

鉄道システムにおけるライフサイクル

西江 勇二, 福岡 博

1. はじめに

ハードウェアとしての鉄道システムは、人類の発明した有用な道具の1つとしてその経済・文化・技術の発展にさまざまな影響をおよぼしてきた。またそのネットワークは、人類が構築したハードウェアの中では最も大規模なものつであると考えられる。

ここではそのような鉄道の歴史と、大規模であるがゆえに特に重要な課題となる設備投資および保全についてライフサイクルという視点からとらえて述べてみたい。

2. 輸送機関としての鉄道

鉄道の歴史はイギリスにその源を発し、貨物輸送については1825年に Stockton-Darlington 間の約40kmで開始された蒸気機関車による石炭輸送が、また旅客輸送については1830年に Liverpool-Manchester 間約50kmで開始されたものが最初とされている。わが国においては、1872年（明治5年）にイギリス人技師の指導により新橋（現在の汐留）—横浜（現在の桜木町）間29kmが開通したのが最初である。

鉄道はその誕生以来すでに160余年、わが国においても110余年の歴史があるわけであるが、その間産業革命の進展や戦争等による膨大な輸送需要に支えられ、世界的な発展をとげた。この間の鉄道の歴史は速度向上や安全性の向上等に関する技術革新の歴史でもあった。初期の機械工学や土木工学は鉄道工学と一体のものであり、車軸を対象とした疲労現象の解明や応力解析技術、橋梁の架設やトンネルの掘削技術、信頼性工学を導入した予防保全方式等は鉄道の分野で大きく発展した。

その後、輸送環境は自動車、船、航空機等の他の輸送機関との競合時代に入り、全盛期に比較すると鉄道の輸送シェアはかなり減少してきている。しかし1964年（昭和39年）の東海道新幹線の開業後その安全性、大量輸送

性、高速性等の特性が見直され、フランス国鉄のTGV（1981年開業）をはじめとして、各国で高速鉄道網の整備が進められつつあり、さらに最近ではわが国と西ドイツとを中心に次世代の超高速鉄道としての磁気浮上式鉄道の実用化に向けての研究開発が盛んに行なわれている。

このように輸送機関としての鉄道のライフサイクルは、鉄車輪・鉄レールによる粘着駆動方式と蒸気機関の発明に支えられた黎明期、旅客・貨物の大量輸送機関として産業や文化の発展に大きく貢献した発展期、他輸送機関の発達に押されて輸送シェアが減少した衰退期を経て、最近では技術的あるいは経営体制上のシステムチェンジを図ることによるあらたな復興期を迎えようとしている。

3. 鉄道事業の経営

企業経営という側面から鉄道事業をとらえれば、その特徴は新線建設とその運用に莫大なコストを要する装置産業であるという点にある。鉄道建設にともない、その建設費による直接的な経済効果のほか、人的物的流動の活性化による周辺地域の経済におよぼす付帯的な経済効果が生まれる。一方でいちど建設した鉄道はその需要の変化に対応した臨機応変のシステムチェンジを行なうことが難しく、仮に赤字路線であっても容易には縮小・廃止が困難となる。さらに鉄道事業の運営は特にその保全においてどうしても労働集約的にならざるを得ず、他の産業に比較して保全コストの占める割合が非常に高い。

このように鉄道の建設・運営は国策的・公共投資的色彩が強いため、多くの国においてその国の基幹的鉄道網の経営は国営企業に任されることが多かった。しかし鉄道が独占的輸送機関の地位を占めていた時代はともかく、近年の競争場裏におかれた輸送環境の中では、よりニーズに対応した効率的で小回りが利き競争力のある鉄道経営が求められることとなった。そのためわが国においては昭和62年4月に日本国有鉄道からJRグループへの民営・分割化が行なわれたわけである。

にしえ ゆうじ、ふくおか ひろし

勲鉄道総合技術研究所 情報・制御システム研究室

〒185 国分寺市光町2—8—38

4. 設備投資とライフサイクルコスト

4.1 設備のライフサイクル

鉄道システムとして必要とされる設備は基本的には線路と車両であるが、このほかに停車場、保安装置、防護設備、電化設備、情報・通信設備、さらに各種設備・車両の保全を担当する保全基地等が必要となる。

たとえば鉄道車両の新製の場合には、その計画段階においてまずその必要性について検討し、次に車両運用計画等にもとづき車両形式および両数を決定し、さらに経営上の効果等を検討した上で投資の可否を決定したのち、実際の設計や発注に移る。新製された車両は試運転期間を経たのち、実際の運用段階に入り、車両の運転にともなう運転人件費、エネルギー費、保全費、支援費等が必要になる。また使用期間中に用途の変更が必要とな

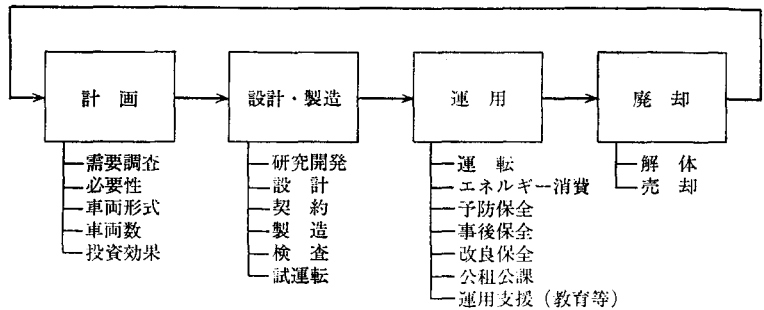


図1 鉄道車両のライフサイクル

った場合には改造工事を、さらに経年による老朽化や陳腐化が生じた場合には改良工事を行なうかあるいは廃車とする (図1)。

このように設備の新設、運転、保全、更新、廃却等のライフサイクルの各過程においては膨大な費用、要員とエネルギー消費をとともなう。たとえば新線建設の場合その距離や地域等によっても異なるが、初期コストが数千億から数兆円規模の投資になることが珍しくなく、その

ライフサイクルにわたるコストの総額であるライフサイクルコスト (Life Cycle Cost : LCC) は初期コストの数倍から十数倍にまで達するといわれている (図2)。

4.2 ライフサイクルコスト

設備の新設あるいは更新時には、経済性や経営戦略等により設備に求められる各種の要件について、それらを最適化する代替案を選択するという意思決定問題が生ずる。このような問題をシステムティックに取り扱い、意思決定の支援を行なう活動として、ライフサイクルコスト (Life Cycle Costing : LCCing) と呼ばれる手法がある。LCCingは1980年代に米国の国防総省において物資の調達方式として開発され、その後戦略的意思決定のための経済手法として、軍・諸官庁や民間において広く活用されている。わが国においても(社)日本プラントメンテナンス協会 [1] や国鉄等が委員会を設けて LCCing の検討を行ない、その効用を提唱している。

設備の一生の生涯のコストはさきに述べた LCC であるが、これに対し LCC を投入することによりその設備に期待する効果あるいはその設備がもつべき使命、機能、性能をシステム有効度 (System Effectiveness : SE) と呼ぶ。LCC

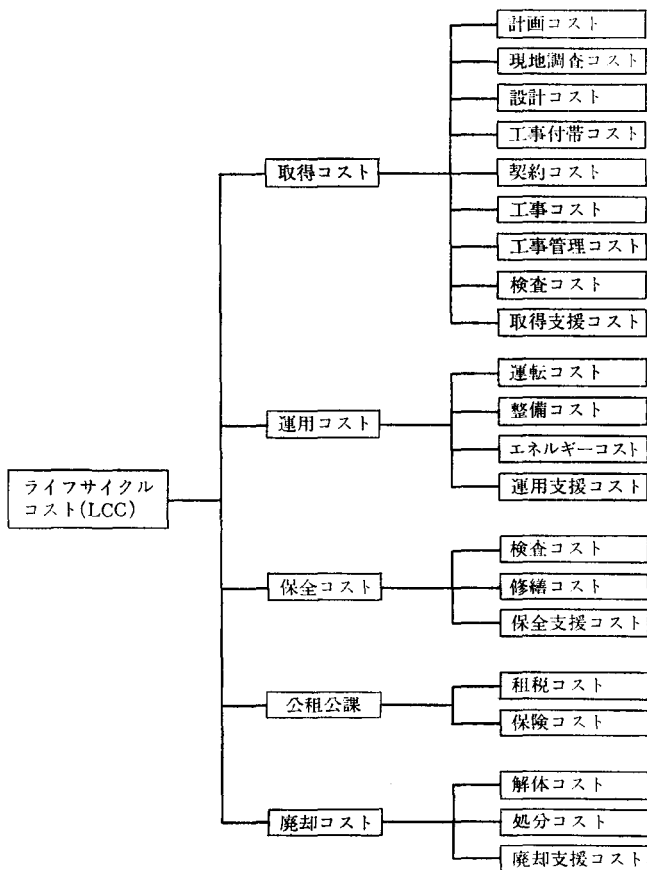


図2 設備のライフサイクルコスト

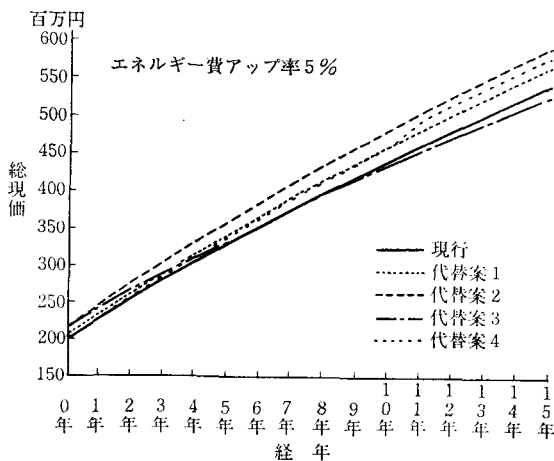


図3 空調システムのLCC総現価の計算例
出所：参考文献 [2]

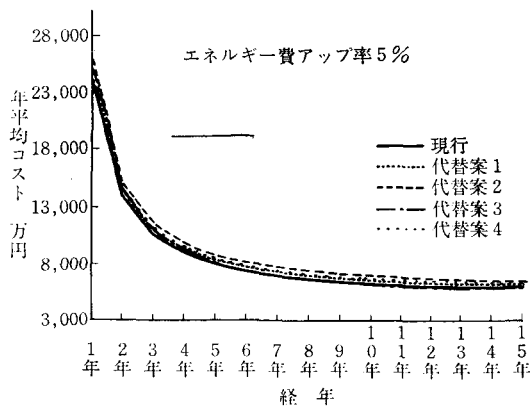


図4 空調システムのLCC年平均コストの計算例
出所：参考文献 [2]

ing は、設備のような有形資産の新設、運用、保全、更新、廃却等の各段階における最適代替案の選択を目的として、それらのLCCやSEの評価にもとづく各種トレードオフを徹底して行なうことによるシステムティックな意思決定手法である。

4.3 空調システムへの適用事例

国鉄時代の昭和59年度から61年度にかけて部外の有識者を交えたLCCingに関する委員会を設置し、その一般的手法の開発と空調システムをケーススタディとした研究を行なった[2]。ケーススタディの対象としたのは、芝弥生会館（国鉄共済組合のホテル）の空調システムであり、いくつかの代表的なシステム構成と現行のシステムとを代替案として設定した。

LCCとしては、それらの取得コストや運転要員のコストの見積りのほか、HASPと呼ばれる動的熱負荷計算プログラムによる詳細なエネルギーコストの予測、CAMMと呼ばれる国鉄の機械設備関係の保全データベースを利用した保全コストの予測等を行なうとともに、物件費等の上昇率の予測値を変化させることによる感度分析を行なった。これらのコストは、LCCの累計を現在価値で表わした総現価と、これを資本回収係数を用いて年平均値に換算した年平均コストとについて、耐用年数内にわたってシミュレーションを行なうことによって評価した（図3、4）。

また、SEについてはこれまでLCC節減額のように金額的なものを扱うことが多かったが、空調システムのように人間の受ける感覚が重要な設備については快適性や美観性のように定性的な評価項目を扱う必要がある。そこでこれらのSEを定量的に評価するための手法を検

討した[3]。ここではまず評価項目を階層構造で表現し（図5）、そのウェイト（重要度）の評価をAHP（Analytic Hierarchy Process：階層化意思決定法）[4]により行なった。AHPは対象とする意思決定問題の最終目的を最上位の階層としてとらえ、各階層ごとにその上位の項目に関する下位の項目間の重要度を一対比較し、得られた一対比較行列の固有値および固有ベクトルから各項目のウェイトを算出し、階層構造全体を総合して最下位の各項目のウェイトを求める手法である。また各代替案の評価は各評価項目ごとに作成したスコアリング基準表から得られた点数と各評価項目のウェイトをかけてそれらの総和により優劣を評価した。さらにコスト対効果の指標であるコスト有効度（Cost Effectiveness： $CE=SE/LCC$ ）を用いた評価も行なった。

LCCingはすでに欧米諸国の諸官庁の入札方式に採用されており、鉄道関係でもスウェーデン国鉄が新型車両であるX2電車の入札に採用した例がある。契約方式にLCCingを導入した場合、当然受注者側が積算して提示したLCCの見積額の保証が必要となるが、受注者側にとっては新たな積算事務が増える上、その精度の保証についてはリスクも大きく、発注者側が一方的にこの方式を導入したのでは受け入れられにくい。そこで、受注者側のインセンティブが働くような対象機器やそのレベルを考慮した上で、Warranty/Guarantee 契約を結ぶことが必要である。

5. 鉄道車両の保全

5.1 鉄道車両の保全体系

先に述べたように鉄道事業の経営の中でその保全は大きな負担となっている。その営業経費に占める割合は昭

和54年度の時点で約30%にも達している。(現在はこれより縮小している)

鉄道車両の保全体系は、走行距離および前回検査からの経過時間により定めた周期にもとづく定期検査方式の予防保全(時間計画保全, Time Based Maintenance:

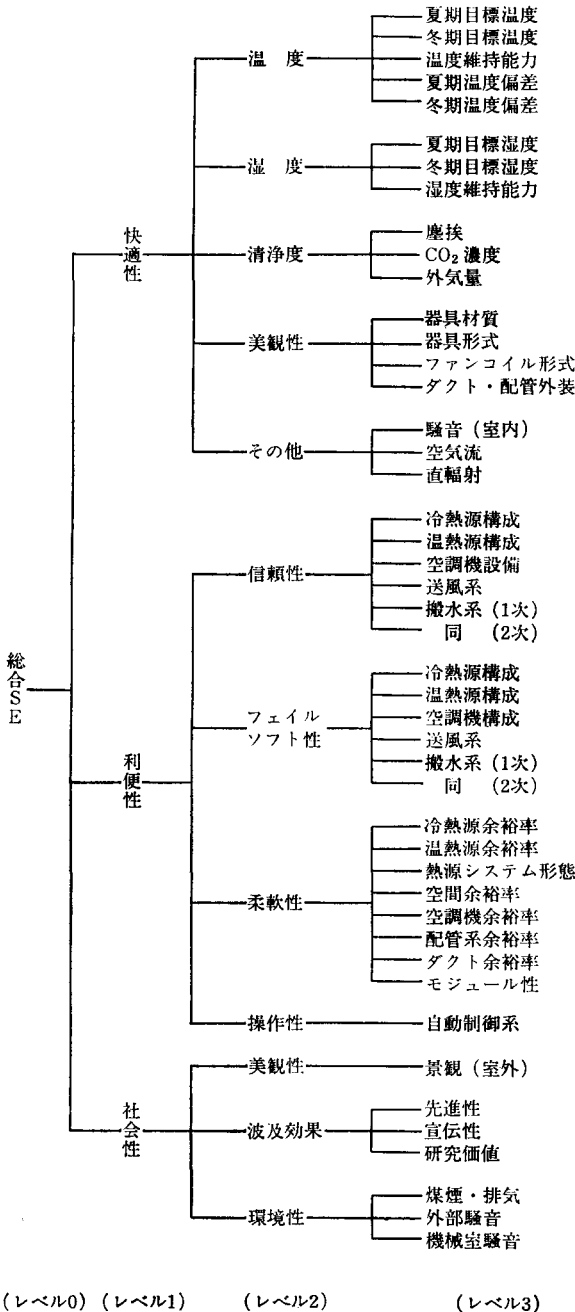


図5 空調システムのSE評価項目の階層構造
出所: 参考文献 [2]

TBM) を基本としている。図6はJRグループの在来線電車の保全体系を示したものである。これからわかるように、数日周期で車両基地において行なう軽微な外観・機能検査から、数年周期で工場において行なう解体検査(主としてオーバーホール)まで階層的な保全体系が組まれている。

鉄道車両は各種電気機器・機械部品・鋼体等の機器・部品の集合体であって、それぞれの機器が固有の故障傾向をもっている。それゆえ、各機器ごとに最適な保全周期が存在するはずであるが、実際には地上設備と異なり鉄道車両は移動体であり、営業車として使用されるスケジュールの合い間に計画的に保全基地や工場へ移送して保全を行わなければならないため、保全周期は車両単位で設定せざるを得ない。そこで、各定期検査のレベルに合わせた機器の検査、オーバーホール、取り替え等の設定がなされている。

最近一般産業界ではプロセス産業を中心として設備診断技術(Machine Condition Diagnosis Technique)が発達し、保全方式もこの技術を活かして定量的に測定された設備の状態に応じた最適な保全を行なうという状態監視保全(Condition Based Maintenance: CBM)がTBMに代わって採用されつつある。移動体であるという困難さはあるものの、鉄道車両においてもこのような方式の導入の可能性を探るため、各種の車両診断技術やその自動化について現在研究を進めているところである [5]。

| 周期 | 2日 | 3月 | 3年 | 6年 |
|----|------|------|------|------|
| 名称 | 仕業検査 | 交番検査 | 要部検査 | 全般検査 |
| 箇所 | 車両基地 | 車両基地 | 工場 | 工場 |

[内容]

- 仕業検査: 外観検査および消耗品の補充取り替えを主体とした検査で48時間を限度とする。
- 交番検査: 外観検査, 機能検査. 90日または25,000 km を限度とする。
- 要部検査: 特定主要部分の解体検査. 36カ月または40万km(新製後は48カ月または40万km)を限度とする。
- 全般検査: 主要部分を取り外しまたは解体のうえ全般にわたって行なう検査. 72カ月または80万km(新製後は84カ月または80万km)を限度とする。

図6 在来線電車の保全体系

5.2 鉄道車両の寿命

前節で述べたように鉄道車両の各機器は個別に予防保全が行なわれるため、車両全体の廃却は基本的には車体等の構造体の老朽化や機能面での陳腐化が基準となる。電車の場合規程上の耐用年数は20年であるが、上記の理由により実際にはそれよりも早めに取り替えられる場合が多い。ここで最適取り替え時期の選定は重要な問題であり、これまでも MAPI 法により検討が行なわれていたが、現在 LCCing 手法の導入を研究中である。

また、車両用機器の保全は基本的にはオーバーホールを前提としているため、各機器は設定されたオーバーホール周期で信頼度の変化を繰り返しながら、車両の寿命に達するまで使用されることになる。

車両の取り替え時期の選定や、最適な保全周期あるいは保全方式の選定、さらに LCCing による経済性評価等を行なうためには、個々の車両用機器の運用時の信頼度に関するデータが不可欠であるため、次節で述べるようなフィールドデータを用いた信頼度解析に関する研究が必要となる。

5.3 信頼度解析システム RAFID

鉄道車両は、使用条件・環境が多様なために実際の運用時の信頼度を把握することが難しい。これを明らかにするには、フィールドデータを直接解析することが一番の近道であるが、フィールドデータ解析では通常の実験室データの解析と違って、データの打ち切り形式やその精度等に関する困難な問題がある。鉄道総研では従来からフィールドデータを解析することにより現場の環境下の信頼度を把握する研究を行ってきた [6]。最近では、部分的に修理を繰り返して使用する場合（小修理：Minimal Repair）の故障を解析することが可能となった [7] ため故障データの数が飛躍的に拡大し、データの精度の課題はデータの数を多くすることで補えるようになった。また従来は難しかった機器単位の信頼度解析も可能となった。現在当研究所で開発している RAFID (Reliability Analyzer for Field Data) [8] はこれらの研究成果を取り入れたもので、経営情報システムの出力である在来線車両の保全統計データ（故障実績・検査実績・使用実績）を用いて、実際に運用中の車両の信頼度を解析するものである。

5.4 オーバーホール周期における信頼度の例

RAFID による解析の例を以下に紹介する。図7は大都市通勤線区用直流電車のある電動機のオーバーホール周期の故障率関数を示したものである。この電動機は摩耗

型の故障傾向を有していることがわかる。図8は同じ直流電車の弁類のオーバーホール周期の故障率関数を示したものである。この弁類は前述の電動機と違って初期故障型の故障傾向を示している。これは、オーバーホール後の弁の「なじみ」が大きき要素になっていることを示唆するものと考えられる。図9は別の直流電車の放送装置の故障傾向を表わしたものである。故障傾向は偶発型になっている。放送装置は電子機器で構成されており、この電車の場合は現在非常に安定した状態にあると言える。

5.5 オーバーホールを行なわない機器の例

新幹線電車の車軸はオーバーホールを行なわない機器の例 [9] である。車軸は安全性を考える上で非常に重要な機器の1つであり、非常に厳重に検査を行なっている。すなわち、1年程度の周期で磁粉探傷と呼ばれる方法で疲労傷（磁粉傷と呼ぶ）の検査を行ない、限度値以上の大きさの傷を発見すると危険なレベルへ達する前に新しいものと取り替えている。この疲労傷による車軸の廃棄に関する信頼度解析を行なった結果が図10である。故障率関数が走行距離に関してほぼ直線的に増加している様子がわかる。

車軸の取り替え要因としてはこの磁粉傷の他に、異物の衝撃による擦傷・溶着、プレスによる車輪取り替え時に発生するかじり、軸受のはめ合部に発生するクリープ等がある。これらの傷に関する信頼度解析を競合モデル (Competing Risk Model) を用いて行なうと、図11のようになる。このように非常に多くの車軸の寿命が、これらの車軸の劣化以外の要因によって決定されていたことがわかる。しかし、現在ではこれらの傷は保全方法の変更や取り付け方法の改良などにより、減少させる方向で改善がなされている。

6. おわりに

鉄道システムのライフサイクルについて歴史的および経済性の観点からとらえて述べてきた。鉄道には今後ますますシステムティックな問題解決手法の必要性が増大すると考えられ、お気づきの点について読者諸兄のご助言を賜われれば幸いである。

参考文献

- [1] 製造プラントのメンテナンス技術—ライフサイクル・コスト—に関する調査研究報告書、(社)日本プラントメンテナンス協会 (1986)
- [2] 駅空調システムに関するライフサイクルコスト低減の研究、昭和59~61年度報告書、日本鉄道技術協会

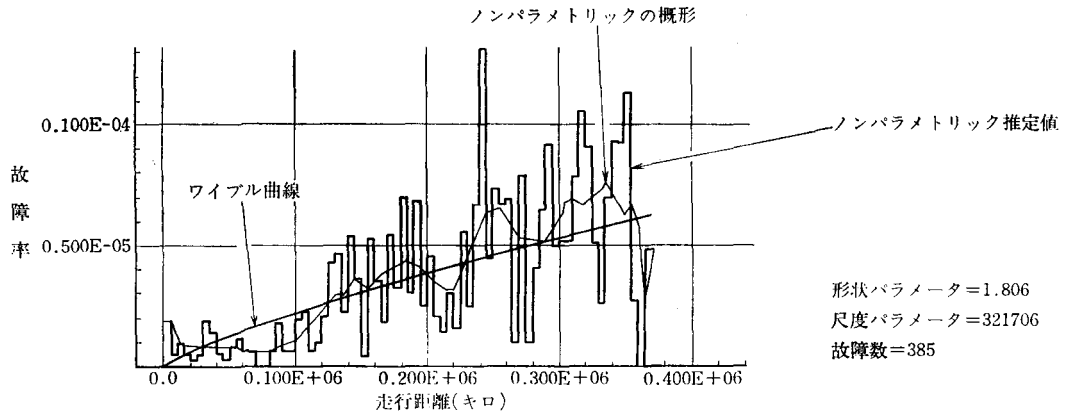


図 7 電動機の故障発生傾向

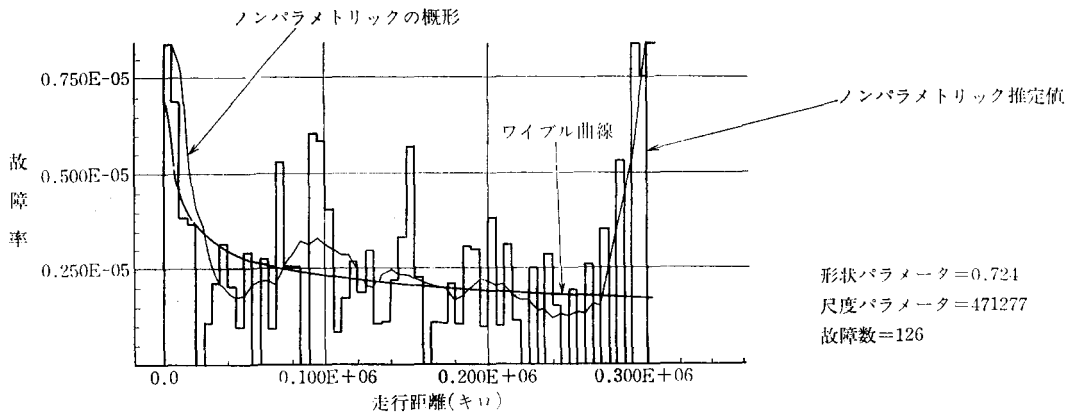


図 8 弁類の故障発生傾向

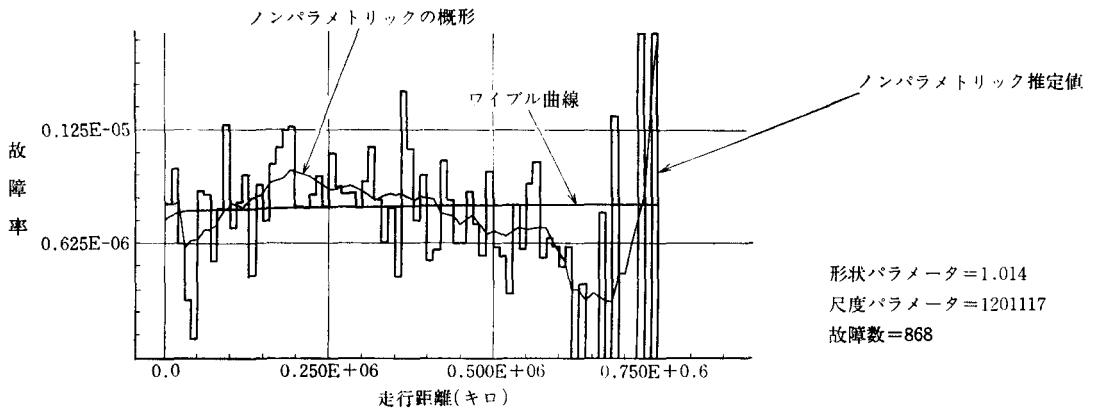


図 9 放送装置の故障発生傾向

(1985~1987)

- [3] 西江勇二, 他: AHP (階層化意思決定法) を用いたシステム有効度の評価手法, 鉄道技術研究所速報A-87-100 (1987)
- [4] 刀根薫: ゲーム感覚意思決定法, 日科技連(1986)

- [5] 西江勇二: メンテナンス領域へのAIの応用, 機械の研究, 40巻, 2号, 養賢堂(1988)
- [6] 阿部俊一: 短期間の観測データによる現用機器の寿命推定法, 鉄道技術研究資料, 25巻, 12号, pp. 20~25 (1968)

