

動力車の予防修繕回帰の最適化について

家長吉千代*・渡部 典**

現在国有鉄道において動力車に対して行っている予防保全の最適間隔の決定方法として、取替モデルの一例を紹介する。最適保全間隔の評価は走行料当りの保守関係費で行い、これを最小ならしめる修繕回帰料を求めるわけであるが、まず国鉄の動力車の保全の特質を説明し、これに適合するモデルの設定とその解を述べる。

1. 動力車保全の特質

1.1 構造上の問題

動力車の構成部品は多種多様であり、その寿命・損傷の様相・検査修繕の方策にも幾多の差異があるので、動力車全体の保守を論ずるのに、単一のモデルにあてはめるのは困難であって、部分的によく適合するようなモデルを設け、これらの結果を総合して検討する方法が妥当であろう。また部品によっては検査加修を行うのに車両の大規模な解体を必要とするものがあり、突発的な故障の復旧に多額の経費を要する事を考慮しなければならない。

1.2 保守体系上の問題

部品構成の複雑であることは保守体系にも影響し、検査修繕の種類も、日常の点検から完全な分解修繕までの修繕回帰と検査範囲とを考え合せ、一般に4~5種に区別されている。このうちここで**予防修繕**と呼んで取り上げたものは、普通6ヶ月~1年の期間ごとに、主要部を解体検査し、日常の点検では完全な検査や十分な加修ができない部分の性能を回復し、次期修繕時までの車両の性能と保安度の維持と保証を行うものである。この修繕に際して、数日間車両は休止させねばならず、これによる損失がある外、車両の解体・洗滌・検査探傷並びに組立・調整・試運転等の部品の損傷程度にかかわらず固定した附随経費(全修繕費の30~50%)がかかるので、この際できるだけ全般の検査を併合して行うのが得策である。しかし多種多様の部品の修繕間隔を画一する結果、部品面での無理と無駄の調整に留意しなければならない。

1.3 保守方針上の問題

国鉄の列車密度は非常に大きく、ダイヤ確保の上から車両故障の防止は厳格に要求される。保守に当っては、次期検査時までの性能の保証が強調されるので、回帰途中で使用上保安度を保証し得なくなると推定されるものは、原則的にあらかじめ加修を行う方針によっている。しかし部品によって随時その状態の確認ができるものについては、**使用限度**と呼ぶものを設け、これに達すればただちに使用を停止し加修する場合もある。但し電球のように運転保安上危険性が少なく、外部からの点検・部品交換の容易なものは、日常保守として故障発生のつど処置されるのはもち

* 日本国有鉄道 ** 日本国有鉄道 1959年4月26日春季学会にて発表, 1959年12月1日受理.

ろんであって、これについては触れないことにする。

2. 予防修繕における加修率

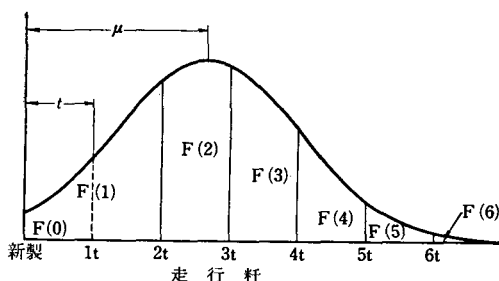
車両における予防修繕の概念は前章のとおりであり、要約すれば「全数検査・部分加修」の方式と云える。次にこの部分加修の発生率すなわち**加修率**と修繕回帰との関係を考えてみる。

2.1 部品寿命

この場合の**寿命**とはすでに説明したとおり、正常な使用が期待されなくなる状態に達することを意味しており、使用しうる限度とも云えるが、寿命に達すればただちに故障を生じる事はないがその危険性が急増するものとする。予防修繕の主対象である部品の寿命は、加修後の車両走行料を確率変数にとるとほぼ正規分布に従い、かつその**平均寿命** μ 、**標準偏差** σ とすれば、 $\sigma/\mu=0.3\sim 0.6$ の範囲にある。

2.2 予防修繕の過程

第1図のような寿命分布を考える。横軸に加修後の走行料をとり、**修繕回帰** t で区切られた



第1図

た部分の面積すなわち回帰中に寿命に達するものの分布を $F(i)$ で表し図のように記号する。

加修後第1回目の修繕期における要加修品の発生率は、

- (1) すでに寿命に達したもの: $F(0)$
- (2) 次回までに寿命に達するもの:

$$F(1) - F(0)$$

の合計 $F(1)$ となる。加修品の中には、事後修繕的内容をもつ $F(0)$ が混入していることにな

るが、これを次のように区別する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{見直し加修率: } R_1(i) \\ \text{手おくれ加修率: } R_2(i) \\ \text{全加修率: } R(i) = R_1(i) + R_2(i) \end{array} \right.$$

第1回目の加修時には

$$R_1(1) = F(1) - F(0), \quad R_2(1) = F(0), \quad R(1) = F(1) \text{ である.}$$

第2回修繕時の要加修品は、第1回目の加修品の中からも第1図の寿命分布に従って発生するから、

$$R(2) = F(2) + \{F(1)\}^2$$

$$R_2(2) = F(0) \cdot R(1)$$

となる。以下このような修繕をくり返して行く際の各加修率の一般式は次のようになる。

$$\begin{cases} R(i) = F(i) + \sum_{x=1}^{i-1} F(x) \cdot F(i-x) + \sum_{b=2}^{i-1} \left[\sum_{x=1}^{b-1} F(x) \cdot F(i-x) \right] F(i-b) + \dots \\ R_2(i) = F(0) \cdot R(i-1) \\ R_1(i) = R(i) - R_2(i) \end{cases}$$

2.3 平均加修率

前節の一般式において $i \rightarrow \infty$ の極限では加修率は一定値に収斂する。これは実際の保守の面では、修繕経歴が長くなって、新製時全部品が揃っていた事による寿命到達品のピークが平滑にならされた状態に当る。この極限の加修率は修繕時の期待加修率であって、これを**平均加修率**と呼び、それぞれ R, R_1, R_2 と記号する。

平均全加修率： R は第1図の寿命分布での期待寿命回帰数： $E(t) = \sum_0^{\infty} t F(t)$ の逆数に一致するから、

$R = 1/E(t)$ となる。又一般式から

$$\text{平均手おくれ加修率} : R_2 = F(0) \cdot R$$

$$\text{平均見こし加修率} : R_1 = R - R_2$$

の関係が成立する。

部品の寿命分布が正規分布に従う場合について、平均加修率(以下単に加修率と記す)と修繕間隔の関係を示したものが第2図であり、修繕間隔は修繕回帰料と平均寿命料との比 t/μ で表わしてある。全加修率は t/μ の増加につれてほぼ直線的に増加し $t/\mu \doteq 1$ で 100% に飽和し、表面的には修繕時の全加修率には変化はなくなるが、内容的には手おくれ加修率の急激な増加が生じ、保安度の低下が問題となるわけである。

3. 保守費の計算

加修率を前章のモデルで考える場合、加修に要する費用の計算もこれに対応させるため次のようにする。

3.1 保守費の分類

予防修繕の所要経費は、修繕回帰との函数関係から次のように分類する。

$$T = F + V \quad (1)$$

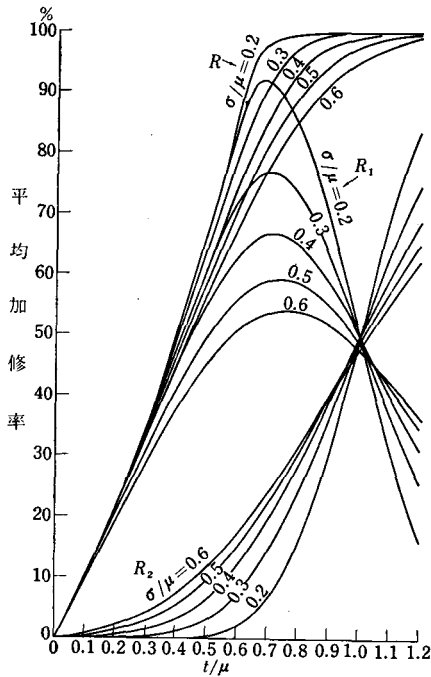
T : 全修繕費 修繕1両1回当りの全修繕費用。

F : 修繕固定費 修繕回帰の長短にかかわらず、修繕に必要な固定的な費用(内容は 1. 2)

V : 変動費 修繕回帰の長短によって加修率が変化するために変動する部品加修経費の総和。さらに変動費は次のように細別される。

(1) **正常加修費** 加修の大半を占める見こし加修品については、その修繕程度に大きな差はないので、**部品1ヶの加修単価**： C_1 は回帰にかかわらず一定とおく。しかる場合ある部品の見こし加修の期待費用は $R_1 \cdot C_1$ で、これを車両1両総和した次のものを

$$\sum R_1 C_1 \text{ で表はし、正常加修費と呼ぶ。}$$



第 2 図

(2) **遅延加修費** 手おくれ加修品は、適切な予防加修時期を失っているので、その加修単価は見こし加修のものより高くなる。この**平均単価**を C_2 と記号し、上と同様に $\sum R_2 C_2$ を遅延加修費と呼ぶ。

この際、 C_2 には手おくれ加修品の正味加修費の外回帰途中で故障を起す率は R_2 に比例するものと考え、次式で示す故障損害の負担額を加算しておかねばならない。

故障負担額 = 故障発生 1 回当りに必要な正味加修費以外の平均損害額

$$\times \frac{\text{現行 1 回帰当りの部品の故障発生割合}}{\text{現行回帰における手おくれ加修率の推定値}}$$

V は正常加修費と遅延加修費の和であり、

$$V = \sum \{R_1 C_1 + R_2 C_2\} \quad (2)$$

となる。

3. 2 走行杆当り保守費

(1)式に(2)式を代入し、走行杆当りの値とするため

回帰料: t で割れば次式をうる。

$$\frac{T}{t} = \frac{F}{t} + \sum \left\{ \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{t} \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$r = \frac{C_2}{C_1} \quad \text{とおき、また}$$

$$v = \frac{R_1 + r R_2}{t/\mu} \quad (4)$$

とし、無次元数 v を**変動費の指数**と呼ぶことにすれば、(3)式は次のように整理される。

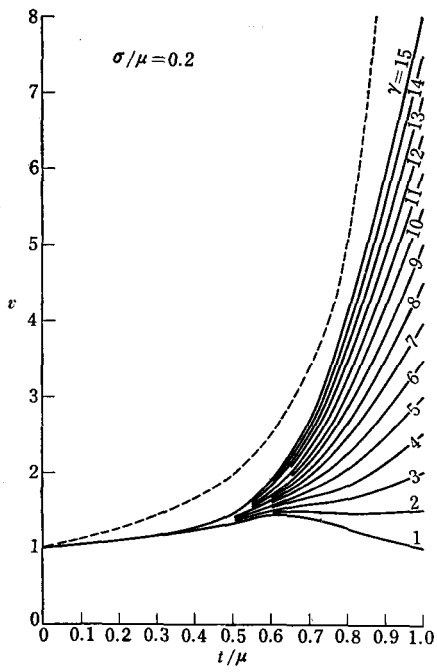
$$\frac{T}{t} = \frac{F}{t} + \sum \left\{ \frac{C_1}{\mu} v \right\} \quad (5)$$

v は t/μ と σ/μ 及び r の関数であって、その一例を第3図に示した。

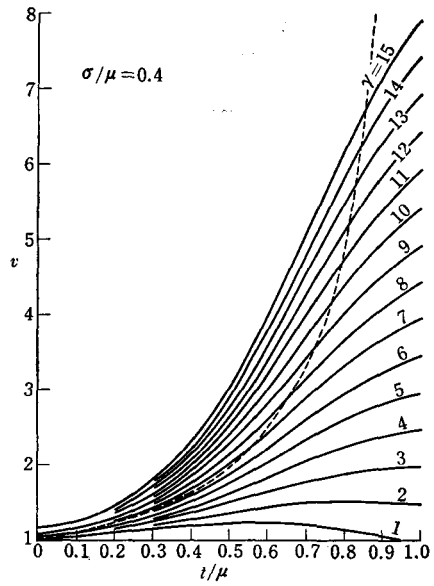
(5)式によって実際的な計算を行うには次のような手順によればよい。

- (1) 部品の寿命分布を求め σ 及び μ を推定する。
- (2) 現行の回帰のもとでの $C_1 \cdot C_2 \cdot r$ を求める。
- (3) 以上によって任意の回帰 t に対する v が求められ、各部品での $C_1/\mu \cdot v$ の値を総計して、 t に対応する変動費: V/t が計算できる。
- (4) これに F/t を加えれば、 T/t を t の関数として求めることができる。

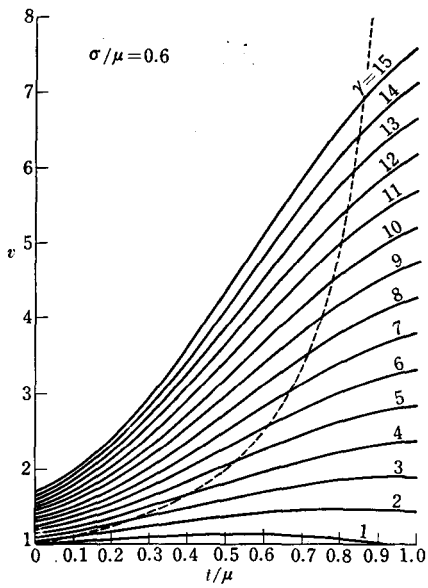
3. 3 最適修繕回帰



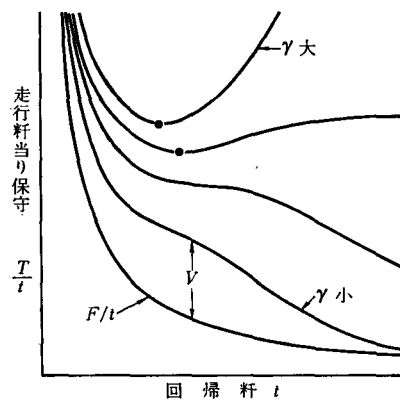
第 3 図(1)



第 3 図(2)



第 3 図(3)



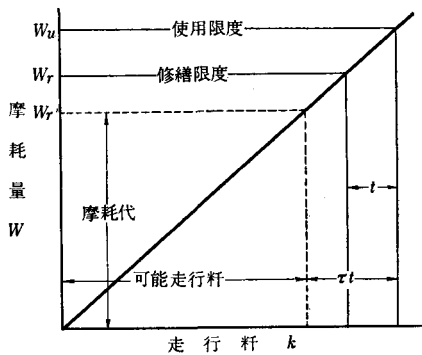
第 4 図

(5) 式の値を模型的に示すと第4図のようになる。 F/t は直角双曲線で、この上に v と同様の傾向の V/t が加って走行料当りの全修繕費となる。 r の大きさによって極小点が表われないこともありうるが、これは予防修繕が経済的に否定されることを示すものである。 r が大きいときは明瞭な極小点が生じ、これに対応する修繕回帰が最適回帰となる。

4. 他 の モ デ ル

4. 1 平均摩耗量からの簡略法

以上説明した加修率モデルで、 t/μ 及び σ/μ の小さい範囲では手おくれ加修は實際上問題とする必要は少いので、別の考え方をすることができる。



第 5 図

摩耗のように走行料に対して連続的に損耗の進行するものについて、第5図のように考える。

平均摩耗量: $W = wk$ (w : 平均摩耗速さ, k : 走行料)とおき、使用限度までの摩耗代: Wu , 修繕限度までの摩耗代: Wr , 修繕回帰料: t とおけば、予防修繕の立前から $Wr = Wu - wt$ すなわち使用限度から1回帰分の予裕を見込んだ状態に達したとき加修せねばならない。このとき平均加修率: R は、

$$R = \frac{wt}{Wr} = \frac{wt}{Wu - wt} = 1 / \left(\frac{Wu}{wt} - 1 \right) \quad (6)$$

と定義される。

次に回帰が τ 倍になるとき、ダッシュをつけて同様に記号すれば平均加修率: R' は(7)式となる。

$$R' = \frac{wt}{Wr'} = \frac{wt}{Wu - \tau wt} = 1 / \left(\frac{Wu}{\tau wt} - 1 \right) \quad (7)$$

(6) 式と(7)式の比をとり単位回帰当りの値に換算すれば、

$$\frac{R'}{\tau R} = \left(\frac{Wu}{wt} - 1 \right) / \left(\frac{Wu}{wt} - \tau \right) \quad (8)$$

となるが、この比は加修率モデルでの v の比に対応するもので、また $Wu/wt \equiv \mu/t$ と読みかえることが出来る。従って

$$\frac{v'}{v} \equiv \frac{R'}{\tau R} = \frac{(\mu/t) - 1}{(\mu/t) - \tau}$$

を書けるから、これを变形すれば

$$v \{1 - (t/\mu)\} = v' \{1 - \tau(t/\mu)\} = \text{Const.} \quad (9)$$

となる。変動費の指数: v は $r=1$ のとき $t/\mu=0$ で $v=1$ であるから、この条件を代入すれば(9)式は、

$$v=1/1-(t/\mu)$$

となる。このような近似モデルから得られた v の値は第3図に点線で附記してある。

4. 2 臨時修繕発生率からの推定

t/μ が1に近づくとき全加修率は100%に飽和する傾向(第2図)があり、これ以上回帰が長い場合は事実上予防修繕はできない。この範囲に属する部品は普通は随時その状態の点検が可能で、修繕までに使用限度に達したものは臨時に修繕を行

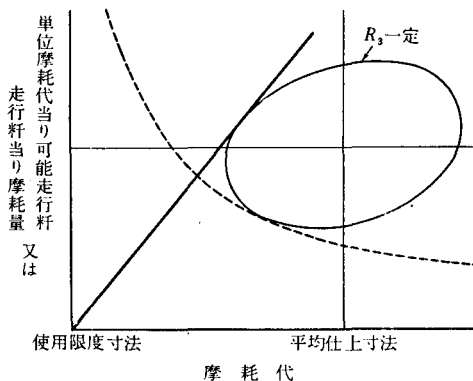
う方式によるものであって、別個のモデルで考えね

ばならない。このような臨時修繕の平均単価： C_3 、

回帰中の期待発生率： R_3 とおけば、走行秆当り臨時

修繕費= C_3R_3/t を該当する部品について求め、変動費 V に加算すればよい。

R_3 の t との関係は次の方法によって求めるのが一般的であろう。第6図のように、摩耗代=仕上り寸法-使用限度寸法と摩耗速さ又は摩耗代当りの可能な走行秆の2元分布を取れば、等確率線は楕円となる。この座標において可能走行秆(摩耗量が使用限度に達するまでの走行秆)が一定である点の軌跡は、



第6図

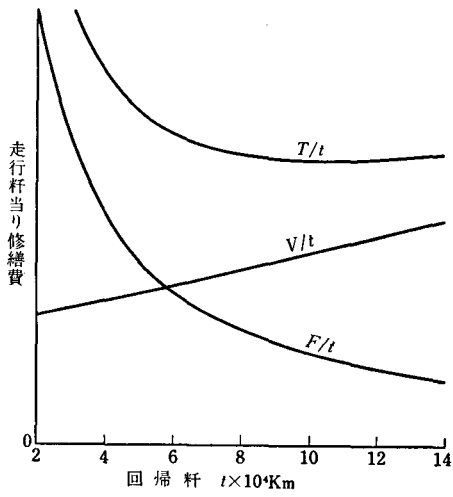
$$\text{可能走行秆} = \frac{\text{摩耗代}}{\text{摩耗速さ}} = \text{摩耗代} \times \text{単位摩耗代当り可能走行秆}$$

の関係から、縦軸に摩耗速さをとった際は原点を通る直線に、又その逆数の摩耗代当り可能走行秆をとれば直角双曲線となる。この性質から、臨時修繕発生率： R_3 を示す楕円に接する直線の \tan 、又は双曲線の高さから可能走行秆が求められるから、想定回帰秆に対する臨時修繕発生率を推定することができる。

5. 要 約

国鉄の動力車保守に採用されている予防修繕方式の一形態に適用させる3種のモデルについて述べた。この手法は、修繕回帰を変化させた際の保守費の推移を現状のデータを基礎に推定するもので、修繕の実態にそれぞれよく適合するモデルでの推定値を総和して車両全体の総合保守費が最小になる最適修繕回帰を数値的に求めるものである。モデルの種類としては

- (1) 一般的な予防修繕の加修率のモデル——修繕回帰による見こし加修と手おくれ加修の変化を推定する。
- (2) 加修率の低い範囲に適用するモデル——手おくれ加修を直接には考慮しないときの見こし加修率の推定。



第 7 図

(3) 臨時修繕発生率の推定——加修が100%になるような場合に適用する。

の3種類を考えた。

この手法が動力車と同様な事例——複雑な部品構成とそれに伴う雑多な寿命分布の組合された機械・装置——の定期分解修繕の最適修繕間隔の考察の一助ともなれば幸いである。国鉄においては、昨年度実施された各車種の修繕回帰合理化の際に、この手法によって技術的な裏付けを行ったが、直流電気機関車での結果を第7図に例示した。この例では、戦後の新製車では従来6万秆が標準となっていた予防修繕回帰を8万秆まで暫定的に延長し、その後の状況を検討中であるが、図が示す最適回帰の9~10万秆までさらに延長しうるものと判断されている。