

交通用機器の稼働実績と信頼性向上策

Reliability Improvement of Equipment for Traffic Facilities Based on Field Data

福岡卓二* *Takuji Fukuoka*

磯辺孝行* *Takayuki Isobe*

The rolling stock and elevators must fulfill stringent reliability requirements for traffic facilities. For the purpose of prescribing suitable measures of reliability improvement for each component of their subsystems which are essentially a combination of electronic and electric devices the authors analyzed the field data of each component device. The analyses revealed that there is a distinct difference between electronic and electric components in their tendency of failure; that is, in the former, failures tend to occur in the initial stage of use and the number of parts and MTBF are correlated, while in the latter the failure tendency is much mixed, varying with the type of parts. This indicates that each component device needs different philosophy for its design, reliability prediction and maintenance. At Hitachi, reliability assurance is made for each process by the basic method determined based on its field data.

1 緒言

鉄道車両やエレベータには10年ほど前からエレクトロニクスが採用されはじめ、現在では運転制御、運行管理、保安などの面にシステムの頭脳として大幅に適用拡大されている。一方、駆動系その他には従来からの電気機器、機械装置が使用されており、鉄道車両、エレベータは言わば典型的な電子系と電気機械系との複合システムである。

電子系機器と電気機械系機器との性格にはいろいろの面で相違があり、当然信頼性向上にも違った方策がある。これを具体的に明らかにするには、まず事実としての製品の稼働実績を吟味することが必要である。

われわれは製品の稼働状態の中から教訓を学びとることを基本としており、常時フィールドデータの収集に努めてきた。本稿ではそれらの解析結果とそれから導かれる信頼性向上策について述べる。

2 交通用機器の特徴

交通用機器としての鉄道車両、エレベータには次のような特徴がある。これらが製品の信頼性を考えるうえで重要な前提となる。

(1) 人身を直接扱う公共的機関であり、信頼性、特に安全性の要求が高い。

(a) 運転中故障を起こさないこと。

(b) 故障しても安全側に制御され、ダウンタイムを極小にすること。

(2) 構造的にも機能的にも大形システムであり、故障部分や故障内容によってシステムへの影響程度が異なる。これを大別すれば、重大事故につながり得るもの、運転停止、遅延となるもの、単にサービスの低下にとどまるものなどがある。

(3) 運転中の事故未然防止の考え方で、従来から予防保全をたてまえる系であり、数種類の周期、検査程度の組合せで点検や修理が行なわれるのが常である。

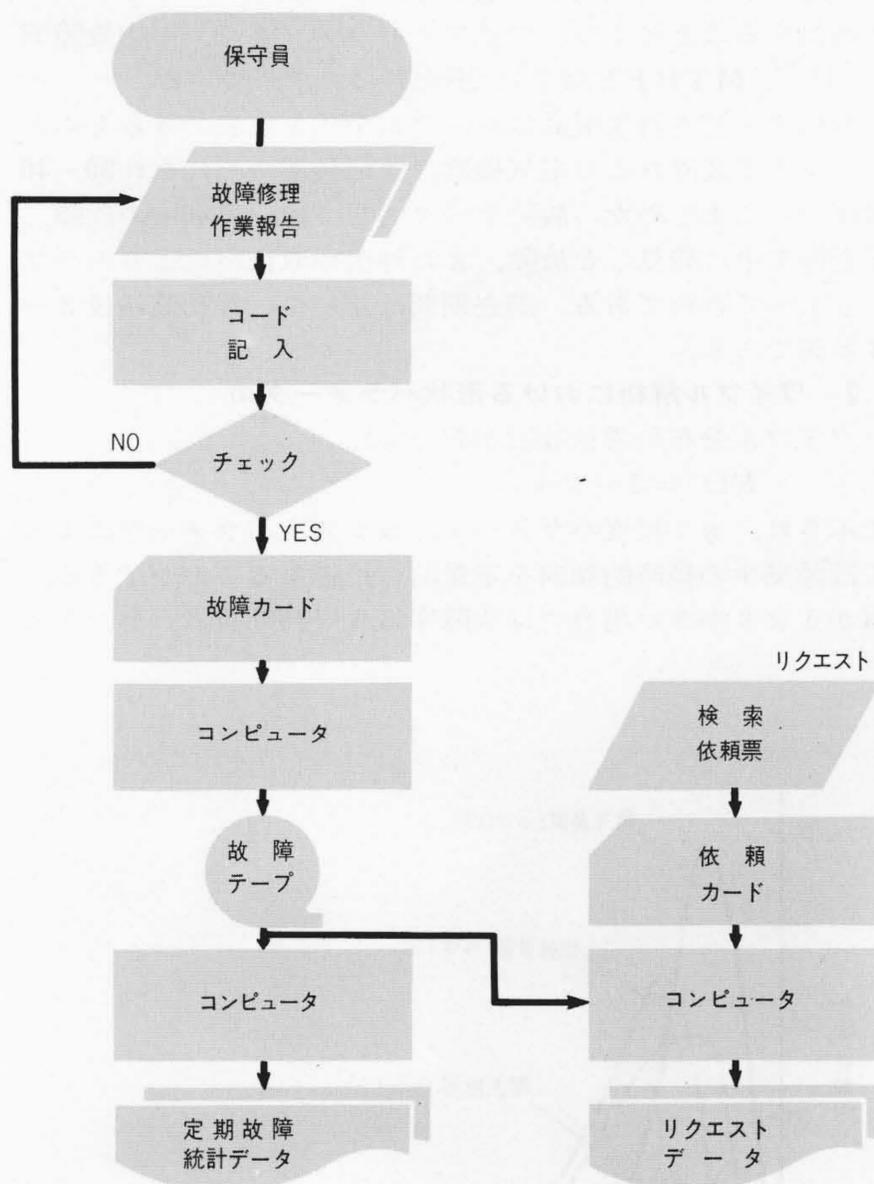


図1 エレベータのフィールドデータ収集、処理システム
定期故障統計データによって、常に状況を監視している。

Fig. 1 Outline of Field Data Collection and Process System for Elevators

* 日立製作所水戸工場

3 製品の稼働実績

3.1 稼働実績の解析方法

鉄道車両の場合とエレベータの場合とでは、保全体制が異なるのでデータの収集方法も違っている。

鉄道車両の納入先はおもに日本国有鉄道や私鉄各社であり、保全是顧客側で行なわれている。新製品の場合、故障情報は事故として通報されるが、従来からの量産品については通常の保全によって回復される場合、メーカーには情報が入ってこない。これらについては日立製作所のサービス員が検車区、電車区、機関区あるいは修理工場などを積極的に巡回して情報を入手することになっている。

またエレベータ関係の納入先は多岐にわたり数も多いが指定された保守会社がすべての納入先について保全を行なっている。したがって、運転中の故障呼出し、保守作業中に発見した不具合情報はすべて入手することができる。

日立製作所では、昭和45年度から保守員の保守報告書をコンピュータにインプットし、統計処理を行なっており、図1はエレベータフィールドデータのコンピュータ処理システムを示したものである。月ごとに管理データをアウトプットするとともに、リクエストにより多目的情報を取り出すことができる。

以上のように、収集した製品稼働中の故障データをワイブル解析することにより、ワイブルパラメータや、平均故障間隔(以下、MTBFと略す)、平均寿命を求めている。

本稿での調査対象製品はシステム全体を代表できるものとして、電子装置および電気機器、機械装置のそれぞれ30~40種についてまとめた。故障データとしては、運転中の故障、保全作業中に発見した故障、また外因や取扱いによるトラブルもすべて含めてある。調査期間はだいたい稼働開始後2~3年間である。

3.2 ワイブル解析における形状パラメータ m

ワイブル分布の累積故障率 $F(t)$ は、

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^m}{\eta}}$$

で示され、 η : 尺度パラメータ、 m : 形状パラメータによって故障発生を経時的傾向を定量的に把握することができる。 m が1より小さい場合には故障率減少(初期故障)形、1より

大きいときには故障率増加(摩耗故障)形となり $m \approx 1$ ではほぼ偶発的に故障発生していることになる。

ここでは解析した結果の m の分布について述べる。

(1) 機器種類別の m の分布

電子装置、電気機器、機械装置におけるこれらの m の分布を示したのが図2である。

電子装置では m の平均が0.7であり、1より小さい場合が約80%となっている。部品、装置に潜在する欠陥が稼働初期、あるいはその後偶発的に故障となるものであろう。

電気機器では m が3以上で広がりが大きくなっている。電気機器には電氣的な故障のほか機械的な要素がかなりあるので、初期故障、摩耗故障の両方が混在しているものと思われる。

機械装置の場合には m の平均が1.3であり、摩耗故障が多くを占めている。

(2) 故障モード別の m の分布

機器故障を故障モードで分類し、モード別にワイブル解析して m を求め、その分布を同様に描くことができる。図3はその場合の二、三の例を示したものである。

同じ故障モードでも対象機器によって故障メカニズムの違うことが推定される。たとえば、ゆるみの場合には $m < 1$ 、 $m > 1$ それぞれにピークがあり、製造時の締付力や寸法などのばらつきによって、初期故障となる場合と疲労または摩耗などに起因している場合の2種類があるものと思われる。

このような場合には、故障モードごとの解析が重要であり、それによって改善の手段を見つけ出すことができる。

3.3 構成部品数とMTBF, 平均寿命

機器の稼働コンポーネントアワー($\sum T$)と故障件数(r)とからMTBFあるいは平均寿命($\bar{T} = \frac{\sum T}{r}$)を求め、これと機器の構成部品数(N)との関係を信頼度水準図($L = N\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$)として電子装置および電気機器、機械装置の場合について図4(a), (b), (c)にそれぞれに示した。

(1) 電子装置

構成部品数(N)とMTBF(\bar{T})とはかなり相関のあることがわかる。装置の機能や規模が違っていても、交通用機器としての使用条件や設計製造技術に一定の範囲があるためと思われる。なお、信頼度水準は年々向上しており、ある年度の

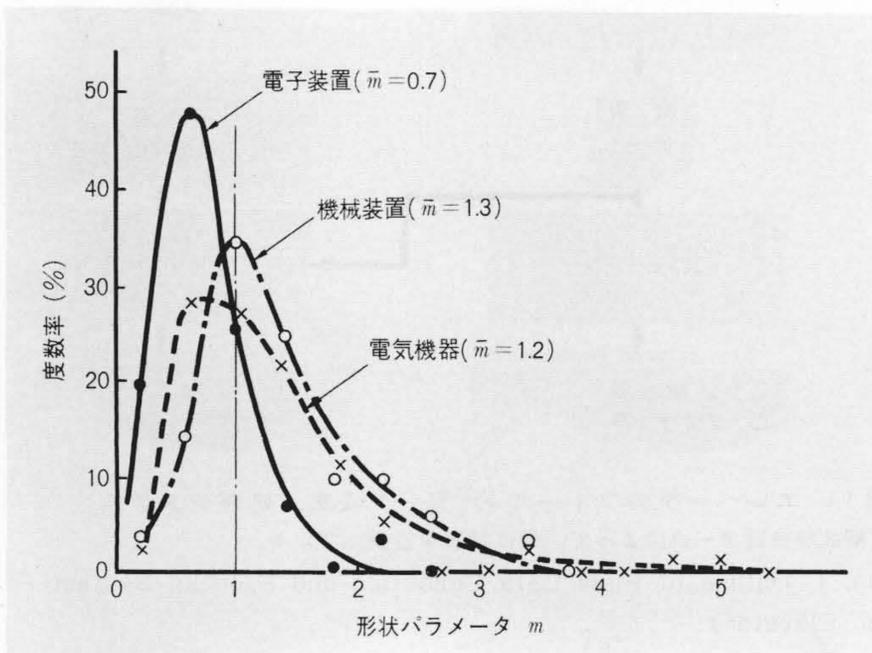


図2 機器種類別の m の分布 $m < 1$ の占有率が電子装置80%, 電気機器45%, 機械装置30%となっている。

Fig. 2 m Distribution in Each Type of Equipment

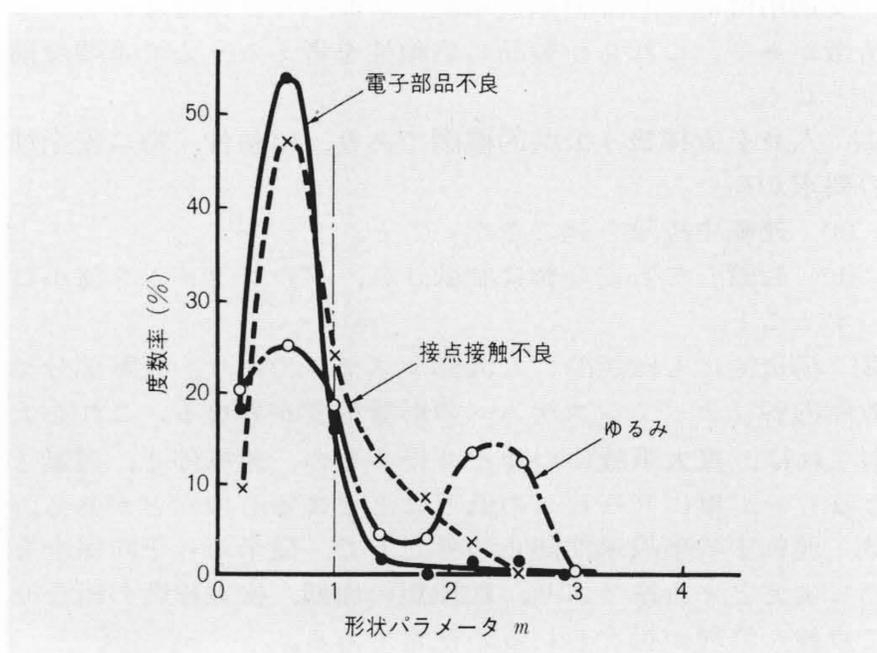


図3 故障モード別の m の分布例 故障モードによって分布に特徴があり、これから故障メカニズムの推察ができる。

Fig. 3 Examples m Distribution in Each Failure Mode

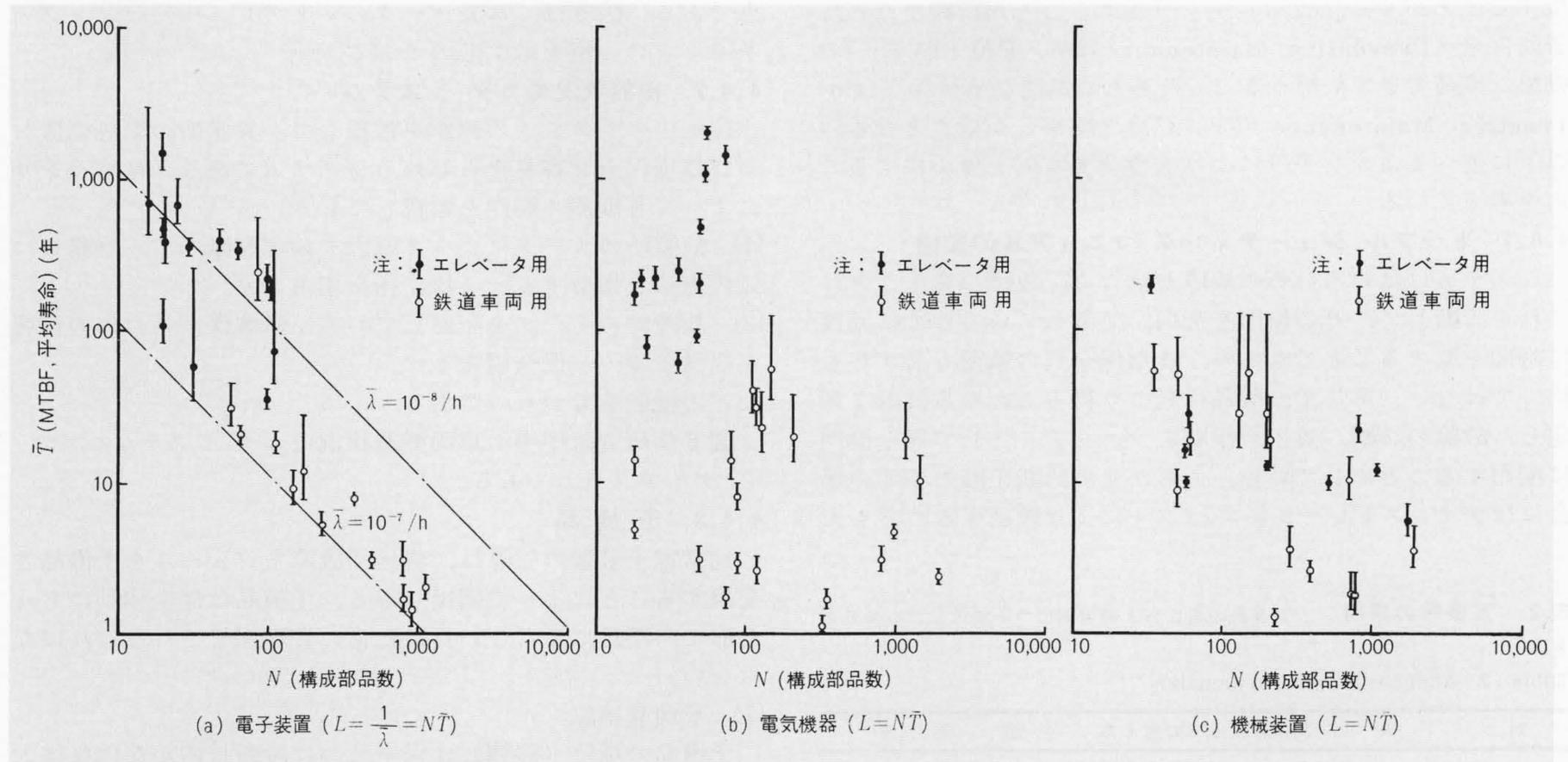


図4 実績信頼度水準図 電子装置では、 N と \bar{T} とは相関があるが、電気機器、機械装置ではあまり明らかでない（注：電気機器、機械装置では $\bar{\lambda}$ の意味が少ないので表示していない）

Fig. 4 Actual Confidence Level Diagram

実績のみを対象とするとこの相関はさらに顕著になってくる。

(2) 電気機器、機械装置

電気機器、機械装置という大きな分類においては、図4(b)、(c)からでは N と \bar{T} との関連はあまり明らかではない。機器の用途、機能によって故障レベルに違いがあり、また部品に対するストレスにも変動があるためであろう。同類の部品でも適用対象によって全く違った故障率となったり、別の故障モードの表われることが経験されている。

交通機関としての特殊性を考慮に入れ、以上述べてきた稼働実績の解析結果から、われわれメーカーは信頼性向上のためにはどのような考え方をすべきかがある程度明確になる。

4 電子系の信頼性管理の重点

4.1 信頼度予測

図2に示したように電子系機器の故障率パターンは、一般に $m \leq 1$ と初期故障形、偶発故障形であり、また図4(a)のように構成部品数とMTBFとは相関がある。したがって、製品の信頼性を故障率やMTBFの尺度で評価できるとともに、部品の直列モデルとして信頼度予測をすることができる。

われわれは稼働中の製品の実績部品故障率を求め、これをベースにして新設計品の信頼度を予測している。また不良要因の改善により逐次信頼度が向上しているので、常に新しい稼働実績から予測用故障率を修正することになっている。

4.2 アセンブルメーカー（部品ユーザー）としての部品管理

(1) 部品選定と負荷低減（ディレーティング）

前述したように、電子系では装置の信頼度は構成部品数に相関があり、部品の信頼度に一義的に支配される。したがって、まず高信頼度部品を選定しなければならない。このために、すべての電子部品に対して認定試験を実施し、必要な信頼度レベルを保証するようにしている。一方、電子部品の信頼度は電氣的、熱的ストレスに左右されるので、各部品に対しディレーティング規準を設けて適用している。

(2) 部品スクリーニングと装置のデバッグ

表1 スクリーニング、デバッグ方法 基本的な考え方を示した。

Table 1 Screening and Debugging Procedure

対象	方法および条件	考え方
電子部品	ヒートショック、高温放置、通電の組合せ。条件は、部品定格にリンク。	部品種類に応じて、発生確率の高い潜在不良を抽出するストレスを与えて欠陥を排除する。製造工程中の弱点除去。
プリント板	温度、振動サイクル (MIL-STD-781Aに準拠)	製造工程中の弱点除去。
装置システム	高温通電	実用条件を模擬したバーンイン。

稼働実績によると、電子装置の故障は故障率減少形であり、稼働初期数ヶ月間の故障の約70%が部品および作業の不良によるという場合があった。この初期故障をあらかじめ除くことにより初期から安定な稼働状態となる。

製品全体にわたってこれらの欠陥を除くことは、サンプルによる信頼度認定試験や受入れ、製造工程管理を強化することだけでは難しく限界がある。

われわれは、部品、装置全体に対して人為的に適切なストレスを短時間加え、潜在欠陥を顕在化させることにより欠陥部分を排除している。

表1は、実施中のスクリーニング、デバッグの方法とその考え方である。

4.3 冗長系とフェイルセーフの採用

交通機関は予防保全がたてまえであり、また電子系は偶発故障形であるので、冗長系により著しく信頼度を向上させ、システムの安全性を確保することができる。ただ冗長系の適用は、信頼性、安全性および保全性とのトレードオフが必要であり、表2の考え方でいろいろの方式がとられる。また、回路やサブシステムそのものにも故障時安全側に制御されるようなフェイルセーフ機能をもたせるようにしている。

4.4 保 全

稼働実績によると、電子系では突発的、偶発的に故障が発

生することが多く、故障兆候を予知することが困難なため、予防保全（Preventive Maintenance以下、PMと略す）の効果は期待できず故障が起こったあとの迅速な事後保全（Corrective Maintenance以下、CMと略す）が重点となる。以下に述べるような手段によりダウンタイムを極小にすることを考えている。

4.4.1 トラブルシューティングマニュアルの整備

システムにはいろいろな故障が起こる。故障の発生ごとにこれを診断して、その原因を究明、処置しているのでは回復に時間を要することでもあり、また保全員の技術も必ずしも均一ではない。そこで、製品に起こり得るあらゆる故障を想定し、故障の診断、処置の手順をマニュアルとして保全部門に配布することにしている。あらかじめ診断手順の不明の場合にはデモンストレーションテストにより確認することも大

事である。図5は、エレベータのトラブルシューティングチャートの一例を示すものである。

4.4.2 機器状況モニタシステム

運転中のシステムの動作を監視して、異常時の緊急処置および修理保全を容易ならしめるシステムである。常時センサによって各機器の動作を監視しておき、

- (1) 故障時のデータによって原因を論理判断して、乗務員に処置方法を指令する……操作指令用モニタ。
 - (2) 故障時のデータを記憶しておき、修理保全のための情報を提供する……保全用モニタ。
- などの機能をもつものである。

図6は研究試作中の車両機器状況モニタシステムのブロックダイアグラムである。

4.4.3 予備品

通常電子装置の故障は、現地で故障モジュールを予備品と交換することによって回復し得る。予備品は保全体制にあった形で、不足にならない員数が常に管理保管されなければならない。

(1) 予備品単位

予備品の単位（形態）は保全部門に診断技術がなければ大きくしなければならない。これは不経済であるばかりでなく緊急の取扱いに不便な点もある。したがって、予備品は保全部門で故障部位を判別し、かつ容易に交換できる最小モジュールでもつのが原則となる。

(2) 予備品保有数

適正保有数は、期待故障数と要求される品切れ率の関係から統計的に求めるのが合理的である。図7は消耗する予備品保有数の求め方を、図8は修理可能な予備ユニット保有数の求め方をそれぞれ示したものである。

新設計品では期待故障数を予測することになるが、予測と実際とに偏差があり、不足の場合には混乱する。従来製品の予測と実績を対比した結果、予備品設定のための部品故障率としては、90%信頼区間の上限値を使用するのがよいように思われる。

表2 冗長系の採用 冗長系の考え方と適用例について示したものである。

Table 2 Application of Redundancy

対象	冗長方式とその考え方	適用例
故障が重大事故につながり得るもの。	2 Out of 3系：多数決判定でシステムダウンを起こさせない。	自動列車停止装置、自動列車制御装置
	並列系：故障判別し、セーフ側に制御する。	自動列車停止装置、自動列車制御装置照査部
	バックアップ系：主系の故障検出し、簡単な系で保護する。	エレベータ速度指令部
部分故障によってシステム全体の機能が失われるもの。	システム二重系あるいは待期系：オンラインで動作しておき、故障時瞬時切り換える。	車両運行管理システム
	バックアップ系：高度なシステムが故障したとき、サブシステムで単純な制御をする。	エレベータ群管理システム

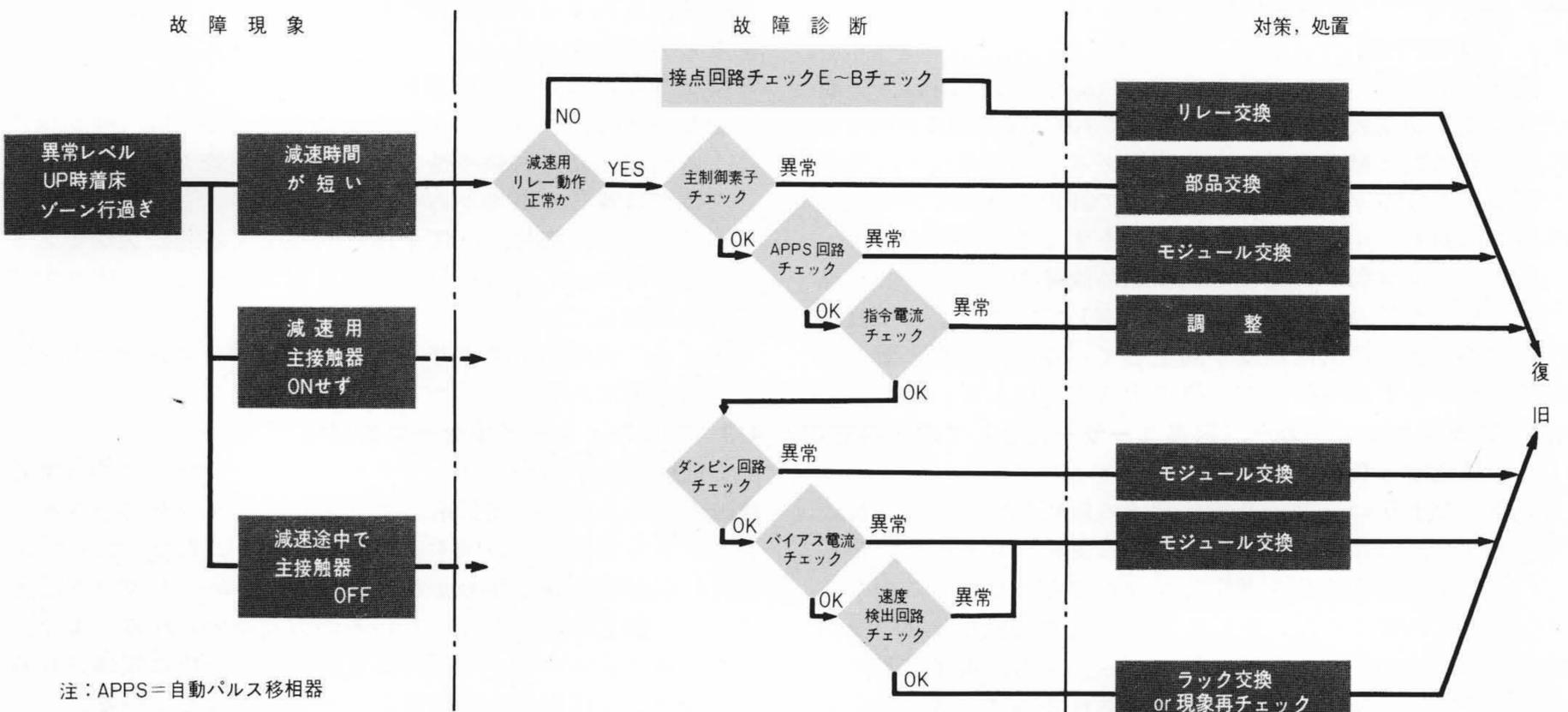


図5 エレベータのトラブルシューティングチャートの一例
Fig. 5 An Example of Trouble Shooting Chart for Elevators

単純なチェックのくり返して故障診断がだれにでもできる。

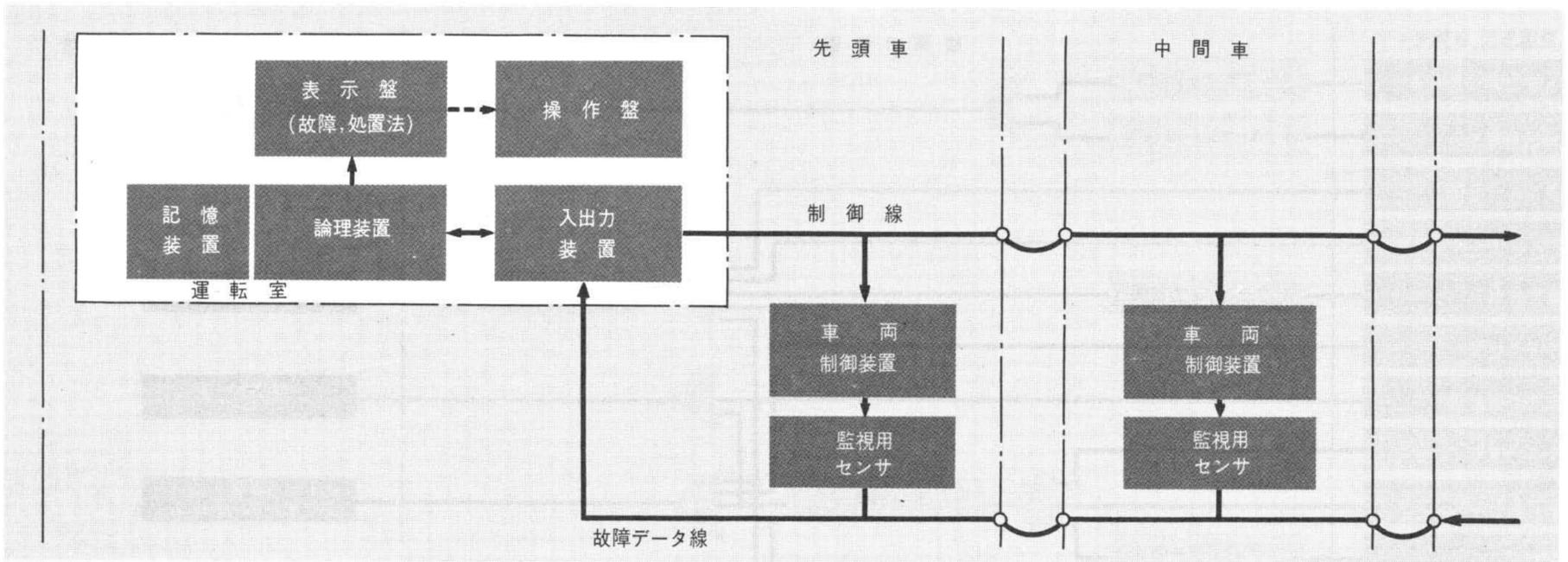


図6 車両機器状況モニタ システム 故障時、論理装置から表示盤への指令によって乗務員が緊急操作する。

Fig. 6 Monitoring System of Trend of Equipment for Rollingstock

5 電気機械系の信頼度管理の重点

5.1 摩耗故障に対する信頼度予測が重要

電気機械系の稼働実績では、機器や故障部位によって故障率パターンがまちまちであるが、特に $m > 1$ の摩耗故障の場合が多い。また構成要素と平均寿命との関連も明らかでない。したがって、電子装置のようなMTBFの評価や直列モデルによる予測は一般には意義が少ない。それゆえに耐用寿命で評価して摩耗故障の予測を行なうことが重要である。

電気機械系では、電子系に比べて(a)部品、材料の強度のばらつきが大きいこと、(b)使用中のストレス要因が多く、変動も大きいことをしばしば経験している。そのため、故障に共通性が少なく、製品、部品それぞれの使用条件で吟味しなければならない。

したがって、摩耗故障の予測には、

- (1) 類似製品の稼働実績データ
- (2) 耐久性試験データ

の二つが重要で、特に新設計品に対しては耐久性寿命試験が絶対に必要である。その場合、実用条件でのあらゆる場合に対して、しかも強度ばらつきを十分考慮した安全余裕に対する検討が必要である。なお、これに対しては十分な疲労、摩耗、腐食試験設備などを要することは言うまでもない。

5.2 故障の影響解析による改善

前述のとおり、故障には重大事故に至る可能性のあるものから単にサービス低下にとどまる程度のものまである。われわれの故障の影響解析は致命度の高い、特に安全性に影響する故障をフェイルセーフ化し、バックアップ機能を強化することに重点をおいている。電気機械系では確率論的な尺度での信頼度評価が難しいので、特にこの手法が信頼性、安全性の向上に対して設計段階での有力な手段となる。

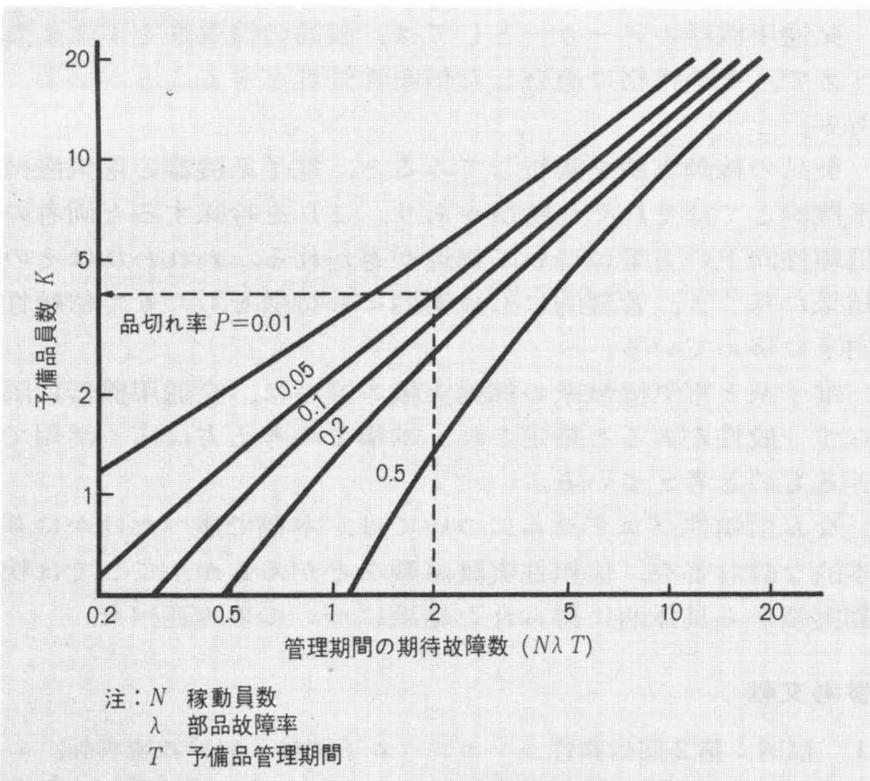


図7 消耗部品予備品数の求め方 $N\lambda T$ と P から必要な K を点線のように求められる。

Fig. 7 Diagram Illustrating How to Seek the Number of Consumptive Spare Parts

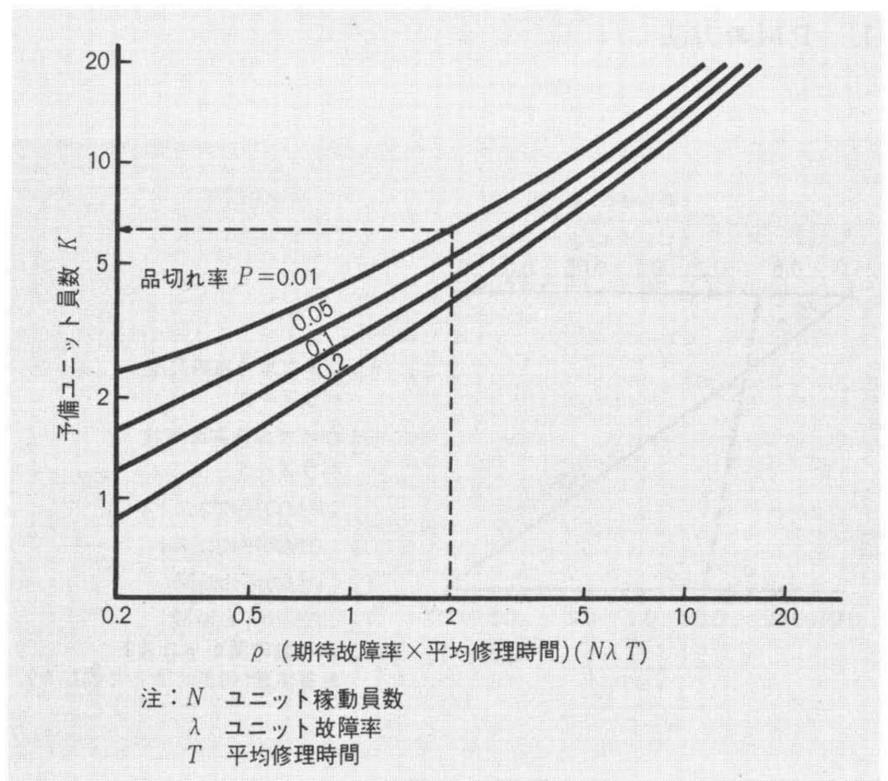


図8 修理可能なユニット予備品数の求め方 $N\lambda T$ と P から必要な K を点線のように求められる。

Fig. 8 Diagram Illustrating How to Seek the Number of Repairable Spare Units

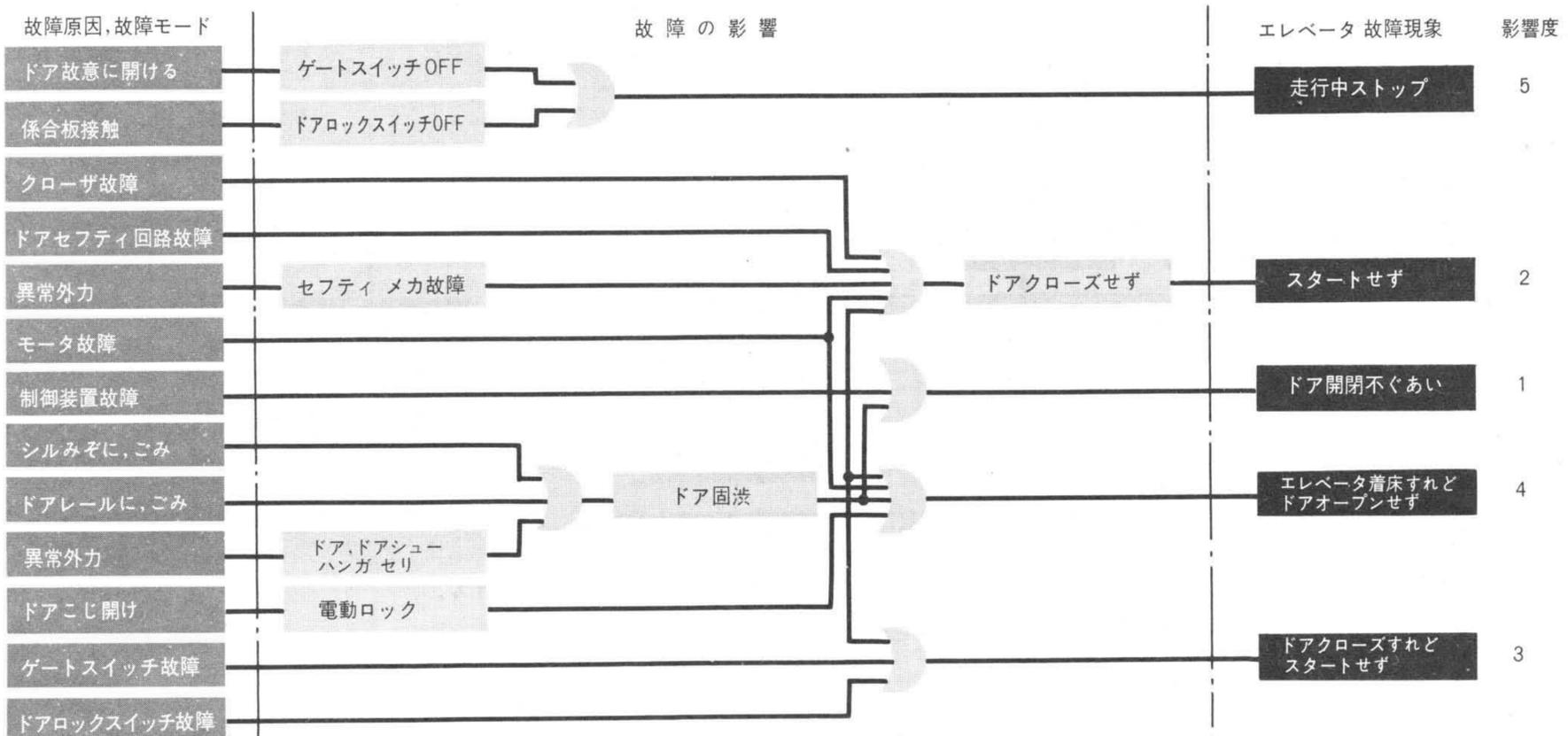


図9 ドア関係故障のFTA(Fault Tree Analysis) 故障の影響度および発生率の高いものから重点的に対策する。

Fig. 9 FTA(Fault Tree Analysis) of Door Failures

実施の方法としては、FTA (Fault Tree Analysis) に類するものである。結果としてシステムに最終的に起こる現象を分類して影響度を配分し、これが起こり得る原因を機器、部位にあてはめつつ致命的問題を見究め、これに改善のアクションをとるものである。図9はエレベータ ドア関係故障のFTAの一例を示すものであるが、高い影響度となる故障機器、故障モード中、発生率の高いものから重点的に対策を講ずることになる。

5.3 保全

要素別のワイブル解析から故障パターンをみても、形状パラメータ $m > 1$ の場合が多いので、適切な点検、修理を行えば故障の未然防止ができる。すなわち、PMによって使用信頼度の向上を図り得る。

(1) PMの方法

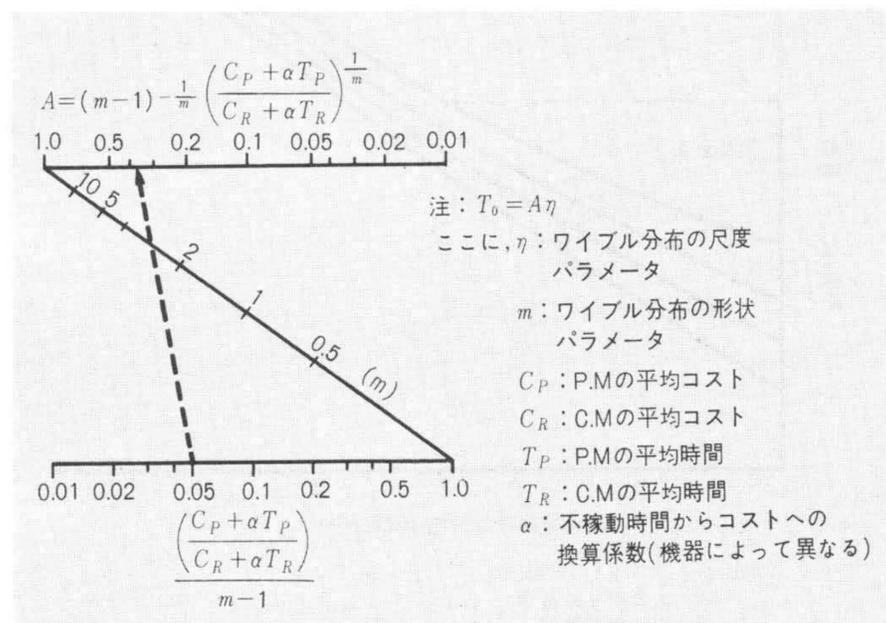


図10 適正オーバーホール周期 T_0 を求めるノモグラフ

$\frac{C_p + \alpha T_p}{C_r + \alpha T_r} / m - 1$ から点線のように A を求め、 $T_0 = A\eta$ から T_0 を算出する。

Fig. 10 Nomograph Showing How to Seek Adequate Overhaul Period

機器の稼働実績から必要項目を決め、定期点検を行なって故障兆候部分を修理、交換することになる。慣例や感覚的に点検や調整の範囲を広げるとかえって信頼度を低下する場合もあるので注意しなければならない。

(2) オーバホール周期

機器を新しい状態に戻すような大改修、オーバーホールの周期は機器の不稼働による損失と実際の保全コストとのトータルコストが最小となるように決めるのが合理的である。稼働実績のワイブルパラメータとPM、CMに必要なコストおよび不稼働時間による損失とからこの適正周期 T_0 を求めることができる。図10は、 T_0 を求めるためのノモグラフである。

6 結 言

交通用機器のメーカーとしては、製品の特殊性をふまえたうえで、その性格に適合した信頼性管理をすることが必要である。

製品の稼働実績を解析してみると、電子系機器と電気機械系機器とではそれぞれ特徴があり、これを吟味すると両者の信頼性向上の方策について相違が導かれる。われわれはその結果に基づき、管理的にも技術的にも特徴をもたせて信頼性向上に努めている。

電子系と電気機械系の稼働実績の違いは、交通用機器に限らず一般性があると推定され、本稿での考え方は広く活用できるものと考えている。

なお信頼性プログラムについては、本稿で述べたほかに基本的な設計審査、信頼性実証試験などがあるが、ここでは稼働実績から具体的に得られた結果についてのみ述べた。

参考文献

- (1) 福岡：第2回信頼性シンポジウム予稿集 343「鉄道車両、エレベータの機器の稼働実績からみた保全法」(昭-47)日科技連
- (2) 日科技連：「FMEA/FMECAの解説」(昭-48)
- (3) 大前、森村：「待ち行列の理論と実際」(昭-37)日科技連