 灯	バッテリー不良	部品交換
10	B	'76-'90	14	34 灯	蛍光灯不良, バッテリー不良	部品交換
11	B	'82-'90	8	36 灯	—	—
12	B	'74-'90	16	36 灯	バッテリー容量不足	部品交換
13	B	'74-'90	16	26 灯	—	不良判明次第随時修理, 器具交換 (旧器具は 2 灯)
14	B	'79-'90	11	95 灯	不点灯	配線不良のため引き直し, 不良発見次第部品交換
15	A	'73-'90	17	23 灯	バッテリー不良	修理 (部品交換?)

規模 A (2,000 m<sup>2</sup>以下) B (2,001 m<sup>2</sup>以上)

向が変化しないならば、非常用照明器具の検査細目 5.2 に対して指摘された要改善の大部分が、バッテリーの不良と考えられる。第 3 章では、代表的故障時間分布についてその性質等を述べたが、電池の寿命時間分布が正規形で近似されることを述べた。従って、主たる故障原因が蓄電池の不良である場合、故障時間分布に正規分布を仮定することは不合理ではない。図 5-7 は故障時間分布が正規分布の  $\lambda(t)$  時の故障率関数の時間推移を示している。

図 5-7 は、蓄電池の固有信頼度に係る基本故障率関数を示すものであり、照明器具の故障が蓄電池の故障、寿命だけに左右されるならば、図 5-7 に示す故障率関数がそのまま照明器具の故障率関数となる。しかし、蓄電池には保守が必要なこと、上述の詳細調査によればバッテリーの交換が相当数の建築物でなされていることから、照明器具の故障率は電池に対する保全を含めて考えねばならない。さら

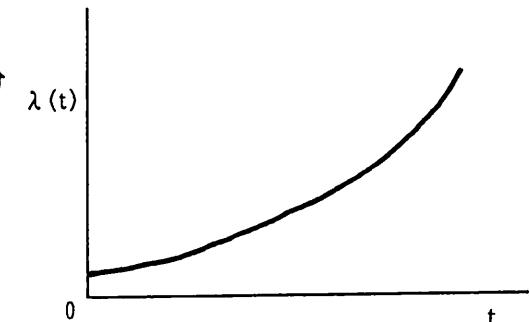


図 5-7. 基本故障率関数（正規分布）

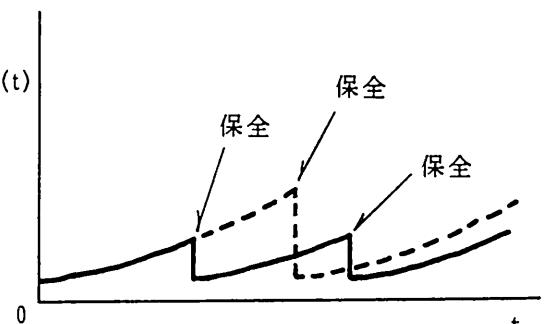


図 5-8. 保全回数が異なるときの故障率関数

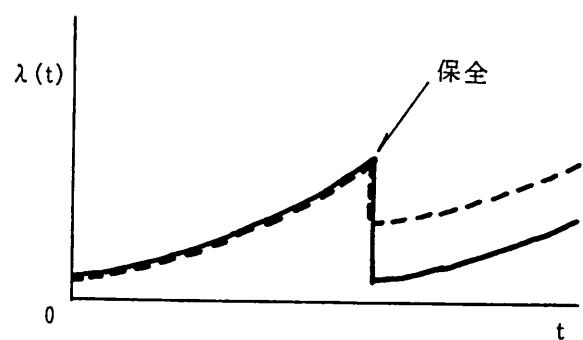


図 5-9. 保全レベルが異なるときの故障率関数

に、§1.で述べたように、蓄電池の性能として5時間率放電、10時間率放電が採用されており、照明器具の故障率には、定期的な点灯試験の頻度等の使用環境も影響すると予想される。これらのこととは、照明器具というユニットの故障が、単に蓄電池というエレメントの基本故障率だけによらず、見かけ上保全、使用環境等の要因が取り込まれた、使用信頼度を含めたものとして出現することを意味している。

図5-7の故障率関数が保全によりどのように変化するかを、図5-8、図5-9に示す。図5-8は、保全のレベルが同一で保全回数が異なる場合を示し、図5-9は、保全回数が同じで保全レベルが異なる場合を示している。保全のレベルとは、具体的には蓄電池の電圧検査の精度、電解液比重管理の精度、充電管理の精度、電池交換を行うかどうかの判断等を指している。保全回数が多く、保全レベルの高い方が、任意の時間間隔における平均故障率は低くなるが、現状では保全レベルと故障率低減量に関して定量的に明らかにした資料はなく、実際の維持管理現場においては、様々な保全レベル・保全回数が組み合わされていると考えられ、それぞれの構成部品に対する保全の影響を数値的に組み上げて、照明器具全体の故障率を求めることは不可能である。

次節では、蓄電池の要因、光源の要因、使用・保全の要因等が全て含まれた結果出現する故障における、使用故障率とも呼ぶべき見かけの故障率を、非常用照明器具の故障率として推定するが、防災設備の故障に関して、環境係数を決定するような実験データ、或いはメーカーのデータが得られていない現状では、このような使用故障率が故障の現状を最もよく表現すると考えられる。

### §3. データベースを利用した故障率の推定

#### 3.1 ウィブル確率プロット法による推定

確率紙へのプロットは、第3章に述べたように、故障データの解析の初期段階に利用されるもので、ここから得られた結果が実用上十分とされる場合も多い。本論文でこの方法を用いるのは、次項で行う最尤推定のための、データのチェック・故障時間分布及びパラメータの概略把握をしておくためである。

既に述べたように、非常用照明器具の故障の主要因はバッテリーの不良と考えられ、また電池等の故障時間分布は正規分布と見なされることから、確率紙

として正規確率紙を用いることが妥当である。しかしながら、本論文では複数の用途及び規模の相違を考慮した解析を行う関係から、故障の要因を蓄電池の不良だけに絞らず、前節に述べた環境係数Kに関する要因を含んだものとして故障率を捉えている。従って、広い範囲で故障時間分布を近似できるワイブル分布は、初期のデータチェックのために有用と考え、本論文ではワイブル確率紙を用いた。ワイブル確率紙の理論と使用法の概要是、巻末（Appendix.A-2）に示した。

確率プロットされる故障時間は、次項の最尤法の場合と同じく、定期検査により最初に発見された故障（図5-2参照）から得られるものである。すなわち第1回目の定期検査で発見された故障は、竣工時点と検査時点の中間点を、それ以外の故障は、検査間の中間点を故障時刻と考えている。

図5-10～図5-14は、物販店舗、旅館・ホテル、病院、事務所、共同住宅の各用途についてのプロット結果を示したものである。事務所と共同住宅はデータ数が多く、図5-13.b～5-13.d、及び図5-14.b～5-14.hに規模別のプロット結果も示した。ただし事務所、共同住宅に関してはプロット点が多いため、プロット結果全体の傾向が変化しないことを確認した上で、図5-13.aは5点間隔、図5-14.aは10点間隔でプロットしてある。また事務所、共同住宅に関しては初回検査で発見された故障を●印、それ以外の検査で発見された故障を○印で表示してある。

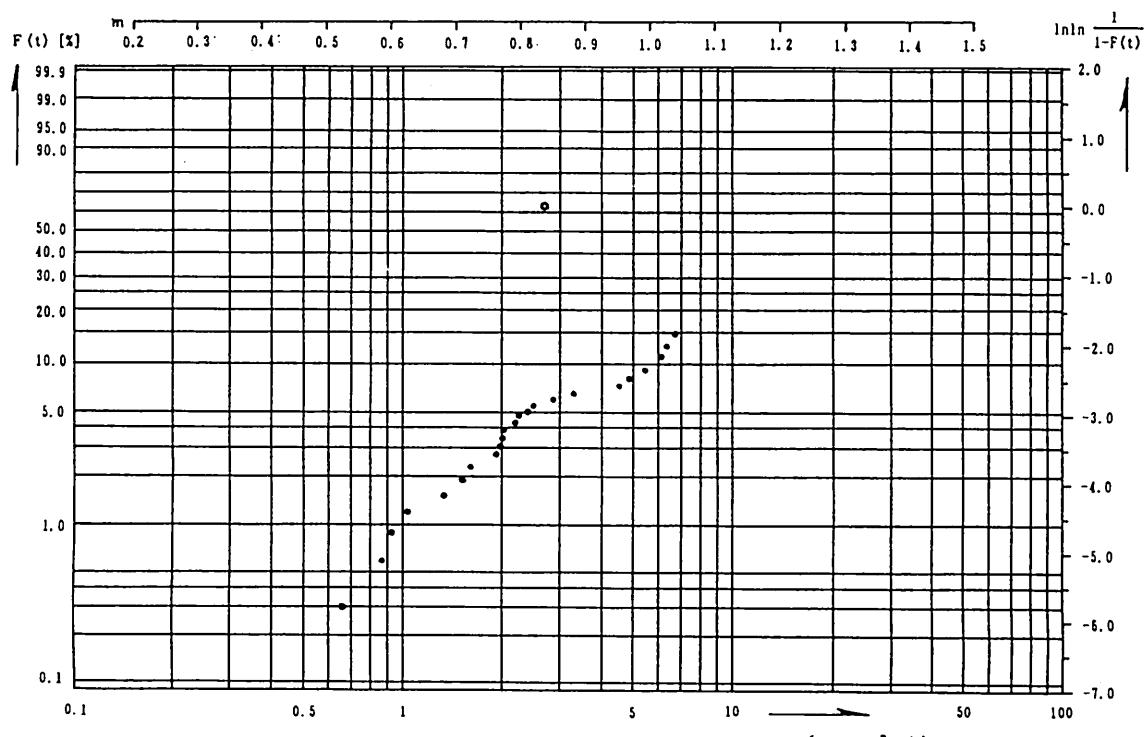


図 5-10. ワイブル確率プロット結果（物販店舗）

$t \times 10^3$ 日)

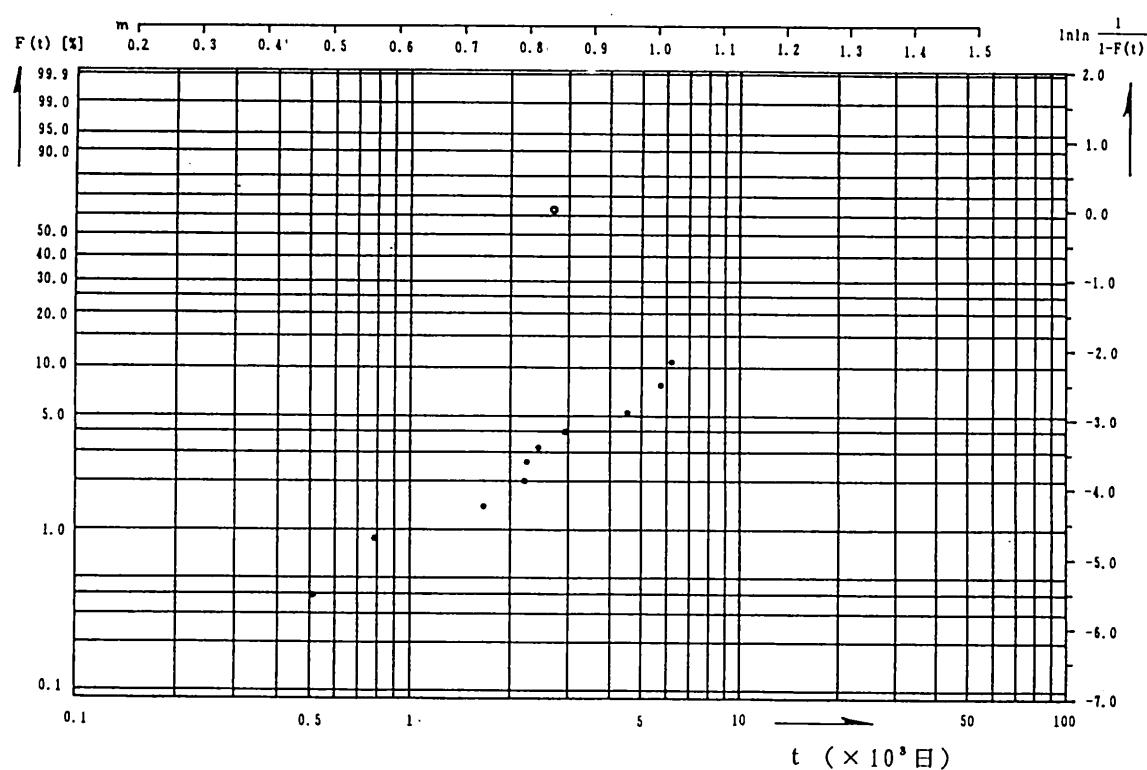


図 5-11. ウイブル確率プロット結果（旅館・ホテル）

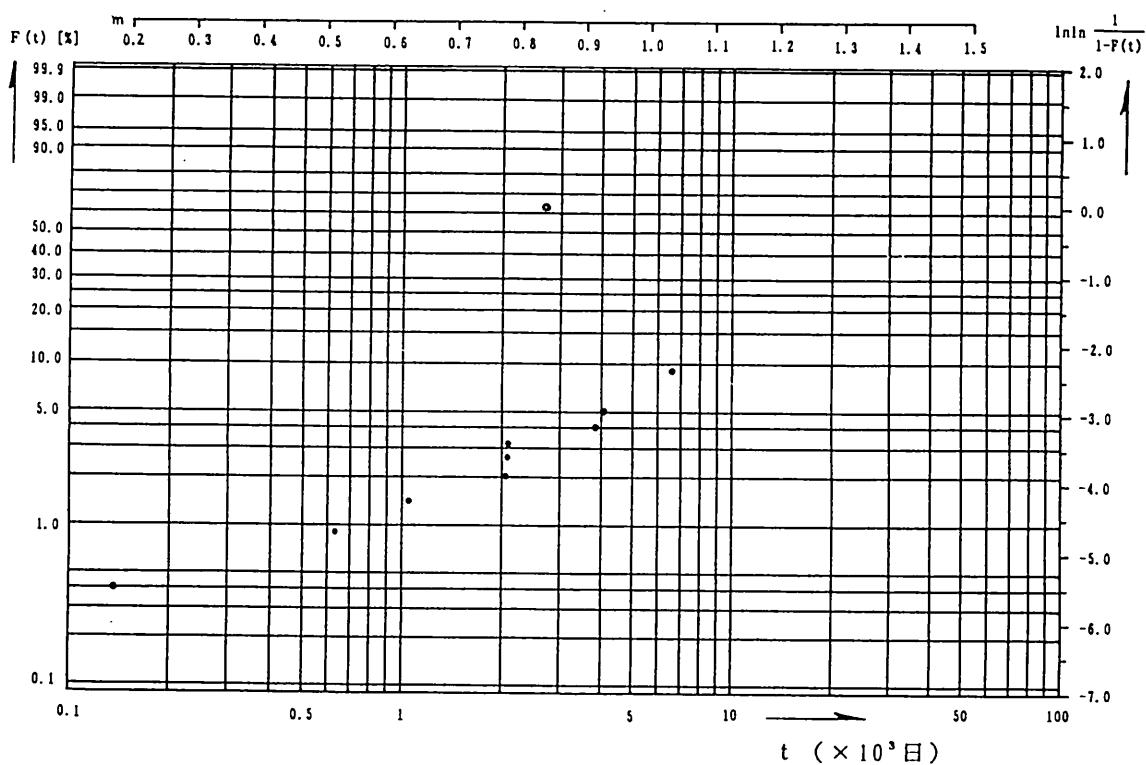


図 5-12. ウイブル確率プロット結果（病院）

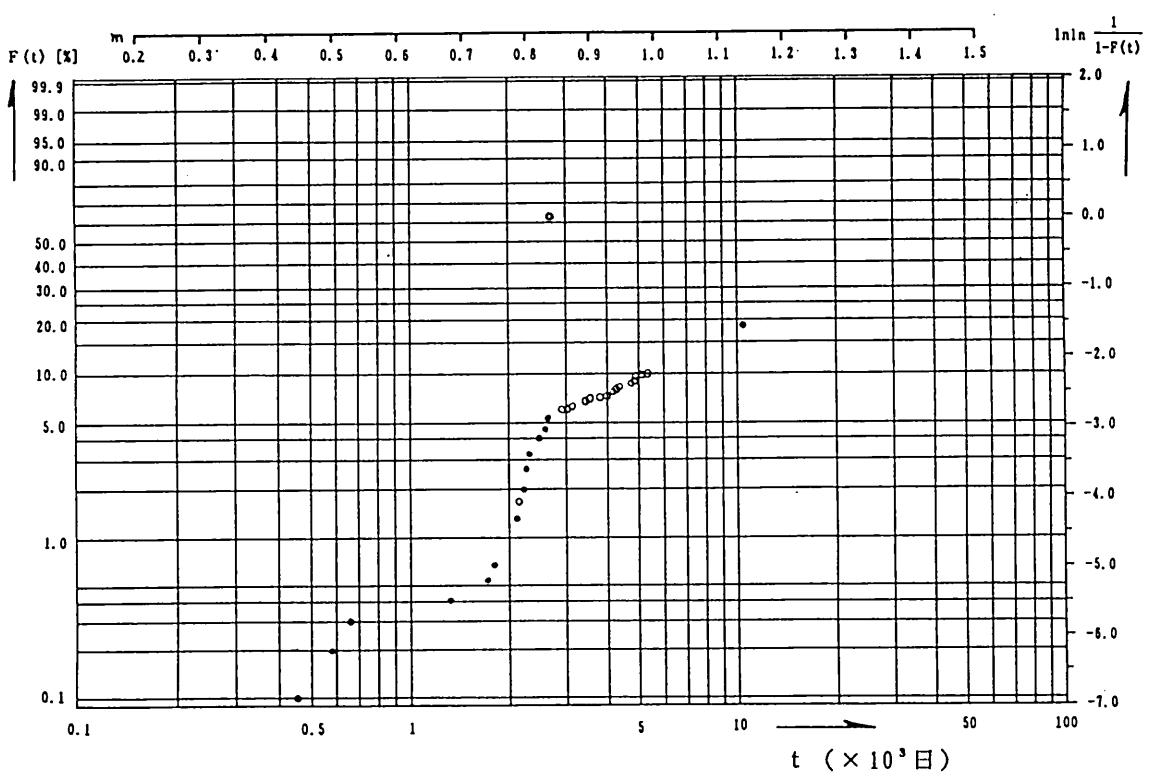


図 5-13.a ワイブル確率プロット結果（事務所全体）

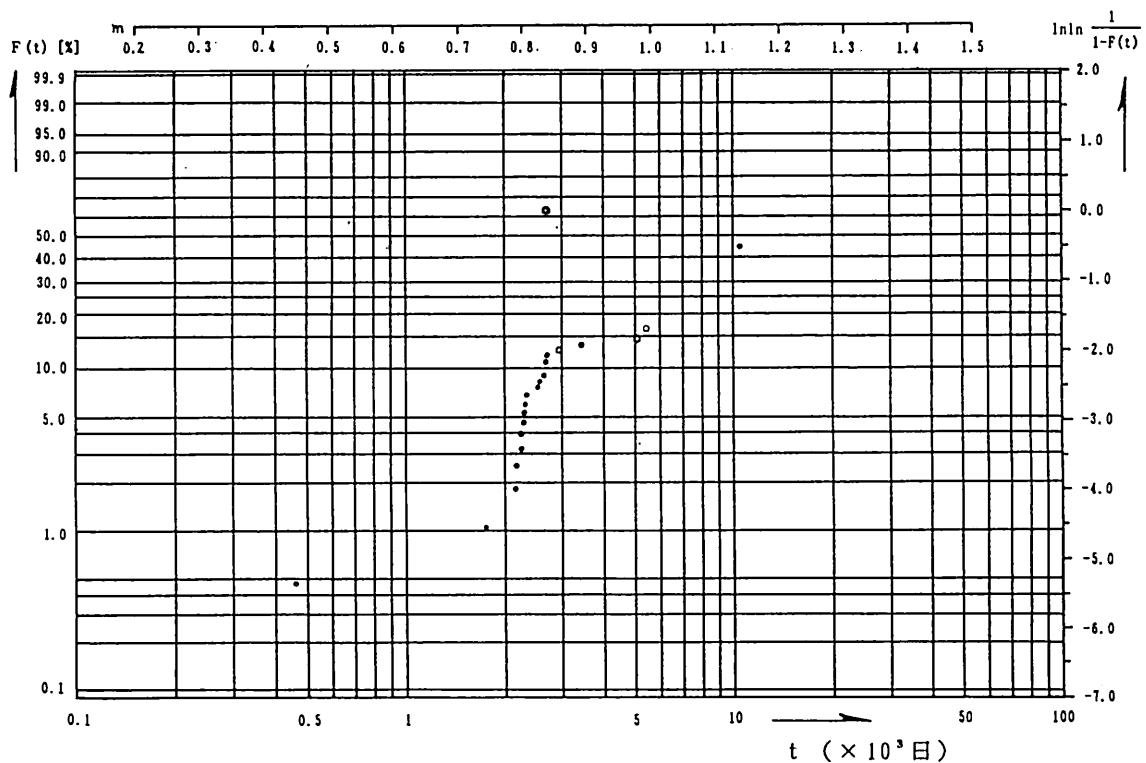


図 5-13.b ワイブル確率プロット結果（事務所 1,001～3,000 m<sup>2</sup>）

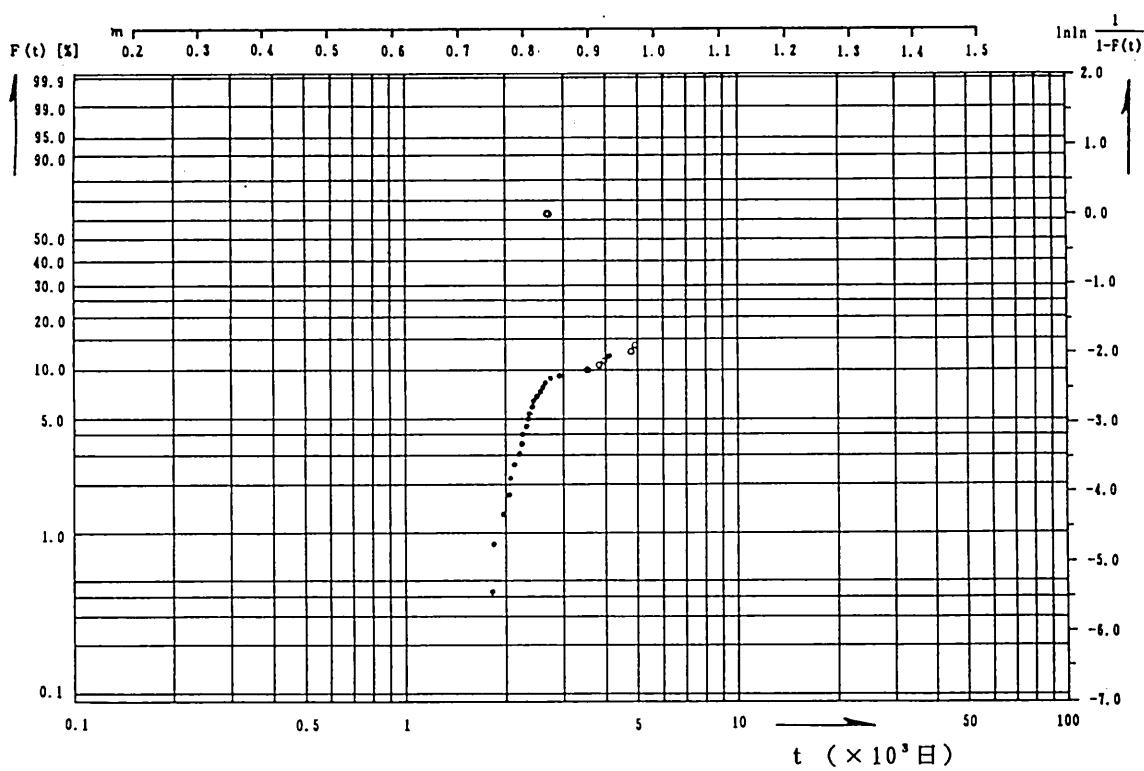


図 5-13.c ワイブル確率プロット結果（事務所 3,001~6,000 m<sup>3</sup>）

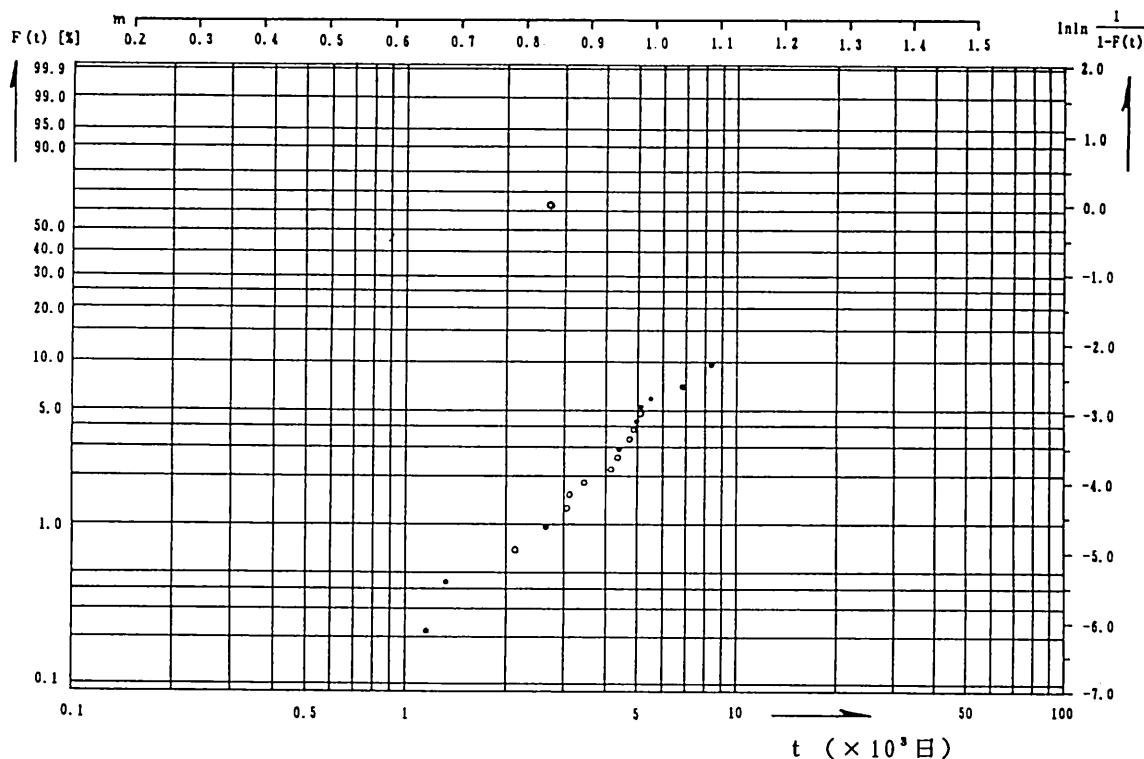


図 5-13.d ワイブル確率プロット結果（事務所 6,001 m<sup>3</sup> ~ ）

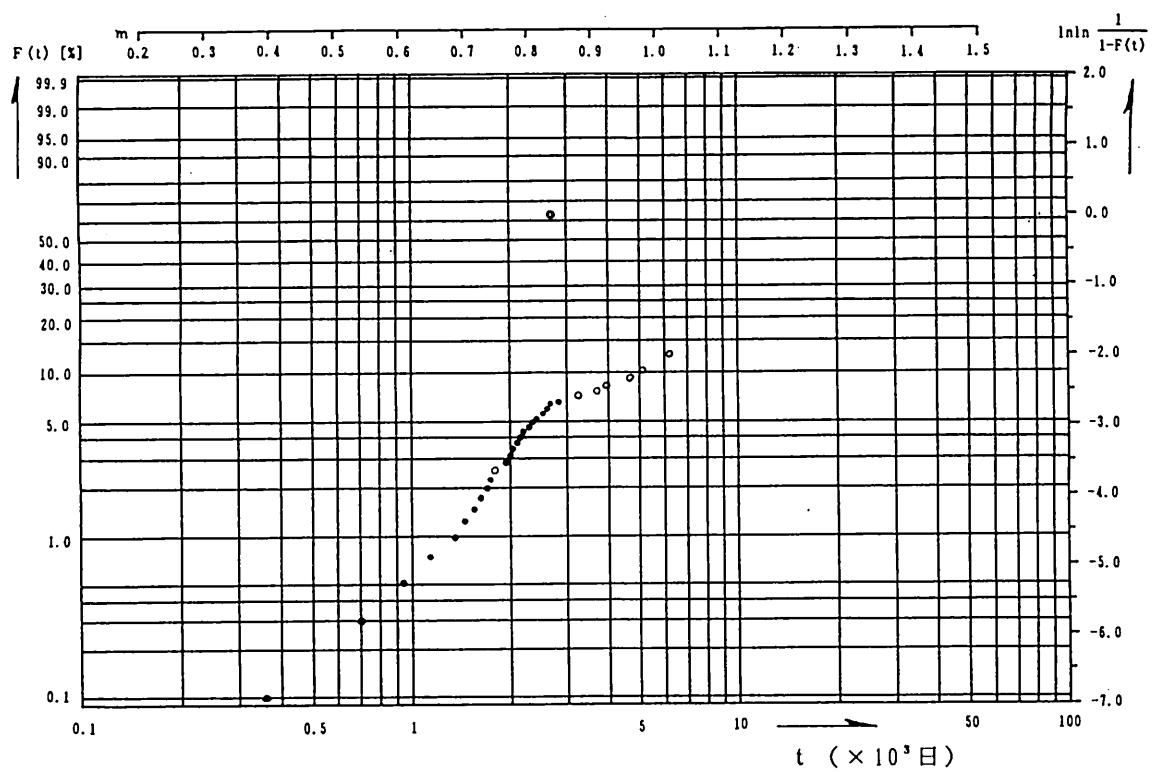


図 5-14.a ウィブル確率プロット結果（共同住宅全体）

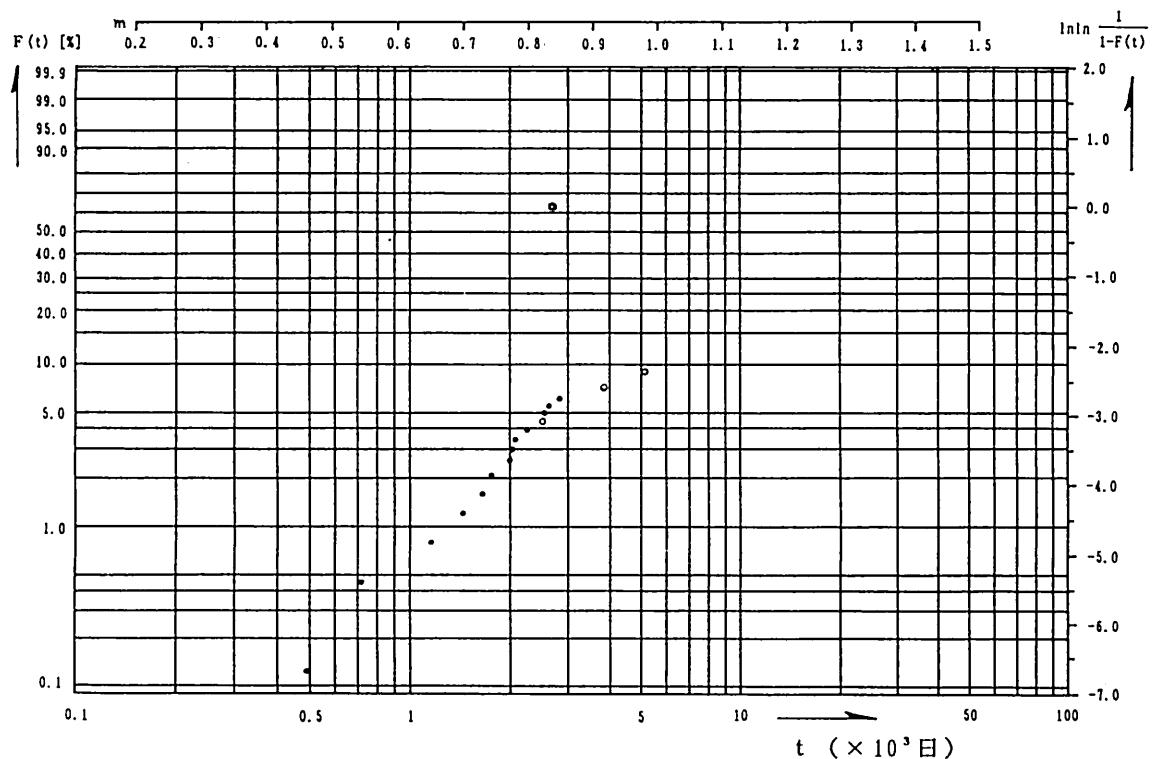


図 5-14.b ウィブル確率プロット結果（共同住宅 ~1,000 m<sup>2</sup>）

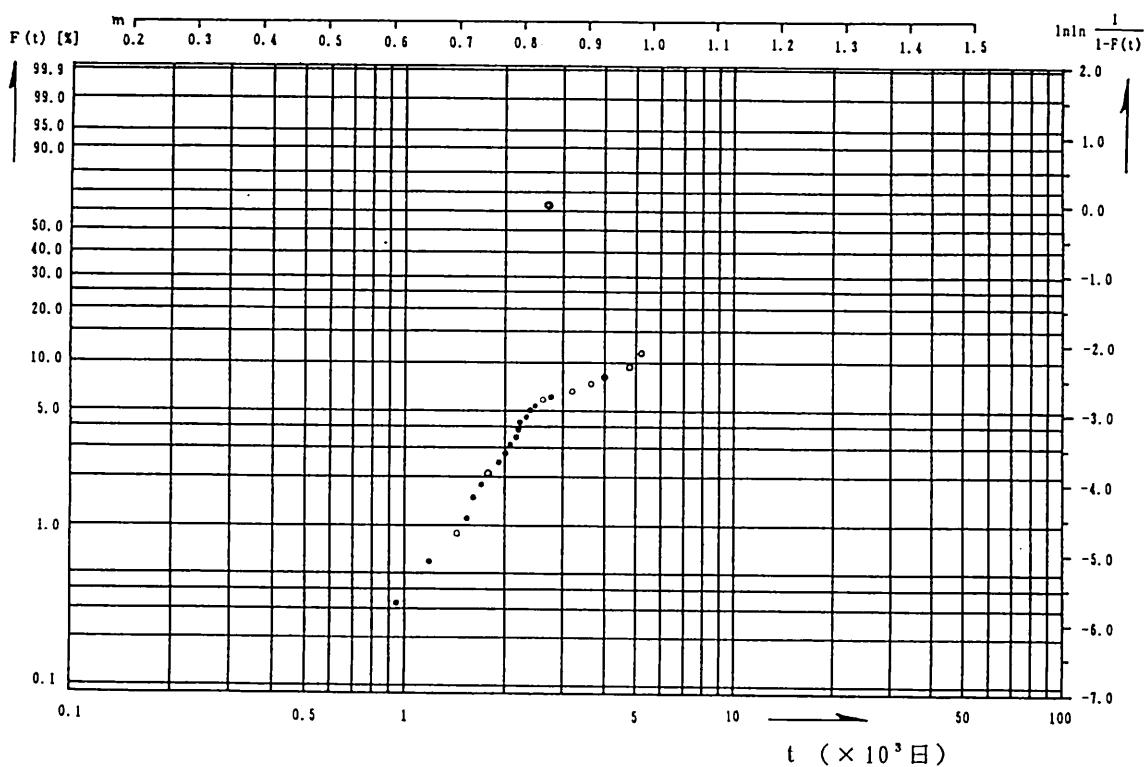


図 5-14.c ワイブル確率プロット結果（共同住宅 1,001～3,000 m<sup>2</sup>）

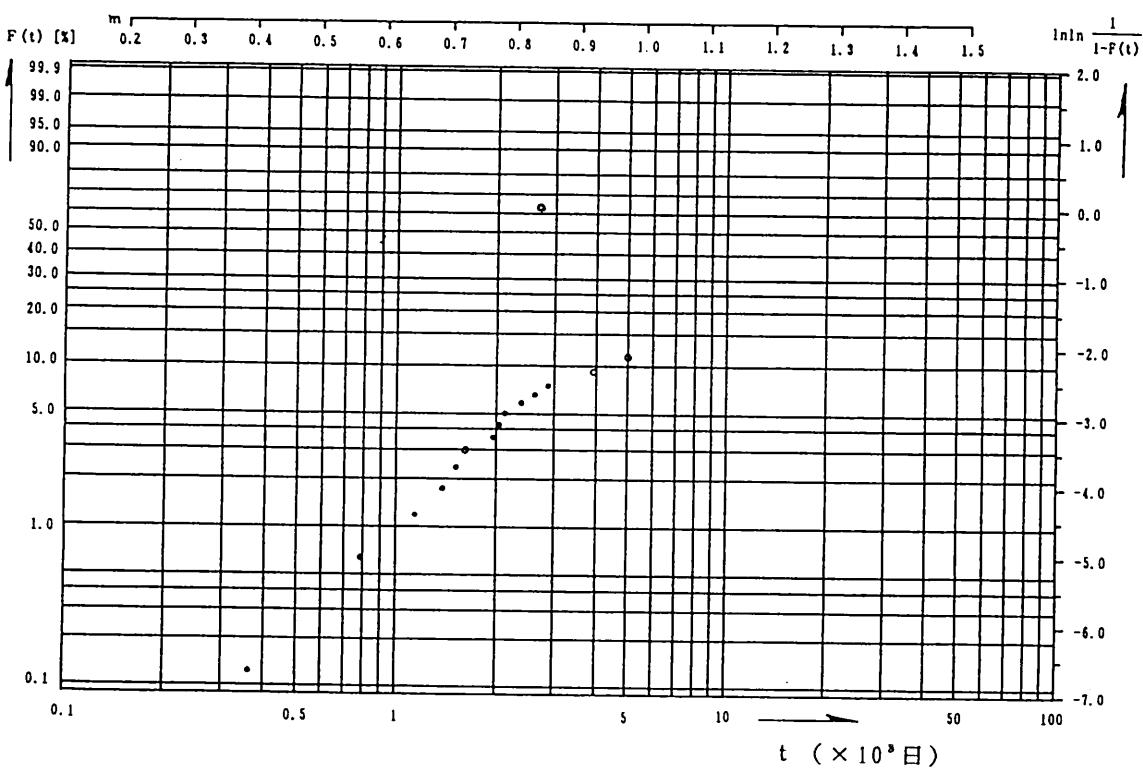


図 5-14.d ワイブル確率プロット結果（共同住宅 3,001～6,000 m<sup>2</sup>）

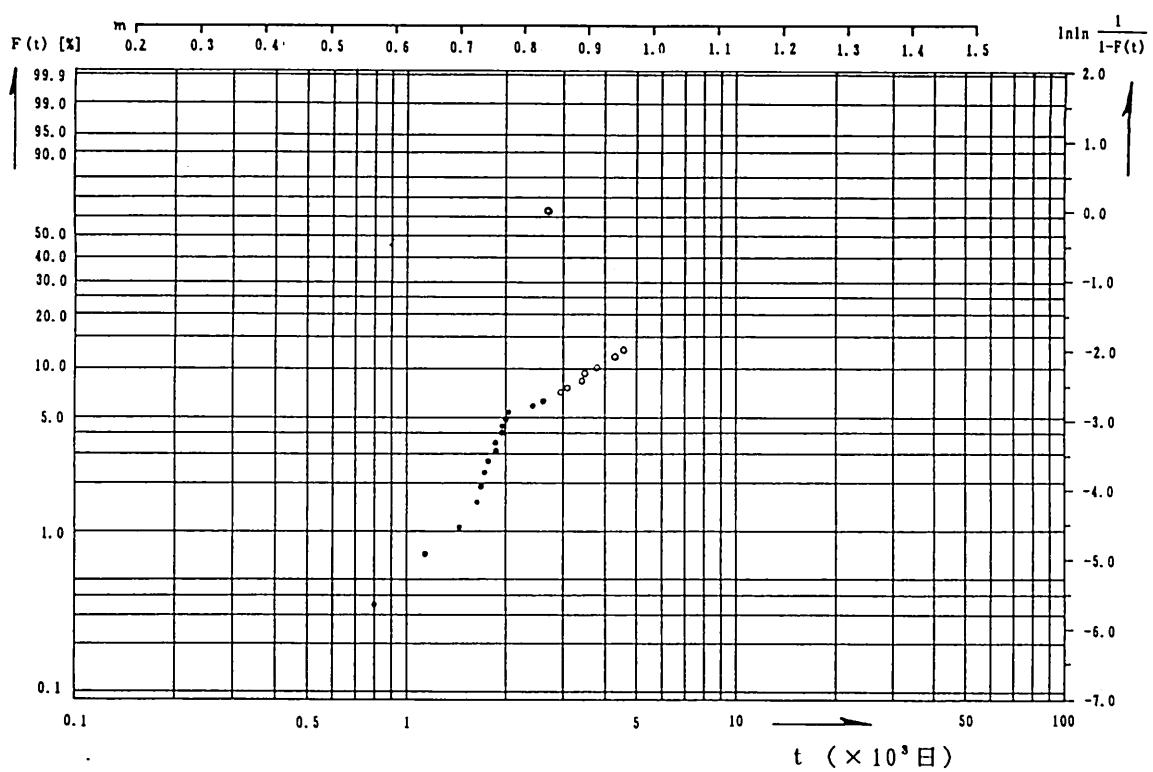


図 5-14.e ワイブル確率プロット結果（共同住宅 6,001~10,000 m<sup>2</sup>）

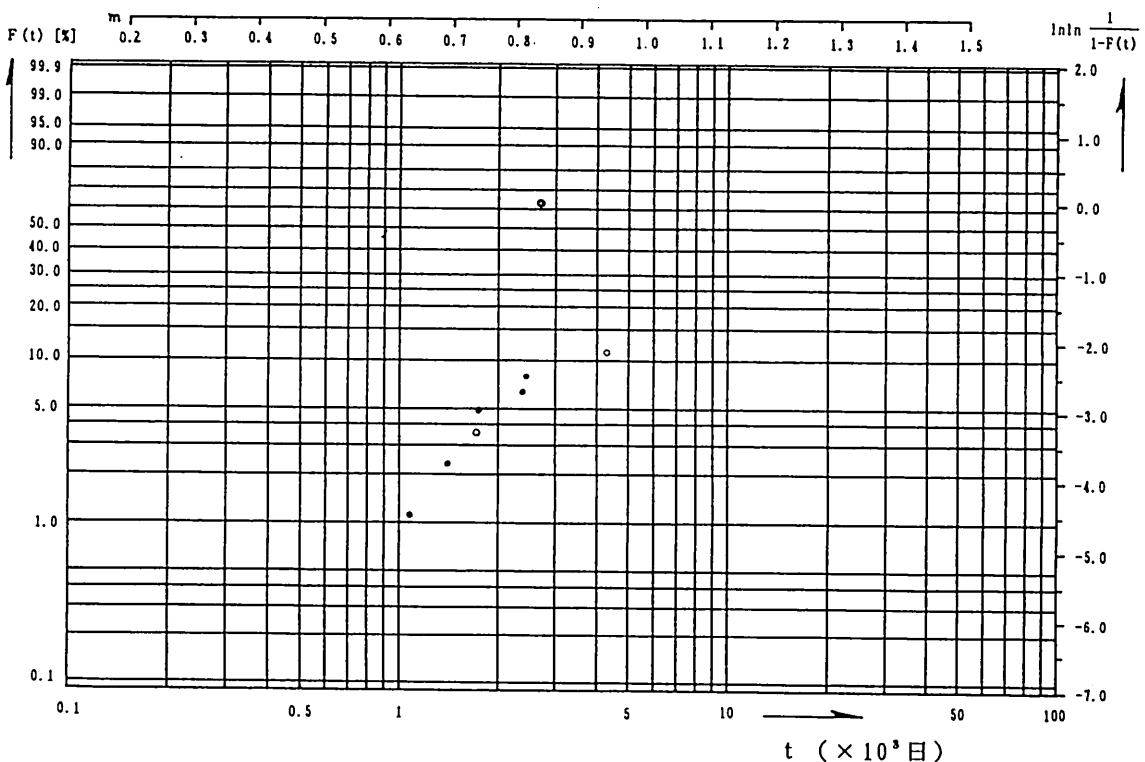


図 5-14.f ワイブル確率プロット結果（共同住宅 10,001~15,000 m<sup>2</sup>）

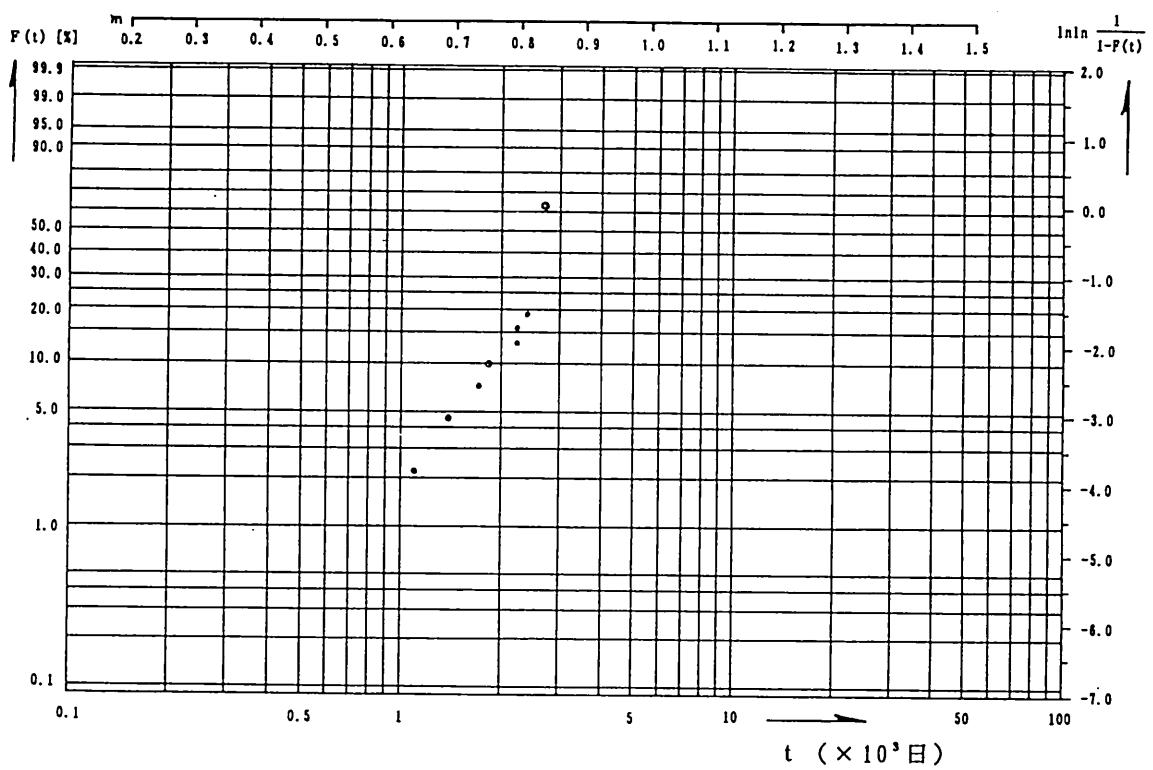


図 5-14.g ワイブル確率プロット結果（共同住宅 15,001～20,000 m<sup>2</sup>）

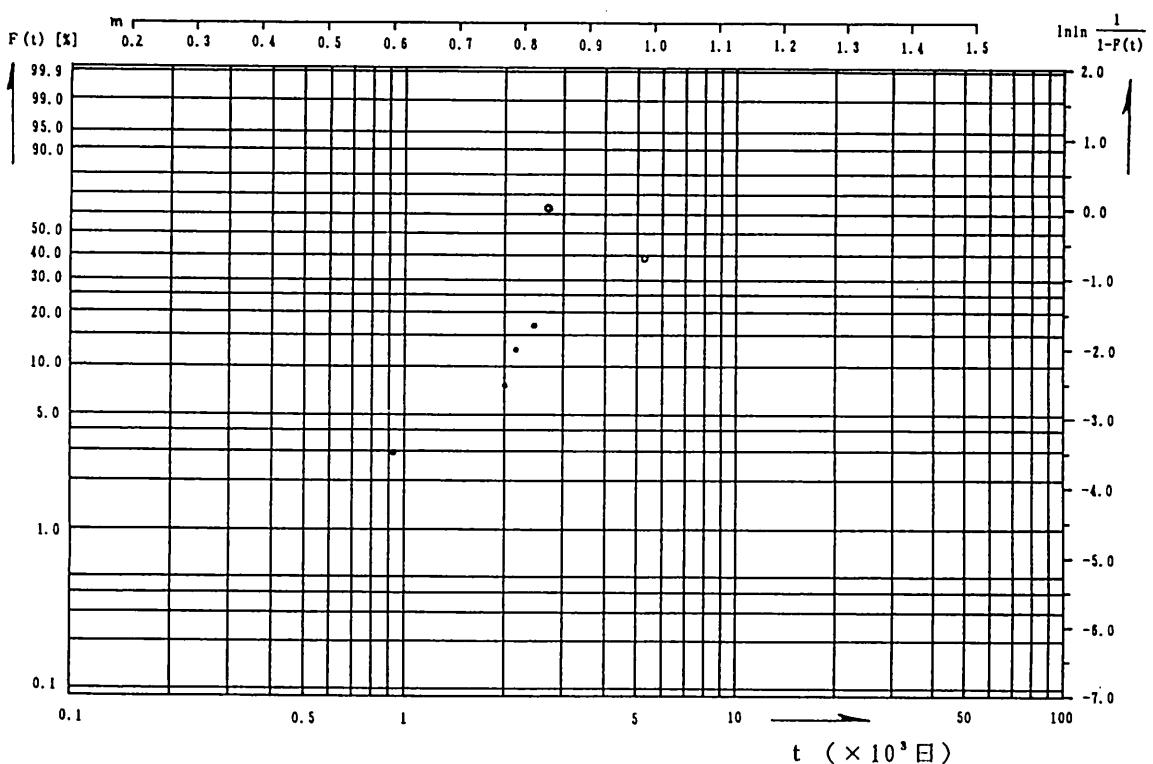


図 5-14.h ワイブル確率プロット結果（共同住宅 20,001 m<sup>2</sup>～）

これらの図から、特に事務所の図5-13.a、5-13.b、及び共同住宅の図5-14.a、5-14.c、5-14.eが、どのような方法でもプロット点を直線で回帰できず、ワイブル分布に従わないことが分かる。その原因は●印でプロットした故障時間分布と、○印でプロットした故障時間分布の異なることと読めるが、故障時刻に関する仮定が適切ではないことを示している。

表5-10は、直線で回帰できた場合に関して、そのパラメータ等を示したものである。表5-10に示される結果のうち、規模別に推定できた共同住宅の形状パラメータmの値から、最尤法において故障率増加型（例えば正規分布）の故障時間分布が仮定できることが示される。

なお表中、 $\gamma$ に値を与えることで直線回帰のできた病院については、 $\gamma$ も示してある。

表 5-10. ワイブル確率プロットによる用途別（一部規模別）推定結果

用 途 (規模 m)	パラメータ m $\eta$		$t_0 = \eta^m$	特 性 値 $\mu$ $\sigma$		10年(365日)後の 瞬間故障率 $\lambda(t)$	$\gamma$
物販店舗	1.70	$17.1 \times 10^3$	$1.57 \times 10^7$	$15.3 \times 10^3$	$9.58 \times 10^3$	$3.37 \times 10^{-6}$ (回/日)	
旅館・ホテル	1.14	$42.0 \times 10^3$	$1.86 \times 10^8$	$40.3 \times 10^3$	$31.5 \times 10^3$	$1.93 \times 10^{-6}$ (回/日)	
病 院	1.05	$68.0 \times 10^3$	$1.19 \times 10^8$	$66.0 \times 10^3$	$62.6 \times 10^3$	$1.33 \times 10^{-6}$ (回/日)	$-0.24 \times 10^3$
事務所 6,001～	1.96	$28.0 \times 10^3$	$5.21 \times 10^8$	$24.8 \times 10^3$	$13.2 \times 10^3$	$9.89 \times 10^{-6}$ (回/日)	
共同住宅 ～ 1,000	2.06	$11.7 \times 10^3$	$2.40 \times 10^8$	$10.4 \times 10^3$	$5.27 \times 10^3$	$5.12 \times 10^{-6}$ (回/日)	
3,001～ 6,000	2.0	$9.6 \times 10^3$	$9.22 \times 10^7$	$8.51 \times 10^3$	$4.42 \times 10^3$	$7.92 \times 10^{-6}$ (回/日)	
10,001～15,000	1.57	$14.0 \times 10^3$	$3.23 \times 10^6$	$12.6 \times 10^3$	$8.19 \times 10^3$	$5.21 \times 10^{-6}$ (回/日)	
15,001～20,000	2.55	$4.5 \times 10^3$	$2.07 \times 10^6$	$4.00 \times 10^3$	$1.67 \times 10^3$	$4.09 \times 10^{-4}$ (回/日)	
20,001～	1.59	$8.4 \times 10^3$	$1.74 \times 10^6$	$7.54 \times 10^3$	$4.87 \times 10^3$	$1.16 \times 10^{-4}$ (回/日)	

### 3.2 最尤法による推定

ここでは、非常用照明器具の故障が主にバッテリーの不良ないしは電球の不良と見なして、故障率增加型の分布である正規分布を仮定し、多重時間打切りを受けたデータに対する最尤法で推定する。多重時間打切りを受けたデータに対する最尤法は、第3章で述べたが再記すると、

故障時間密度関数 :  $f(x_i; \mu, \sigma)$

信頼度関数 :  $R(x_i; \mu, \sigma)$

未知パラメータが  $\mu$ 、 $\sigma$  であるデータに関して

$$L(\mu, \sigma) = \prod_i f(x_i; \mu, \sigma) \cdot \prod_j R(x_j; \mu, \sigma) \quad (5.11)$$

なる尤度関数を定義する。 $f$  は故障ユニットについて、 $R$  は打切りユニットについてのものである。尤度関数或いはその自然対数をとった対数尤度関数を、それぞれのパラメータに関して、

$$\frac{\partial \ln L(\mu, \sigma)}{\partial \mu} = 0 \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial \ln L(\mu, \sigma)}{\partial \sigma} = 0 \quad (5.13)$$

となるような  $\mu$ 、 $\sigma$  のうち  $L(\mu, \sigma)$  を最大にする  $\hat{\mu}$ 、 $\hat{\sigma}$  を最尤推定値とする。通常(5.11)式のような同時非線形方程式は解析的には解けないので数値計算によって解くことになる。その場合(5.12)式、或いは(5.13)式を直接解く方法と、(5.11)式で表される尤度を最大にする点を求める方法がある。本論文では、対数尤度を最大にする点を求める方法によった。

表5-11は、各用途、各延床面積区分における  $\mu$ 、 $\sigma$  の最尤推定値、対数尤度等を示したものである。表中の故障率は、表5-5に示した平均経過年数における瞬間故障率を示したものである。

表 5-11. 最尤法による用途別・規模別推定結果

用途	規 模 (m <sup>2</sup> )	データ数 設置建物 故障建物		$\mu$	$\sigma$	対数尤度	$\lambda(t)$ (経過日数) 回/日
物販店舗	~ 1,000	41	3	10890	4402	-35.4	$2.14 \times 10^{-6}$ (3,300日後)
	1,001~ 3,000	116	8	10412	3991	-94.5	$2.66 \times 10^{-6}$ (3,800日後)
	3,001~ 6,000	55	6	9153	2877	-66.1	$3.50 \times 10^{-6}$ (4,300日後)
	6,001~10,000	32	3	11841	4617	-35.0	$2.78 \times 10^{-6}$ (4,700日後)
	10,001~15,000	27	1※	9188	1585	-10.8	$6.50 \times 10^{-6}$ (4,900日後)
	15,001~20,000	18	1※	13015	5596	-12.5	$1.87 \times 10^{-6}$ (3,700日後)
	20,001~	31	1※	24110	10221	-13.6	$6.50 \times 10^{-6}$ (4,600日後)
旅館・ホテル	~ 1,000	75	1※	7145	541	-9.5	$5.35 \times 10^{-10}$ (3,100日後)
	1,001~ 3,000	72	6	13449	6085	-71.8	$1.92 \times 10^{-6}$ (3,700日後)
	3,001~ 6,000	36	2	16722	7861	-25.7	$1.48 \times 10^{-6}$ (4,100日後)
	6,001~10,000	15	0	—	—	—	(一日後)
	10,001~15,000	7	1※	12962	7152	-12.0	$3.27 \times 10^{-6}$ (4,700日後)
	15,001~20,000	5	0	—	—	—	(一日後)
	20,001~	24	0	—	—	—	(一日後)
病院	~ 1,000	20	1※	10627	3389	-11.9	$2.01 \times 10^{-6}$ (4,200日後)
	1,001~ 3,000	89	4	9999	3115	-47.0	$1.81 \times 10^{-6}$ (3,800日後)
	3,001~ 6,000	60	2	15933	6463	-26.3	$1.06 \times 10^{-6}$ (3,700日後)
	6,001~10,000	32	1※	34759	15758	-14.0	$3.97 \times 10^{-6}$ (4,200日後)
	10,001~15,000	8	0	—	—	—	(一日後)
	15,001~20,000	6	1※	8694	1932	-9.9	$3.78 \times 10^{-6}$ (5,100日後)
	20,001~	12	0	—	—	—	(一日後)
事務所	~ 1,000	—	—	—	—	—	(一日後)
	1,001~ 3,000	215	21	10764	4196	-235.8	$2.42 \times 10^{-6}$ (3,700日後)
	3,001~ 6,000	332	26	10501	3786	-295.7	$2.29 \times 10^{-6}$ (3,800日後)
	6,001~10,000	217	14	14315	5785	-172.5	$1.77 \times 10^{-6}$ (4,600日後)
	10,001~15,000	123	2	15174	4027	-25.1	$4.10 \times 10^{-6}$ (5,000日後)
	15,001~20,000	48	1※	12835	3411	-12.3	$5.95 \times 10^{-6}$ (4,500日後)
	20,001~	93	1※	16556	4414	-12.7	$1.91 \times 10^{-6}$ (4,300日後)
共同住宅	~ 1,000	1618	80	9667	3511	-938.1	$1.93 \times 10^{-6}$ (3,000日後)
	1,001~ 3,000	2168	120	9207	3244	-1382.2	$2.15 \times 10^{-6}$ (3,100日後)
	3,001~ 6,000	799	56	8494	2980	-634.3	$2.87 \times 10^{-6}$ (3,200日後)
	6,001~10,000	291	22	7762	2526	-245.0	$3.71 \times 10^{-6}$ (3,400日後)
	10,001~15,000	92	7	7973	2712	-78.9	$3.72 \times 10^{-6}$ (3,400日後)
	15,001~20,000	46	7	5329	1599	-70.2	$1.03 \times 10^{-4}$ (3,100日後)
	20,001~	35	5	5271	1425	-47.9	$5.70 \times 10^{-6}$ (2,700日後)

※ 推定パラメータが2個に対して故障数が1のため推定精度が確保されない

### 3.3 故障率の近似推定

故障率の推定に関して前項までとってきた方法の根底には、機器、設備の設置時点或いは動作開始時点からの全時間にわたる時間的特性を明らかにしようとする意図がある。本論文の考察の目的は、機器の履歴等が不明瞭であったり、定期検査開始前後で故障時間・保全のあり方が変化したと見なされるような多数の機器の、建築物の用途、規模毎の故障率の現状についてである。そのためには、建築物竣工から最後の検査までの時間に対して、比較的短期間となる最新の1年間の発生故障に関する情報が有用である。

本論文では、上述したような不完全なデータを利用する場合に、故障率の現状を明らかにする方法として、以下のような推定法による考察を加える。

推定における条件は、本論文中で述べてきたように、

- ・各建築物での最近1年間の故障記録は完全に得られている
- ・故障時刻は不明である
- ・1棟の建築物で抜取り検査される器具の数は明かであるが、どの器具が故障したかは不明である

これらの条件を考慮すると、米陸軍の物資調達に関する検査方法 H 1 0 8<sup>31)</sup>、或いは M I L - S - 19500 C<sup>31)</sup>として知られる、指數型定時打切り取替無し計数1回抜取り検査法を適用することが妥当と考えられる。この検査法は本来、採用物資を決定するための検査方法として提案されたものであるが、抜取りした一定数の機器について故障時間分布を指數分布と仮定し、故障しても取り替えることなく一定時間動作させ、その発生故障数から故障率を推定し、機器の採否を決定するものである。

本論文で使用する故障データでは、抜取り器具のどれが故障したか不明であるという特徴があり、そのような条件の下での数学的取扱いは以下のようになる。

1棟の建築物に設置された  $M$  個の非常用照明器具のうち  $N$  個 ( $\leq M$ ) が抜取検査され、そのうち1個でも点灯しないか或いは点灯し続けないことを故障として、故障があれば要改善と記録される。このような場合に要改善となる確率を考える。ただし、各器具の故障時間分布は故障率  $\lambda$  (= const.) の指數分布で、

全ての器具が独立で同一の故障時間分布に従うとする。また稼動開始から検査までの期間を  $T$  時間とする。

器具の故障時間分布が指数分布の時その密度関数は、

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x) \quad (5.14)$$

稼動開始から  $T$  時間後まで無故障である確率、 $T$  時間後までに故障する確率は、それぞれ信頼度  $R(T)$ 、不信頼度  $F(T)$  で与えられ、

$$\begin{aligned} R(T) &= \int_T^\infty f(x) dx = \exp(-\lambda T) \\ F(T) &= \int_0^T f(x) dx = 1 - \exp(-\lambda T) \end{aligned} \quad (5.15)$$

となる。検査では故障しているか否かだけが問題となるのであるから、 $M$  個のうち  $i$  個の器具が故障する確率は、二項分布に従うものとして、故障器具数を表す確率変数を  $X_1$  とすると、

$$Pr\{X_1=i\} = {}_M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} \quad (5.16)$$

と表される。

さて、2種の事象要素（例えば「正常」と「故障」）からなる有限な母集団からのサンプルを分析する場合、よく知られているように多くの標本抽出計画の基礎分布をなす超幾何分布がある。これによると、 $M$  個の器具のうち  $i$  個が故障しており、この  $M$  個から  $N$  個を無作為に抽出した場合の故障器具数を表す確率変数を  $X_2$  とすると、抽出した  $N$  個のサンプルに  $x$  個の故障器具が含まれる確率は、

$$Pr\{X_2=x | X_1=i\} = \frac{{}_i C_x \cdot {}_{M-i} C_{N-x}}{{}_M C_N} \quad (5.17)$$

として表される。従って、抜取検査で故障器具が含まれる確率は、

$$Pr\{X_2 \geq 1 | X_1=i\} = \sum_{x=1}^N \frac{{}_i C_x \cdot {}_{M-i} C_{N-x}}{{}_M C_N} \quad (5.18)$$

となる。これは抜取された  $N$  個に故障器具が無いという事象の背反であり、

$$\begin{aligned} Pr\{X_2 \geq 1 | X_1=i\} &= 1 - Pr\{X_2=0 | X_1=i\} \\ &= 1 - \frac{{}_{M-i} C_N}{{}_M C_N} \end{aligned} \quad (5.19)$$

ところが  $i > (M-N)$  の時には、抽出された  $N$  個のサンプルに確率 1 で故障器具が含まれる。即ち(5.19)式が適用できなくなる。従って、抜取検査で要改善と記録される確率は、(5.16)式と(5.19)式の積、及び  $i > (M-N)$  の場合との和によって、

$$Pr\{X_2 \geq 1\}$$

$$= \sum_{i=1}^{M-N} \left(1 - \frac{M-i}{M} C_N\right) M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} + \sum_{i=M-N+1}^M M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} \quad (5.20)$$

となる。しかし、器具の全数  $M$  が未知の場合、(5.20)では算定できない。そこで(5.20)式を変形すると、

$$Pr\{X_2 \geq 1\}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^{M-N} M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} - \sum_{i=1}^{M-N} \frac{M-i}{M} C_N M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} \\ &\quad + \sum_{i=M-N+1}^M M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} \\ &= \sum_{i=0}^M M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} - \{R(T)\}^M \\ &\quad - \left[ \sum_{i=0}^{M-N} \frac{M-i}{M} C_N M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} - \{R(T)\}^M \right] \\ &= \sum_{i=0}^M M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-i} - \{R(T)\}^M \sum_{i=0}^{M-N} M C_i \{F(T)\}^i \{R(T)\}^{M-N-i} \end{aligned} \quad (5.21)$$

上式の第 1 項、及び第 2 項における総和式は、 $\{F(T)+R(T)\}^k=1$ （ただし  $k=M, M-N$ ）の展開式であるので、

$$Pr\{X_2 \geq 1\} = 1 - \{R(T)\}^N \quad (5.22)$$

となる。(5.22)式に(5.15)式を代入すると、(5.20)式は

$$Pr\{X_2 \geq 1\} = 1 - \{exp(-\lambda T)\}^N \quad (5.23)$$

となり、器具の全数  $M$  にかかわらず、抜取数  $N$  が既知であれば  $Pr\{X_2 \geq 1\}$  を算定することができる。

要改善が記録される確率の、1年間における累積確率は、

$$\text{累積故障確率(1年間)} = \frac{\text{要改善建物数}}{\text{設備設置建物数}} \quad (5.24)$$

と表される。これを  $p$  とすると、(5.23)式から

$$p = 1 - \{exp(-\lambda T)\}^N \quad (5.25)$$

となり、 $\lambda$ について解くと、

$$\lambda = -\frac{\ln(1-p)}{NT} \quad (5.26)$$

となる。

ここで、面積区分  $15,001 \sim 20,000 \text{ m}^2$  での抜取個数である  $N = 30$ 、 $T = 365$  (日) を代入すると、例えば  $15,001 \sim 20,000 \text{ m}^2$  の「病院」に設置された器具の故障率は、

$$\lambda \approx \frac{\ln(1-0.122)}{30 \times 365} \approx 1.2 \times 10^{-5} \text{ (回/日)} \quad (5.27)$$

となる。

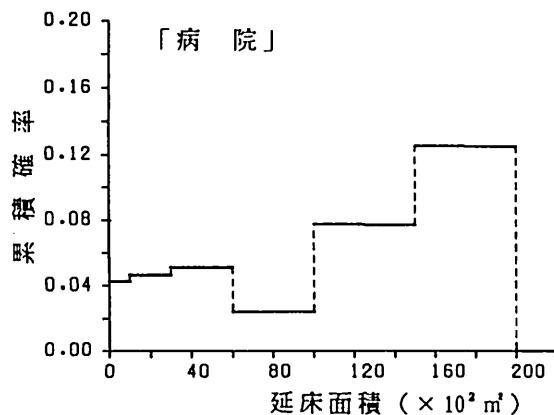
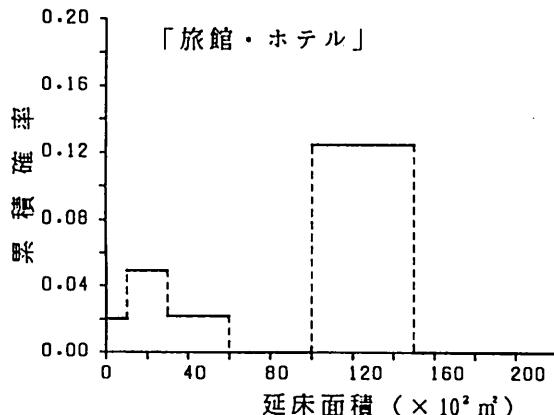
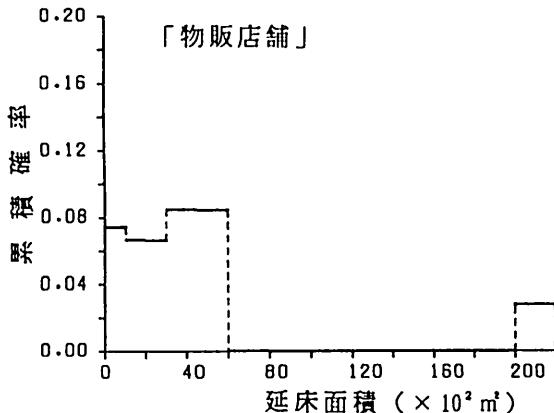


図 5-15 は、最近 1 年間における累積故障確率を建築物用途、規模に対して示したものである。表 5-12 は、図 5-15 から得られる累積故障確率を、前項に示した近似推定法に適用し、推定した故障率を示したものである。

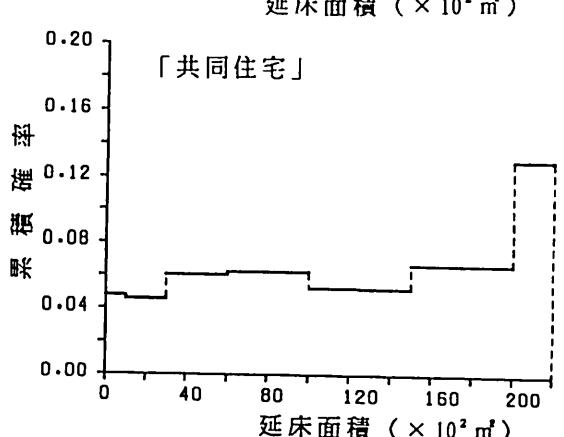
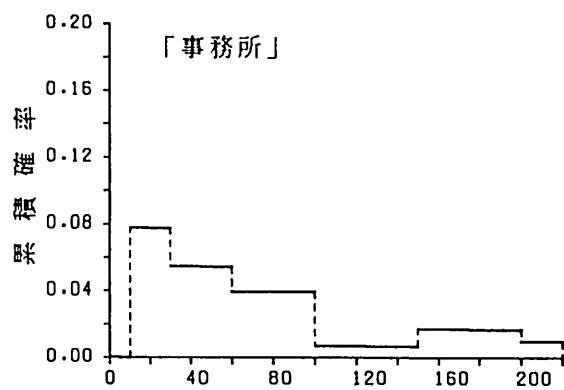


図 5-15. 要改善累積確率

表 5-12. 近似推定法による用途別・規模別故障率(回／日)

規模 用途	$n^f$ ～1,000	1,001 ～3,000	3,001 ～6,000	6,001 ～10,000	10,001 ～15,000	15,001 ～20,000	20,001～
物販店舗	$4.22 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-6}$	$1.61 \times 10^{-6}$				$2.21 \times 10^{-6}$
旅館・ホテル	$1.12 \times 10^{-6}$	$1.39 \times 10^{-6}$	$4.10 \times 10^{-6}$				
病院	$2.38 \times 10^{-6}$	$1.31 \times 10^{-6}$	$9.62 \times 10^{-6}$	$3.38 \times 10^{-6}$	$8.77 \times 10^{-6}$	$1.22 \times 10^{-6}$	
事務所	—	$2.21 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-6}$	$5.50 \times 10^{-6}$	$7.48 \times 10^{-7}$	$1.56 \times 10^{-6}$	$7.79 \times 10^{-7}$
共同住宅	$2.70 \times 10^{-6}$	$1.29 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-6}$	$8.76 \times 10^{-6}$	$5.87 \times 10^{-6}$	$6.30 \times 10^{-6}$	$1.07 \times 10^{-6}$

表中空白部分は故障のなかったものを示す

#### § 4. 推定結果の考察

本章では、3種類の推定法により非常用照明器具の故障率を推定したが、ワイブル確率プロット法、最尤法による推定結果は、近似推定法による結果と次の点で意味が異なっている。すなわち、近似推定法が非常用照明器具1個当たりの故障率を推定しているのに対して、ワイブル確率プロット法、最尤法は建築物の単位で推定している。定期検査では、抜取り検査された器具のうち1つでも故障していれば要改善と評定され、その結果、要改善とされた建築物に設置された非常用照明器具は、すべて故障していると扱われることになる。このことから、1棟の建築物で抜取り検査された器具は、それぞれの器具を独立のユニットとした場合、どのユニットの故障もシステムの故障となる直列システムを構成しているとみなされ、定期検査はこのシステムに対して行われることになる。ワイブル確率プロット法、最尤法で推定されているものは、このシステムの故障率である。

直列システムの故障率について、システムがn個のユニットで構成されているとき、システムの信頼度は、

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (5.28)$$

と表され、信頼度と故障率の関係を示した(5.8)式より、

$$R_i(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda_i(x) dx \right\} \quad (5.29)$$

従って、システムの故障率は、

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (5.30)$$

と表される。ワイブル確率プロット法、最尤法による推定結果は、(5.30)式の  $\lambda_s(t)$  である。本章の解析において、各器具の故障時間は独立で同一の分布に従うことを仮定していたから、器具の故障率は、抜取り器具数を  $n$  として、

$$\lambda_i(t) = \frac{\lambda_s(t)}{n} \quad (5.31)$$

と表される。ただし、プロット法による解析には 2 個以上の故障が必要であり、本論文で対象とした建築物用途においては、延床面積別の発生故障数が 1 個である場合が多いことから、器具の故障率をプロット法では算定していない。

表 5-13 は、最尤法による結果を、(5.31)式によって器具当たりの故障率に換算したものと、近似推定法による推定故障率をまとめて示したものである。

最尤法による推定結果を示した表 5-11において、 $\mu$  及び  $\sigma$  が推定されたパラメータである。 $\mu$  は動作開始から故障までの平均時間を示し、 $\sigma$  は  $\mu$  の標準偏差である。 $\mu > 3\sigma$  なる場合には、故障時間分布に正規分布が仮定できる<sup>1)</sup>とされているが、表 5-11 に示した建築物用途・延床面積別の  $\mu$ 、 $\sigma$  は、非常用照明器具の故障時間分布に正規分布を仮定できることを示しているとともに、平均故障時間を表す  $\mu$  が、延床面積 20,001m<sup>2</sup> 以上の共同住宅で 5,271(日)、延床面積 3,001～6,000m<sup>2</sup> の旅館・ホテルで 16,722(日) のように大きく異なっていることが分かる。さらに、最尤法と近似推定法により推定された故障率の比較から、

表 5-13. 最尤法と近似法による故障率の比較(回/日)

規 模		$m^2$	1,001 ～3,000	3,001 ～6,000	6,001 ～10,000	10,001 ～15,000	15,001 ～20,000	20,001～
物販店舗	最尤法	$9.68 \times 10^{-6}$	$5.19 \times 10^{-6}$	$4.52 \times 10^{-6}$	$2.15 \times 10^{-6}$			
	近似法	$4.22 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-6}$	$1.61 \times 10^{-6}$				$2.21 \times 10^{-6}$
旅館・ホテル	最尤法		$3.33 \times 10^{-6}$	$1.72 \times 10^{-6}$				
	近似法	$1.12 \times 10^{-6}$	$1.39 \times 10^{-6}$	$4.10 \times 10^{-6}$				
病院	最尤法		$7.59 \times 10^{-6}$	$2.35 \times 10^{-6}$				
	近似法	$2.38 \times 10^{-6}$	$1.31 \times 10^{-6}$	$9.62 \times 10^{-6}$	$3.38 \times 10^{-6}$	$8.77 \times 10^{-6}$	$1.22 \times 10^{-6}$	
事務所	最尤法	—	$5.00 \times 10^{-6}$	$3.82 \times 10^{-6}$	$1.81 \times 10^{-6}$	$2.83 \times 10^{-6}$		
	近似法	—	$2.21 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-6}$	$5.50 \times 10^{-6}$	$7.48 \times 10^{-7}$	$1.56 \times 10^{-6}$	$7.79 \times 10^{-7}$
共同住宅	最尤法	$1.30 \times 10^{-4}$	$7.00 \times 10^{-5}$	$4.87 \times 10^{-5}$	$4.23 \times 10^{-5}$	$3.10 \times 10^{-5}$	$3.87 \times 10^{-5}$	$4.40 \times 10^{-5}$
	近似法	$2.70 \times 10^{-5}$	$1.29 \times 10^{-5}$	$1.14 \times 10^{-5}$	$8.76 \times 10^{-6}$	$5.87 \times 10^{-6}$	$6.30 \times 10^{-6}$	$1.07 \times 10^{-5}$

表中空白部分は故障がなかったもの、或いは推定できなかったものを示す

延床面積3,001～6,000m<sup>2</sup>の旅館・ホテルにおいて示される故障率に対して、延床面積1,000m<sup>2</sup>以下の共同住宅において示される故障率が、最尤法による場合は約8倍異なり、近似推定法による場合は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 回／日と、最尤法による場合より大きな拡がりをもつことが分かる。このことから、同一種類の設備であっても、用途・規模によって故障のし易さが大きく異なることが予想される。

一方、最尤法と近似推定法による推定故障率を比較すると、最尤法による推定故障率は建築物用途・延床面積によらず $10^{-6}$ 回／日と安定しているのに対して、近似推定法による推定故障率は建築物用途・延床面積毎に非常に大きな相違を示し、故障率の推定目的に応じた推定法の選択が重要であることが分かる。最尤法は、動作開始からの全時間にわたる故障の時間的特性を明らかにした上で故障率を推定しようとするものであり、近似推定法は、動作開始以降の故障・保全履歴が不明である場合の、任意の時刻における瞬間故障率の近似値を推定しようとするものである。表5-13に示される結果は、非常用照明器具の時間に対する故障率の変化が、建築物用途・延床面積によらず平均的には同一とみなせることが、最尤法による推定故障率から示され、短期間における故障率の変化が、建築物用途・延床面積毎に大きく異なることが、近似推定法による推定故障率から示されていると解釈できる。

本論文で防災設備の故障率を推定する目的は、防災設備の故障の発生し易さの現状を把握することである。推定された故障率に対する上述の解釈が妥当ならば、機器の故障特性、保全の程度等が推定故障率に明確に表出すると考えられる近似推定法がよりよくこの目的に合致すると判断され、特に、本論文で用いたデータは、定期検査の開始によって、時間に対する故障傾向が変化したとみなされるため、最尤法による推定は、故障率の現状を正確に表現しないと考えられる。従って、以下の考察では、近似推定法による推定故障率を採用する。

表5-13に示した推定故障率と対比する、フィールドデータに基づく故障率の例として、表5-14に、第3章で推定された煙感知器運動防火扉の各ユニットの故障率、松浦等<sup>32)</sup>によるいくつかの空調機器部品の故障率を示し、表5-15に、Donald R. Earlesが計算機、地上装置、船舶、航空機、ミサイル等の使用部品約500種のデータを収集・整理して推定した故障率の一覧<sup>31)</sup>の一部を示した。

表5-13に示した近似推定法による推定故障率と、表5-14に示した煙感知器連

表 5-14. 各種機器・ユニットの故障率(回/日換算)

表 5-15. Earlesによる故障率一覧

機器・ユニット	故障率	データ種別
遠心冷凍機	$7.51 \times 10^{-3}$	フィールドデータ*
	$6.94 \times 10^{-3} \sim 8.90 \times 10^{-3}$	フィールドデータ**
	$1.61 \times 10^{-3}$	メーカーデータ***
パッケージ	$1.92 \times 10^{-3}$	フィールドデータ*
	$6.72 \times 10^{-4} \sim 2.86 \times 10^{-3}$	フィールドデータ**
	$7.92 \times 10^{-4} \sim 1.13 \times 10^{-3}$	メーカーデータ***
冷却塔	$1.34 \times 10^{-3}$	フィールドデータ*
	$1.51 \times 10^{-3} \sim 4.32 \times 10^{-3}$	メーカーデータ***
ボイラ (鉄製)	$5.30 \times 10^{-3}$	フィールドデータ*
	$3.39 \times 10^{-3}$ 以上	フィールドデータ**
	$3.36 \times 10^{-3} \sim 1.54 \times 10^{-2}$	メーカーデータ***
ポンプ	$5.45 \times 10^{-3}$	フィールドデータ*
	$4.68 \times 10^{-3}$	フィールドデータ**
	$5.52 \times 10^{-4} \sim 6.58 \times 10^{-3}$	メーカーデータ***
送風機	$1.51 \times 10^{-3}$	フィールドデータ*
	$7.92 \times 10^{-3}$ 以上	フィールドデータ**
	$1.03 \times 10^{-3}$	メーカーデータ***
ユニット1	$2.30 \times 10^{-4}$ (10年経過後)	フィールドデータ
ユニット2	$2.03 \times 10^{-4}$ (10年経過後)	フィールドデータ

\*、 \*\*、 \*\*\* については文献32)参照

	故障率 $10^{-4}$ 時間(~)			寿命 $10^6$ 時間		
	下限	平均	上限	下限	平均	上限
空調機						
送風機	0.342	2.4	3.57	0.0017	0.004	0.007
ケーブル	0.002	0.475	2.20	0.001	0.004	0.008
遮断器	0.045	0.1375	0.949	0.01 ~	0.035 ~	0.05 ~
(燃焼)ヒータ	1.112	4.9	6.21			
(電気)ヒータ		7.67				
ハンダ接続部	0.0001	0.004	1.05			
電気計器	0.005	0.025	5.77			
交流メータ	0.021	0.026	0.035			
直流水メータ	0.017	0.036	0.040			
電動機	0.101	4.500	19.0	0.002	0.007	0.02
ポンプ	1.12	13.5	24.90	0.00003	0.005	0.2
電動ポンプ	2.25	8.7	27.4			
蓄電器	0.10 ~	0.25 ~	0.48 ~	0.02 ~	0.2 ~	0.7 ~
(水槽)蓄電器				0.2 ~	10.0 ~	3000.0 ~
(超小形)蓄電器	0.145 ~	0.25 ~	0.54 ~	5.0 ~	10.0 ~	100.0 ~
(熱動)蓄電器	0.12 ~	0.4 ~	1.0 ~	0.02 ~	0.2 ~	0.25 ~
シヤフト	0.15	0.35	0.62			
スプリング	0.004	0.105	0.221			
起電器	3.03	10.0	16.1			
開閉器	0.009 ~	0.05 ~	0.14 ~	0.01 ~	0.03 ~	20.0 ~
(水槽)開閉器				0.1 ~		
(マイクロ)開閉器	0.09 ~	0.25 ~	0.5 ~			
(押しボタン)開閉器	0.043 ~	0.07 ~	0.11 ~	0.01 ~	0.05 ~	1.0 ~
低圧小形タンク	0.1	0.18	0.321			
サーモスタット	0.02	0.3	0.487	0.02 ~	0.25 ~	0.5 ~
タイマー	0.04	0.24	0.257	0.005 ~	0.03 ~	2.0 ~
バルブ	0.112	5.1	14.8	0.0001 ~	0.15 ~	1.25 ~
エアバルブ	0.112	0.212	2.29	50.0 ~	60.0 ~	100.0 ~
ボールバルブ	1.11	4.6	7.7	0.07 ~	0.1 ~	0.2 ~
チェックバルブ	0.112	2.3	4.7	0.04 ~	0.08 ~	0.125 ~
ゲートバルブ				0.05 ~	0.08 ~	0.125 ~
電磁弁	2.27	11.0	19.7	0.08 ~	0.15 ~	0.3 ~

動防火扉の各ユニットの推定故障率から、防災設備に分類される設備であっても、種類によって故障率の異なることが分かる。すなわち、煙感知器連動防火扉の、ユニット2の10年経過時点での故障率が $10^{-4}$ 回/日と推定されているのに対して、機械的動作を伴わない電気製品で構成されていることから、ユニット2と同質の機器と考えられる非常用照明器具は、10年前後経過した時点での推定故障率が、建物用途・延床面積別に相違が見られるものの、 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 回/日と、ユニット2よりも全般に低い値となっている。多種類ある他の防災設備に関してデータがなく、解析例もないでの、本論文での推定故障率をもって防災設備の故障率の全体像を語ることはできない。しかし、表5-14に示した、煙感知器連動防火扉のユニット1とユニット2は、性質の異なった機器と分類された後故障率が推定されているにも関わらず、それぞれの故障率はきわめて近い値となっている。使用時間・使用条件に対する構成部品の種類・耐久性の違い及び構成部品数の違いから、設備別に故障率は異なると考えられるが、建築物に設置される防災設備の故障率は、本論文での解析からは、 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 回/日の範囲にあると推測される。

表5-13、表5-14、表5-15は、各種工業製品の故障率を示しているものであるが、これらの表から、製品別・使用目的別に故障率が極端に異なることはないことが読み取れ、これは注目に値する。Earlesの示す故障率が最も低く $10^{-4}$ ～ $10^{-7}$ 回／日、松浦等の示す故障率が $10^{-3}$ ～ $10^{-4}$ 回／日と最も高くなるが、Earlesの示す故障率は基本部品についてのものであり、松浦等の示す故障率は部品を数多く組み立てた、機器についてのものである。機器の故障率として見ると、非常用照明器具、或いは煙感知器連動防火扉のそれぞれのユニットについて推定された $10^{-5}$ ～ $10^{-6}$ 回／日という故障率は、故障率として妥当な値であり、使用時間・サイクルが製品毎に大きく異なると予想される中で、おそらく多くの工業製品の故障率がこの範囲にあろうことを併せ考えると興味深い。

## 第6章 出火率・故障率と 建築物の火災安全

本論文では、前章まで建築物内に発生する火災と、建築物内に設置される防災設備の故障という2つの現象について論じてきた。具体的には、それらの現象の発生程度を表現する指標である出火率、故障率を、建築物の用途・延床面積別に推定した。この出火率、或いは防災設備の故障率は、建築物の火災危険と密接に関連する指標であり、その値は建築火災安全計画を考慮する上で重要な要件である。

一方、本論文で推定された出火率と防災設備の故障率から、建築物の用途、或いは延床面積が、出火率と故障率に大きな影響を与えているとの考察も得られた。

本章では、建築物用途・延床面積別の出火率と防災設備の故障率について、本論文で推定された値がもつ意味を明らかにする。さらに、建築物の用途・延床面積と、出火率、防災設備の故障率の相互の関係を明らかにした上で、本論文で推定された出火率と故障率の関係から、火災安全計画にとって重要な意味をもつ因子として、建築物の延床面積があることを示す。

本章に示す考察は、従来の火災研究においてほとんどなされていないものであり、特に、出火率と防災設備の故障率との間に、建築物の延床面積に対して強い相関関係の見られる建築物用途のあることが明らかになった。これは、従来の研究では明確にできなかった、延床面積に規定される要因、例えば設備の維持管理における保全活動の程度などが、火災安全に強く影響している可能性を示唆する点で、今後の火災安全計画に貴重な視点を与えることが期待されるものである。

## § 1. 建築物の出火率

安全工学では、人命が損なわれることなくシステムの機能が保たれる度合いを安全度と定義し、事故の発生率を考慮して、安全度を、

$$S = 1 - R \quad (6.1)$$

S : 機能が維持される時間的確率

R : 事故の発生率

と算定している。

矢代<sup>33)</sup>は、労働災害統計で用いられる度数率と強度率から、

$$R = C \times P \quad (6.2)$$

$$S = 1 - R$$

R : 生活からみた危険度

C : 事故の重度

P : 事故の発生率

S : 安全度

と表される安全性の尺度によって、生活環境の危険の認識が行われていると指摘している。

(6.1)式、(6.2)式から、安全性・危険性を定量的に表現する場合、危険と考えられる事象の発生程度、すなわち事故の発生率Pが重要であることが示される。火災は多数の事象から構成され、火災危険と呼ばれる危険事象も火災の進行局面に応じて様々に定義されるが、火災において最も基本的な危険事象は、火災が発生するか否かであり、事故の発生率Pにあたるものは出火率と判断できるが、第4章で述べたように、出火率は、建築物の母数の推定が困難であったため、Pの変動を規定する要因を分析する形ではとりあげられてこなかった。

表4-3は、本論文で推定された出火率を、建築物用途・延床面積別に示したものであるが、その結果を以下にまとめる。

- ・建築物の延床面積1m<sup>2</sup>当たりの出火率は、およそ10<sup>-5</sup>～10<sup>-7</sup>回/m<sup>2</sup>・年である
- ・物販店舗用途、旅館・ホテル用途、病院用途の出火率は、延床面積の大小によって、10<sup>-5</sup>～10<sup>-7</sup>回/m<sup>2</sup>・年と2桁の差があり、事務所用途の出火率は、延床面積の大小に関わらず10<sup>-7</sup>回/m<sup>2</sup>・年の位に、共同住宅用途の出火率は、どの延床面積区分においても10<sup>-6</sup>回/m<sup>2</sup>・年の位にある

- ・最大の出火率を示す延床面積1,000m<sup>2</sup>以下の旅館・ホテルでは、最小の出火率となる延床面積15,001～20,000m<sup>2</sup>の事務所の300倍近くも出火率が高い

これらの結果から、事務所用途と共同住宅用途について、本論文で推定された出火率を比較すると、第4章の冒頭で指摘した、用途別の出火程度の異なることが示される。さらに、従来はまったく不明であった、建築物規模と出火率との関係が、建築物規模を代表する延床面積に対して明らかにされた。すなわち、共同住宅を除く各用途でおおむね、延床面積の増加により出火率が減少する傾向を示すこと、共同住宅用途ではこの傾向が見られないことである。共同住宅用途において出火率が延床面積に影響されないという結果は、集合住宅が各住戸の積み重なったものであると考えれば容易に理解できるが、他の用途の示す傾向は、より詳細な検討が必要である。

一般に、人間が活動・生活する場での出火率は、多種多様の素因・誘因・要因<sup>34)</sup>により決定されると考えられる。建築防災計画指針<sup>35)</sup>には災害危険チェックリストが示されており、表6-1は、そのうちの「発生」の部分を抜き出して示したものである。表6-1の各項目は、それぞれ出火要因或いは誘因を表しているものと想像されるが、表中〔使用形態〕〔可燃物〕〔初期火災荷重〕の項目と、第4章に示したN F P A の D T<sup>20)</sup>で出火防止の大きな柱の一つは熱源の制御にあることを併せ考えると、火気・可燃物が重要な素因とみなされる。こうした観点から本論文で推定された出火率を見ると、建築物用途・規模別に異な

表 6-1. 災害危険チェックリスト

災害要因 の捉え方		A. 生 活 (人 間)	B. 建 築 物 (空 間)
災害対策 の捉え方			
発生	1. 予 防	<p>〔使用時間〕長(短), 夜(昼)        〔利用者〕(特定)不特定        〔利用形態〕火気の有(無), 酒気の有(無)        〔可燃物(衣類, 書籍, その他)〕多(少)        〔維持管理〕(良)否</p>	<p>〔初期火災荷重〕(難燃)易燃        〔内装種類〕(不燃)可燃        〔感知警報設備〕(密)疎, 感知の(適)否        〔単位空間の大きさ〕大(小)</p>
	2. 警 報 (発見・通報)	<p>〔使用時間〕長(短), 夜(昼)        〔利用者〕(在)不在, (特定)不特定        〔収容人口〕多(少)        〔使用形態〕秩序の(有)無        〔組織訓練〕(有)無</p>	

った出火率が示される理由の一つとして、単位面積当たりの火気の密度の違いがあげられよう。すなわち、共同住宅では、延床面積の増大は住戸数の増大であり、その結果火気の数量は線形に増大することで説明でき、一方、事務所では、例えば出火を引き起こすような火気の数量が延床面積の増大と線形関係ではなく、単位面積当たりの火気の数量が減少するとすれば、建築物用途・延床面積区分毎に示される出火率の値を説明する理由が与えられる。しかしながら、出火率が300倍も異なる場合があることは、この理由だけで説明されるものではなく、表6-1に示される、[利用時間] [単位空間の大きさ] [利用者]等の要因も深く関連していると推測される。今後、これらの要因と出火との関連を、建築物用途・規模毎に明らかにすると共に、出火率と各要因との定量的関係を解析していくべきである。

## § 2. 防災設備の故障率

本節では、まず第5章で推定された故障率の結果を利用して、防災設備の故障率が、他の一般設備の故障率とどのような関係にあるかを考察した後、防災設備の故障率が、建築物用途・延床面積別に異なる理由を考察する。ただし、以下の考察では、第5章の考察で述べたように、定期検査開始前後で故障時間の有り方が大きく変化するというデータベースの性質から、最尤推定法は適切な手法ではないと判断されるため、防災設備の故障率の現状をより精度よく表現すると考えられる、近似推定法による推定故障率をもって考察する。

表5-13に示した、非常用照明器具の近似推定法による推定故障率と、表5-14に示した、煙感知器運動防火扉の各ユニットの推定故障率はかなり異なっており、それぞれ $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 回／日、及び $10^{-4}$ 回／日の範囲と判断される。表5-14に示した他の一般機器の故障率と比較すると、上述の故障率範囲のうち高い故障率を示す防火扉でも低い部類に入るが、メンテナンスフリーのレベルにはないことが明かである。このことは、防災設備も一般設備と同様その故障率が、保全活動により影響を受ける範囲にあることを示している。

次に、本論文の解析からは、非常用照明器具という同一種類の機器に関して推定された故障率が、建築物用途・延床面積別に異なることが示された。その理由を考察するに先立って、第5章で非常用照明器具の故障に関して明らかに

なった主な事実を整理する。

- i) 建築設備定期検査報告書の原本の抜取り調査から、共同住宅では延床面積の大小によらず電源内蔵型の器具が使用されており、他の用途では延床面積が小規模な建築物で電源内蔵型、延床面積が大規模になると電源内蔵型と電源別置型の器具が併用されている。
- ii) 共同住宅に対する設備維持管理実態の詳細調査（表5-9）によれば、多くの建築物で故障の原因は蓄電池の不良とされており、バッテリー等の交換がなされている。
- iii) 事務所建築物に設置された非常用照明器具の故障時間に関するプロット結果（図5-13）から、延床面積が大きくなるほど第1回以外の定期検査で発見される故障が増加する。
- iv) 非常用照明器具の推定故障率を示す表5-13より、物販店舗用途、病院用途、事務所用途の建築物では、延床面積の増大につれて故障率が低下する傾向にあり、旅館・ホテル用途、共同住宅用途の建築物では、一部の延床面積規模を除いて故障率の変化がないとみなせる。

以下では、解析した5用途のうち、データ数が多く故障率推定精度が高いと思われる事務所、共同住宅を中心に述べる。

iv)に挙げた延床面積規模別の故障率の結果のうち、事務所用途と共同住宅用途の示す特徴は、i)の事実、すなわち故障率解析に際して、非常用照明設備は用途・規模による機器、システムの差が小さいと見なしたにもかかわらず、實際には使用される器具の寿命性能が異なっていたことに起因すると考えられる。これは、全ての延床面積区分での建築物で電源内蔵型の器具が使用されている共同住宅において、ごく小さな延床面積の建築物を除いて、延床面積別に推定された故障率に変化がないこととも一致する。この考えに従えば、事務所の示す延床面積別の故障率の変化は、電源内蔵型中心から電源別置型併用の増加によりもたらされていることになり、別置電源の故障率の低いことが理由となる。機器の種類の違いによる故障率の差は、直観的には妥当であるが、ii)、iii)の事実は、保全による故障率の変化が無視し得ないことを示している。特に、共同住宅の延床面積 $1,000\text{m}^2$ 以下の建築物における故障率が、延床面積 $1,001\text{m}^2$ 以

上の建築物における故障率に比べて際だって高いことがそのことを示す。もしも全ての規模の共同住宅で同一の器具が使用されているならば、共同住宅に設置された器具の故障率の差は、保全の差を表現していると見なせる。事務所用途において示される、電源の内蔵、別置の違いによる故障率の差は、第5章で述べた蓄電池別の特徴から分かるように、鉛蓄電池の使用が少なく、アルカリ蓄電池の使用が多ければ、寿命性能に大きな差がなく、蓄電池の交換といった保全の差によるとも考えられる。

以上の考察から、信頼性工学で定義されている使用信頼度（第5章§2.参照）が建築物用途・延床面積別に異なるために、結果として、本論文で推定された故障率が建築物用途及び延床面積別に異なるという推論のしうることが確認された。

### §3. 出火率・故障率と建築物の火災安全

§1.、§2.で考察した出火率、防災設備の故障率は、第4章、第5章で述べたように、それぞれ建築物の火災安全計画に深く関わり、その値の大小が建築物の火災安全性を大きく左右する要素となるものである。すなわち、出火率は出火防止がどの程度達成されるか、防災設備の故障率は燃焼拡大防止或いは人命被害防止がどの程度達成されるかを示す値であり、その値の大小が建築物の火災安全性に直接影響すると考えてよい。

ここで、両者の値を同じように変動させる共通の因子が存在するならば、その因子の特性を把握し、上述した出火率及び防災設備の故障率の値を小さくするよう因子を操作することで、建築物の火災安全性を格段に高められることは明かである。

一般的に、火災の発生と設備の故障の発生は物理的に無関係の事象と考えられ、出火率と故障率を同じ土俵で比較する試みはなされてこなかった。ところが、§1.、§2.で見たように、両者には、建築物の用途・延床面積に対して、同様の傾向を示す部分のあることが明らかになった。本節では、この事象を、上述の共通の因子が存在するという立場から考察する。ただし、統計的解析によって両者に相関のあることが認められても、それが共通の因子の存在を保証しているわけではなく、後述するような種々の検討が結論を導く前に必要とな

ることは言うまでもない。

上述の視点に基づき、建築物用途別にそれぞれの延床面積区分における出火率と故障率の値を、散布図として示したものが図6-1である。出火率と故障率に強い相関があれば、図上で直線にプロットされる。強い相関が見られるのは、事務所、物販店舗、病院の用途であり、共同住宅用途については、第4章、第5章でそれぞれ解析したように、出火率、故障率が、建築物の延床面積の違いに影響を受けないことから、ここでも無相関となっている。

次に、相関の高い3つの建築物の用途について、延床面積に対する出火率・故障率を図6-2に示す。各建築物用途で、延床面積の増加に伴い、出火率・故障率の減少していることが読み取れる。この傾向がはっきりと認められるのは事務所用途であり、この用途ではそれぞれの延床面積区分の建物数が、最小でも100件近いことから、「事務所に類するような建築物では、延床面積が増加すると、出火率・故障率が減少する」ということが、統計的に確認される。

事務所用途の建築物において、出火率・故障率の延床面積に対する上述のような傾向が示される理由として、火気の数量及び単位面積当たりの火気の密度が延床面積毎に異なること、すなわち、同一の用途であっても延床面積が大きくなると、火災の発生にとって空間の性質が変化することが考えられる。しかしながら、本論文で解析対象とした建築物用途・延床面積全体を通して見ると、最小の出火率と最大の出火率が約300倍異なると推定され、単位面積当たりの火気の密度以外に大きな原因が介在していると予想される。

東京消防庁は、管内で発生した火災に関する各種統計結果を、「火災の実態」(東京消防庁予防部調査課)<sup>36)</sup>として発行しているが、昭和62年版から、出火原因を本論で解析した5用途について集計したものが表6-2である。表6-2からは、どの用途についても放火とたばこを合わせたものが最大の出火原因の1つであり、事務所用途においては、出火原因の半数を占めていることが分かる。ここで、単位面積当たりの建築物の利用者が延床面積に関わらず一定であり、かつ出火原因別割合が延床面積に影響を受けないとすれば、事務所用途の建築物における出火率の変動は、延床面積の増大に伴い失火や放火を減ずるような働きが強まることを示している。「火災の実態」からは建築物規模別に統計が得られていないので、表6-2の結果がどの延床面積にも当てはまるかどうかは不

図

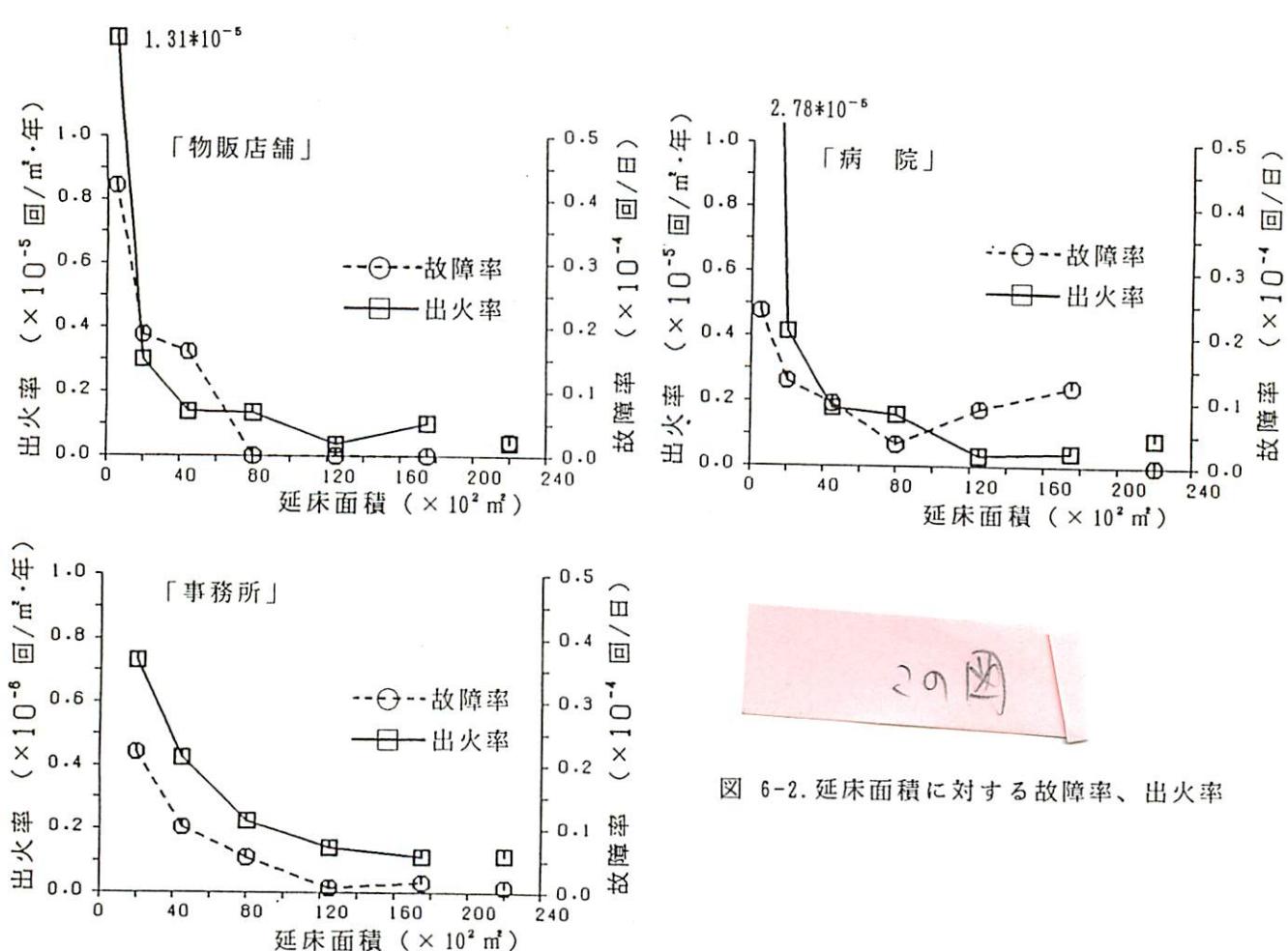
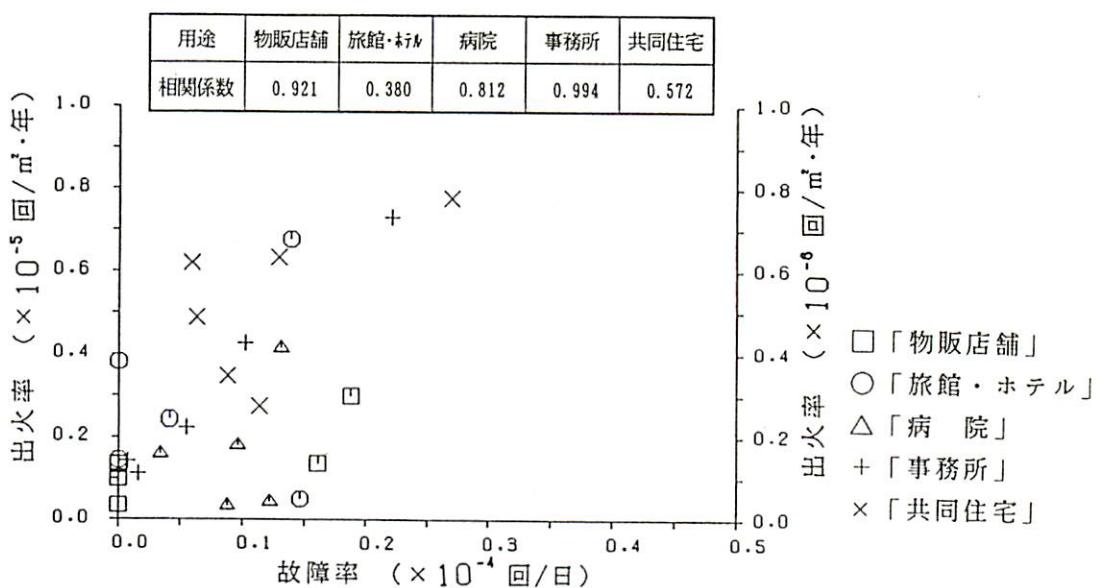


表 6-2. 用途別出火原因

出火原因 用 途	放 火	た ば こ	電 気 関 係	ガ ス 関 係	石 油	そ の 他	不 明	計
物販店舗	16	5	25	8	5	6	3	68
百貨店(1000m <sup>2</sup> 以上 の小売店舗)	24	-	1	1	-	1	1	28
旅館・ホテル	2	10	2	-	-	1	1	16
病院・診療所	44	11	26	8	-	5	4	98
事務所(含銀行, 官公署)	41	25	31	9	8	12	2	128
共同住宅	320	247	78	261	26	215	-	1,147

明であるが、仮に上述の仮定が成立するならば、事務所用途建築物における延床面積別の出火率の差は、建築内における管理活動に関連していると推測される。

日常経験に基づく判断ではあるが、大きな建築物の内部空間が、整然として安全に見えることがある。この整然さを示す指標として、建築物全体、或いは建築設備に対する管理の量や、管理の質の差を評価する必要があるが、現在そのような分析手法は確立されていない。一方、建築施設の機能低下または損傷の有無、設備機器の稼動状態等を定期的に点検することが、法令により規定される建築物・建築設備がある。図6-3は、官公庁、事務所建築物の維持管理活動に対して、建設省が行った調査の<sup>37)</sup>結果の一部を示したものである。この調査は、事務用途建築物における建築物及び建築設備の維持管理実態に関するもので、図6-3は、「消防法」、「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（ビル管理法）」、「労働安全衛生法」等に規定された法令点検の実施状況を、延床面積規模別に調査し、評価した結果を示している。図に示される「レベル」が、点検実施回数を表しており、Aは最もレベルが高く、法令点検回数をかなり上回って点検を実施している場合、以下B、C、Dの順に点検回数が減り、それぞれのレベルに評価点数がつけられる。図6-3から、延床面積が大きくなるほど、点検活動のよく行われていることが分かる。この調査による点検活動の評価は、点検の実施回数に基づくもので、維持管理の質と直接対応はしないが、図6-3の結果は、上述の経験的判断を裏付けていると考えられ、また図6-2に示

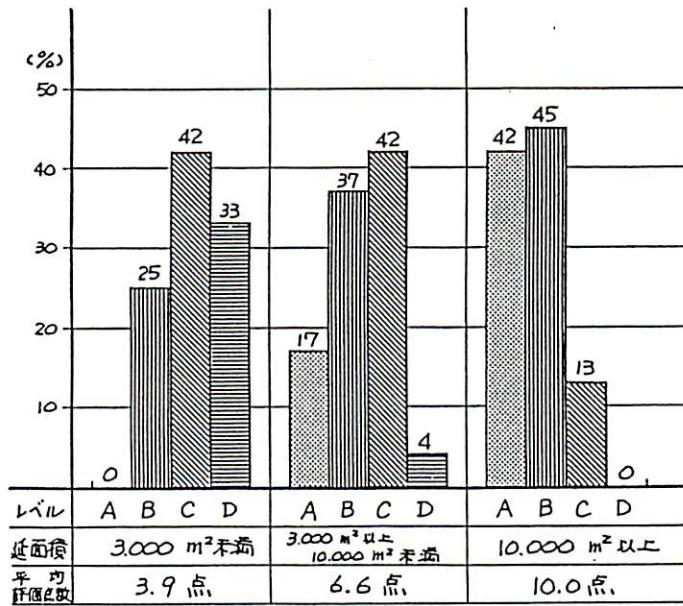


図 6-3. 延床面積別の法令点検実施レベル  
(建設省編：保全実態調査報告書、昭和56年3月)

した、事務所用途で延床面積が大きくなるほど故障率が減少することにも一致する。このことから、設備の故障率が維持管理活動に大きく影響されていることが推測される。

一般に考えられているように、建築物の出火と設備の故障とが物理的に関係のない独立した事象とみなす限り、出火率と故障率の建築物規模に対する相関は、偶然の産物に過ぎない。しかし、設備の故障が保全活動と強い関係を持ち、出火原因が物理的要因だけで構成されていないことを考え併せれば、出火率と故障率の相関関係が、建築物用途・規模毎の維持管理活動の違いに影響を受けた結果であると推測することは妥当であろう。

火災安全計画上、出火率と防災設備の故障率は、それぞれ別の火災危険局面に関する指標であるが、本論文で推定された出火率と故障率が、延床面積に対して同じ変化を示す用途の見いだされたことは、重視すべきことと考えられる。すなわち、本論文の解析結果は、建築物に発生する火災と、防災設備に発生する故障の発生程度が共に、建築物の用途と延床面積で定まる要因によって決定されている可能性を示しているからである。

図6-4は、出火率・故障率・延床面積の間の関係を、第5章§2.で述べた環境係数の考え方に基づいて表現したものである。延床面積に規定される何が、図6-4に示す出火率の「要因」と故障率の「環境係数」を共に変化させるかを知

り、それを操作することは、建築物全体の火災安全性を高める効果的な方法となることが予想される。ただし、表6-1に示される、火気、可燃物、維持管理等、建築物の用途・延床面積によって定まる要因を特定し、ここで行った数多くの仮定を立証すること、及びそれらの要因と出火・故障との定量的関係を知ることは、今後の解析・研究を待たねばならない。

$$\text{出火率} = \text{基本出火率} \times \text{要因} \quad \boxed{\begin{array}{l} \cdot \text{利用者数} \\ \cdot \text{利用時間} \\ \cdot \text{防火管理 等} \end{array}}$$

延床面積に規定される

$$\text{故障率} = \text{基本故障率} \times \text{環境係数} \quad \boxed{\begin{array}{l} \cdot \text{設置・運用環境} \\ \cdot \text{保全方法 等} \end{array}}$$

図 6-4. 出火率・故障率・延床面積の関係

## まとめ

本論文は、建築物の火災安全性を信頼性理論の視点から評価する際の基礎資料となる、建築物の出火率及び防災設備の故障率を、実地に得られるデータに基づいて解析・推定した一連の研究を纏めたものである。

第1章では、建築物の火災安全性を評価するためには、出火の危険度と火災発生後の危険度との総合的な考察が必要であり、そのためには出火率と防災設備の故障率の実態の究明が重要であることを述べると共に、既往の火災研究における出火率の捉え方の問題点、及び防災設備の動作信頼性の把握に困難がある点を指摘し、本論文における研究の背景を述べた。さらに、出火危険の程度を示す出火率、或いは火災による被害の程度を左右する防災設備の故障率は、現時点では統計的解析の視点から捉えることが望ましいと考えられ、フィールドデータを用いた出火率と故障率の統計的考察を行っている本論文の研究目的を明らかにした。

第2章では、本論文で出火率、故障率の推定に用いた、火災・建築物・建築設備の調査資料について、資料内各情報を整理して示した。出火事象、故障事象は、一般に時間に関して不規則に生起する事象と考えられ、出火率、故障率は、一定時間にそれぞれの事象が生起する頻度を表す指標である。従って、出火率、故障率を推定する場合、解析にとって主要な情報は、火災事象、故障事象が生起する建築物の数或いは設備の数、及びそれぞれの事象の生起時間間隔である。本章では、出火率、故障率の解析にとって重要と考えられる、調査対象の数、調査期間を、「物販店舗」「旅館・ホテル」「病院」「事務所」「共同住宅」の用途の建築物について明らかにした。具体的には、出火建物数、及び延床面積・階層数・竣工年別の建物数を明らかにし、さらに、建築設備については、調査対象である換気・排煙・非常用照明・給排水の4設備の設置状況、定期検査実施状況を、建築物の用途・規模・竣工年別に明らかにした。

第3章では、時間的に不規則に生起する事象の生起時間間隔を、定常確率過程として取扱う解析方法について要約して述べた。事象の生起頻度が低く、標

本毎に観測期間が異なる場合、事象の生起が観測されない標本が多数出現するため、このような事象の生起時間間隔に関するデータは、解析に際して多重時間打切りを受けているとみなされる。本論文で解析対象とする出火事象或いは設備の故障事象は、生起頻度が低いこと、及び個々の建築物における調査期間に差異があるという調査資料上の制約をもつことから、ここでは確率分布のパラメータ推定法としてよく用いられる手法の一つである最尤法について、特に多重時間打切りの条件の下での解析について述べた。加えて、防災設備の一つである煙感知器連動防火扉の定期点検・保全記録に基づいて、時間打切り故障事象に対する最尤法の適用例を示した。

第4章では、建築物の出火率の推定について論じた。出火事象の生起時間間隔（出火時間）を確率過程でモデル化する場合、出火率の推定は、出火時間の確率分布のパラメータ推定の問題となり、第3章で述べた信頼性理論による推定手法が適用できる。本論文では、出火事象を定常ポアソン過程でモデル化しており、その場合事象の初生起時間すなわち出火時間は1母数分布である指数分布に従う。本章では、多重時間打切りデータにおける1母数分布の最尤法により出火時間分布のパラメータを推定し、この推定パラメータから建築物の用途・延床面積別に出火率を推定した。この結果から、用途・延床面積の違いにより建築物の出火率の異なることが明らかになった。

第5章では、防災設備の一つである非常用照明器具の故障率の推定について論じた。一般に、故障事象の生起時間間隔（故障時間）は定常確率過程でモデル化され、その解析によって故障時間分布及びパラメータが同定されるが、稼動開始以降の任意の時刻における故障の生起率（故障率）は、故障時間分布、パラメータ、動作時間或いは経過時間をもって推定される。特に、時間に対して故障率が増加する正規分布、ワイブル分布等の故障時間分布が予想されるときには、任意の時刻における信頼性を故障率により評価する必要が生ずる。本章では、第2章に示した資料から得られる建築設備の故障時間が、多重時間打切りをされた区間データの性質をもつことを考慮して、図的解法の一つであるワイブル確率プロット法、第3章で述べた最尤法、本論文で提案する近似推定法による故障率の推定について述べた。利用資料の性質と推定結果との総合的な考察に基づいて、故障率の現状を把握する上で、本論文で提案する近似推定

法が有効であることを論ずるとともに、建築物の用途・延床面積の違いによって、非常用照明器具の故障率の異なることが明らかになった。

第6章は、第4章、第5章で推定された出火率と防災設備の故障率について総括的な考察を加えた。共同住宅建築物の例では、出火率、故障率がともに建築物の延床面積に影響を受けないこと、また事務所建築物では、延床面積が増大するにつれて、出火率、故障率がともに減少する傾向を示し、かつ延床面積毎の出火率と故障率が強い相関を示すことが明らかにされた。さらに、この結果を踏まえて、出火率と故障率の両者に影響を与える、延床面積に規定される共通の因子の存在を推論した。

以上本論文では、消防庁の作成した火災についてのデータベースと、建築設備定期検査報告の資料を基に作成された、建築物及び建築設備についてのデータベースを同時に利用し、統計的に解析することで、建築物の用途・延床面積別に出火率を推定した。さらに建築設備についてのデータベースは、防災設備の故障率の解析にも利用できるもので、これを出火率と同じく統計的に解析することで、非常用照明器具の故障率を推定した。出火率を、確率・統計理論に基づく手法により推定した例は、本論文以外にはほとんど見られない。また、防災設備の故障率も、従来ほとんど推定されてこなかったものである。

本論文で推定された出火率と防災設備の故障率は、ともに建築物の火災安全性に関与する指標であるが、一般には相互の関連が考慮されていないものである。一方、本論文で推定された出火率と故障率を比較した結果、建築物の延床面積に対する、出火率と故障率の変化が、同一とみなせる用途のあることが明らかとなった。中でも特徴的なのは、事務所用途の建築物で延床面積の増大につれて出火率・故障率とも同様な形での減少傾向を示したことである。このことは、出火と設備の故障という、一見すると無関係な両者に、共通に影響を与える因子が存在する可能性を示唆している点で、特に火災安全計画上重要な意味をもつと考えられた。すなわち、その因子を特定し、操作することで、建築物の火災安全性を容易に高めうることが期待されるからである。

本論文で推定された出火率と故障率の相関関係の考察にあたって注意すべきは、統計的に相関関係が見いだされても、それがそのまま上述の因子の存在を

裏付けているわけではないことである。本論文では、推定された出火率と故障率の間の相関を説明するものとして、床面積当たりの火気の密度、設備の維持・保全の程度、等を建築物の延床面積に関連する因子としてとりあげ、火災安全性の構造を考察したが、これら関連因子及び考察された火災安全性の構造は、今後の解析、研究により確認される必要がある。

さらに、本論文で解析に用いた各資料は、現時点では最も整備されていると考えられるものであったが、特に建築物の数が不正確にしか分からない等、不備な点も多い。本論文で推定した出火率、防災設備の故障率を取り入れ、信頼性理論に基づいた火災安全計画を展開していく上で、今後、解析資料に存在する上記のような問題点が改善されつつ、集積されることが強く望まれる。

# A p p e n d i x

## A - 1. フィッシャー情報量

分散は母数やその関数に関する近似信頼限界を求めるために用いられるが、母数の最尤推定量の漸近分散を求めるにはフィッシャーの情報量を計算する必要がある。フィッシャー情報量は対数尤度の母数に関する2階偏微分に負号をつけたものの期待値であり、以下では指數分布でタイプI打切り（時間打切り）の場合について述べる。

$n$  個の標本における  $x_i$  をユニット  $i$  のランダムな故障時間、 $\eta_i$  を（既知の）計画打切り時間とするが、一般的には故障ユニットの  $\eta_i$  は不明な場合が多い。まずユニット  $i$  に対して次の指示関数を用いる。

$$I_i(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i < \eta_i \quad (\text{故障が観測される場合}) \\ 0 & x_i \geq \eta_i \quad (\text{打切られる場合}) \end{cases} \quad (\text{A. 1. 1})$$

期待値を計算する場合には、 $x_i$  と  $I_i(x_i)$  を確率変数とみなす。ユニット  $i$  についてその対数尤度は、

$$\ln L_i(\theta) = I_i(x_i) \ln f(x_i; \theta) + \{1 - I_i(x_i)\} \ln R(x_i; \theta) \quad (\text{A. 1. 2})$$

と書くことができ、ユニット  $i$  に対するフィッシャー情報量は

$$\begin{aligned} E_0 \left\{ -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L_i(\theta) \right\}_0 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L_i(\theta) \right\}_0 f(x_i; \theta_0) dx_i \\ &= \int_{-\infty}^{\eta_i} \left[ -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln \{f(x_i; \theta)\} \right]_0 f(x_i; \theta_0) dx_i \\ &\quad + \left[ \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln \{R(\eta_i; \theta)\} \right]_0 R(\eta_i; \theta_0) \quad (\text{A. 1. 3}) \end{aligned}$$

となる。添字  $0$  は  $\theta = \theta_0$  (真値) において計算することを示している。 $x_i$  が独立であれば標本フィッシャー情報量は、

$$E_0 \left\{ -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L(\theta) \right\}_0 = \sum_{i=1}^n E_0 \left\{ -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L_i(\theta) \right\} \quad (\text{A. 1. 4})$$

となる。

標本局所フィッシャー情報量は、標本対数尤度の2階偏微分に負号をつけ、

$$-\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L(\theta) = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln f(x_i; \theta) - \sum_{i=1}^{n-r} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln R(x_i; \theta) \quad (\text{A. 1. 5})$$

を  $\theta = \hat{\theta}$  (最尤推定値) で計算したものとなる。

ここで上式中  $f(\cdot)$  は  $r$  個の故障ユニットについてのものであり、 $R(\cdot)$  は  $(n-r)$  個の打切りユニットについてのものである。

## A - 2. ワイブル確率紙の使用法

### (1) 分布理論

以下では時間に対する確率変数として  $t$  を用いる。

$$\text{累積分布関数 } F(t) = 1 - \exp \left\{ -\frac{(t - \gamma)^m}{t_0} \right\} \quad (\text{A. 2. 1})$$

$$\text{確率密度関数 } f(t) = \frac{m(t - \gamma)^{m-1}}{t_0} \exp \left\{ -\frac{(t - \gamma)^m}{t_0} \right\} \quad (\text{A. 2. 2})$$

$$\text{瞬間故障率 } \lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{m(t - \gamma)^{m-1}}{t_0} \quad (\text{A. 2. 3})$$

ただし  $m$  : 形状パラメータ (shape parameter)

$t_0$  : 尺度パラメータ (scale parameter)

$\gamma$  : 位置パラメータ (location parameter)

ワイブル分布の  $k$  次のモーメントは

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} t^k f(t) dt = r^k + k \int_0^{\infty} t^{k-1} \{1 - F(t)\} dt \quad 0 \leq r \leq t < \infty \quad (\text{A. 2. 4})$$

であるが、一般には  $\gamma=0$  として扱える場合が多く、 $\gamma=0$  として 1 次、2 次モーメントを求めるとき、

$$\mu = t_0^{\frac{1}{m}} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \quad (\text{A. 2. 5})$$

$$\sigma^2 = t_0^{\frac{2}{m}} \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \right\} \quad (\text{A. 2. 6})$$

となる。

## (2) 確率紙の構成

ワイブル分布の信頼度は(A.2.1)より

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right) \quad (\text{A.2.7})$$

となり、(A.2.7)の両辺の自然対数を2度とすれば

$$\ln \ln \frac{1}{R(t)} = m \ln t - \ln t_0 \quad (\text{A.2.8})$$

となる。図A-1はワイブル確率紙を示したものであるが、縦軸を  $\ln \ln \frac{1}{R(t)}$  、

横軸を  $\ln t$  に目盛れば(A.2.8)のグラフは直線となり、 $m$  は傾斜から、 $t_0$  は  $t=1$  に対応する縦軸から読み取ることができる。

## (3) 使用法

i)  $t_{i-1}$  から  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) までの観測個数を  $n_i$  とし、累積故障確率

$$F(t_i) = \frac{\sum_i n_i}{N} \quad (\text{A.2.9})$$

をつくる。ここで  $N$  は試験サンプル総数である。

ii)  $t_i$  に対する  $F(t_i)$  を確率紙上にプロットする。

iii) 1本の直線に回帰させる。そのまま直線に回帰できる場合は  $\gamma=0$  となるが、直線に回帰できないときはある数値を加えるか差し引くかして直線化する。この数値が  $\gamma$  となる。

iv)  $m$  は確率紙中の○を通って回帰直線に平行線を引き、 $\ln t=0$  の垂線を横切る点を右軸で読み取って得る。

v)  $t_0$  は回帰直線が  $\ln t=0$  を切る点の右軸の値を  $a$  として

$$\ln \frac{1}{t_0} = -a$$
$$\therefore t_0 = e^a \quad (\text{A.2.10})$$

として求める。

他の各種特性値は確率紙上に記入された目盛尺から読み取ることになるが、一

一般的な使用法は上述の手順に従う。ここで本論で使用するデータは多重時間打ち切りを受けていることより累積故障確率  $F(t_i)$  の計算法が異なる。多重打ち切りを受けたデータの図的解法としてHerd-Johnson法、Kaplan-Meier法等<sup>11)</sup>が与えられているが、本論中のプロット点はHerd-Johnson法によっている。

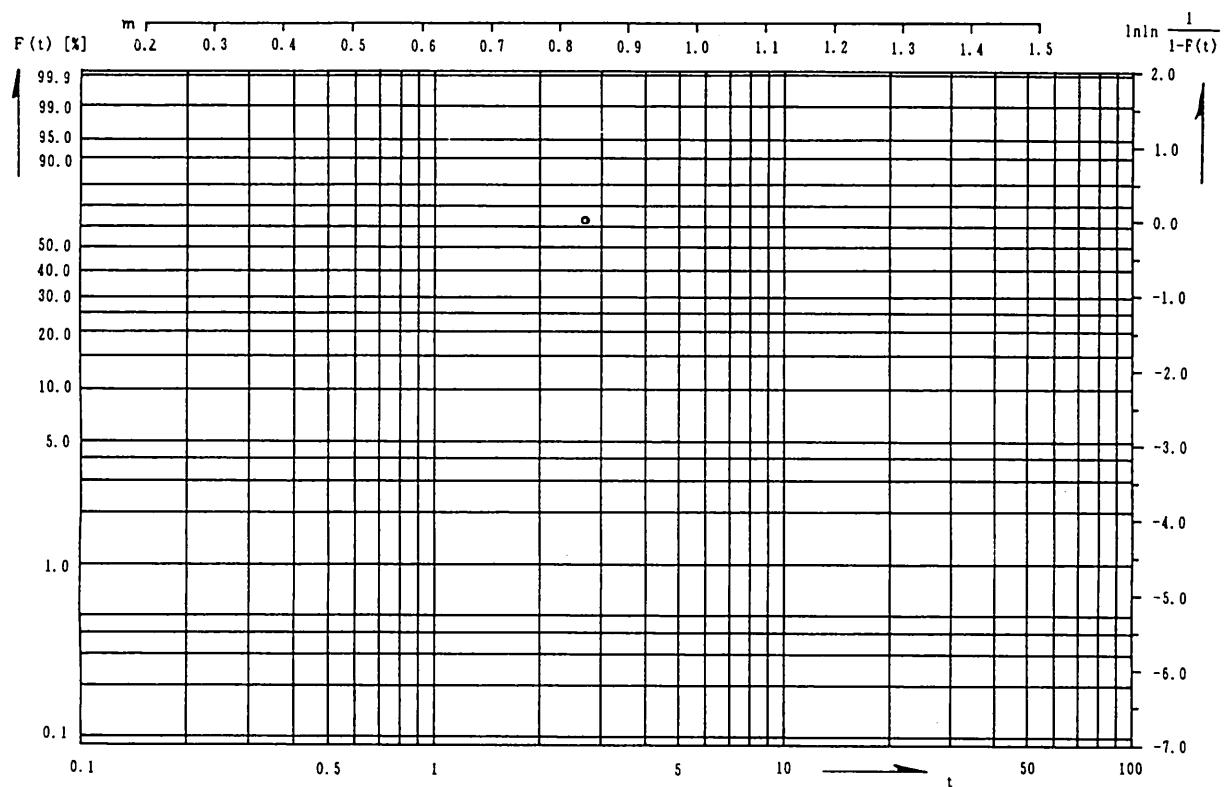


図 A-1. ワイブル確率紙

## 参考文献

- 1)矢代 嘉郎；フォールトツリーによる火災の進展過程の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，1982
- 2)寺井 俊夫；インテリジェントビルの防災システムの信頼性向上のために，セキュリティNo. 60, 1991. 1
- 3)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
- 4)朴 哲也，辻本 誠；煙感知器連動防火扉の定期点検に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集第399号pp. 73-80, 1989. 5
- 5)長谷見 雄二；防火とシステム，火災 Vol. 40 No. 1 1990, 日本火災学会
- 6)医療施設調査，病院報告；厚生大臣官房統計調査部，昭和62年  
住宅統計調査報告第3巻その13；東京都総務庁統計局，昭和58年等
- 7)第41回東京消防庁統計書，東京消防庁，平成元年
- 8)B. Epstein; Exponential distribution and its role in life testing, IQC, Dec. 1958
- 9)三根 久，河合 一；信頼性保全性の数理，朝倉書店
- 10)S. ジーゲル；ノンパラメトリック統計学（藤本 他訳），マグロウヒルブック
- 11)竹内 啓；数理統計学，東洋経済
- 12)杉山 俊幸，藤野 陽三，伊藤 学；統計データからの分布形・特性値の決定，構造工学論文集Vol. 31A, 1985. 3
- 13)P. G. Hoel; Introduction to Mathematical Statistics, 3rd Ed, J. Wiley and Sons, New York, 1962
- 14)W. Nelson; 寿命データの解析（柴田 他訳），日科技連
- 15)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
- 16)安全工学講座4 故障，安全工学協会編，海文堂
- 17)島田 正三；日科技連ライブラリー「信頼性と寿命試験」，日科技連
- 18)藤本 盛久，羽倉 弘人；現代建築防災工学，オーム社
- 19)志田 弘二，辻本 誠，柳沢 忠；火災発生に伴う人命危険の評価法，日本建築学会計画系論文報告集第368号pp. 69-78, 1986. 10
- 20)シリーズ安全を考える5. 安全のコスト論確立のすすめ，日経アーキテクチュア，1978.  
3. 6
- 21)辻本 誠 ほか；雑居ビルの火災危険に関する統計的研究（その1），日本建築学会東海支部研究報告集，pp185-189, 昭和59年

- 22)最新火災報告取扱要領と解説, 自治省消防庁防災課編, 全国加除法令出版
- 23)熊野 陽平; 火災死者数とエネルギー事情との相関について, 日本火災学会研究発表会  
概要集pp. 77-80, 昭和61年
- 24)建設省総合技術開発プロジェクト新木造建築技術開発報告書 No. 63-2防火分科会, 建設  
省建築研究所, 平成元年3月
- 25)小栗 篤; 雜居ビルの火災危険に関する統計的研究, 昭和61年度名古屋大学工学研究科  
修士学位論文
- 26)安全性に関する評価法及び測定法の開発, 建設省建築研究所, 1796
- 27)稻垣 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Vol. 21, No. 10, 1977  
Y. Sawarai, T. Katayama, S. Fujishige ; State Estimation for Linear Continuous-Time  
System with Interrupted Observation, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-19,  
No. 4, 1974  
等
- 28)建築設備の耐久性向上技術, 建設大臣官房技術調査室監修, (財)建築保全センター編,  
オーム社
- 29)塩見 弘; 故障物理入門, 日科技連
- 30)共同住宅における設備の故障詳細調査, 中高層共同住宅の品質性能に関する調査委員会,
- 31)信頼性管理便覧, 日刊工業新聞社
- 32)松浦 房次郎, 松島 修; 建築設備の信頼性(2), 空気調和・衛生工学第60巻第8号
- 33)矢代 嘉郎; 安全計画の視点, 日本建築学会建築計画委員会, 日本建築学会編
- 34)川越 他; 新建築学大系 1 2 建築安全論, 彰国社
- 35)新訂建築防災計画指針, 建設省住宅局建築指導課監修, 日本建築センター編, 新日本法  
規, 1978
- 36)火災の実態(昭和62年版), 東京消防庁予防部調査課, 昭和62年
- 37)保全実態調査報告書, 建設大臣官房官序営繕部編, 昭和56年3月

## 謝 辞

本論文は、筆者が名古屋大学工学部建築学科大学院工学研究科に進んで以来、約6年の研究をまとめたものです。その間、辻本 誠 博士（現 名古屋大学助教授）には研究遂行のみならず日々の生活においても、懇切丁寧なご指導・ご援助をいただきました。また、坂本 順 博士（現 名古屋大学教授）、中原 信生 博士（現 名古屋大学教授）、久野 覚 博士（現 名古屋大学助教授）、河野 守 博士（現 名古屋大学助手）には、本論文に関して貴重なご助言を頂きました。さらに本論文の研究にあたり、辻本研究室において卒業・修士論文の研究を行った渡辺郁夫、石川朝弘、掛川秀史、および本田信也の諸氏をはじめ数多くの優秀な学生諸君の協力を得ました。ここに、深く感謝申し上げます。

この論文を作成するにあたり、データベースの利用は不可欠なものでありました。データを快く提供して頂いた東京消防庁、自治省消防庁、日本建築設備安全センター、三和シャッター（株）の関係諸氏に深く感謝申し上げます。

最後に、大学入学以来今日まで研究活動を続けてこられたのは、両親をはじめ多くの方々のご援助によるところ大であります。また、筆者のわがままを許し、研究者としての気ままな生活を支えてくれた妻に、心から感謝いたします。

1991年1月

朴 哲也