

機械システムの信頼性管理

— ブレーキシステムについて —

野 村 義 夫*

Reliability Control of Mechanical System

— On Brake System —

Yoshio NOMURA

Abstract

As reliability control is a very important technique for normal operation of machines. Brake system is one of the machine systems and is composed of many machine elements. Then, brake system must be designed and maintained carefully to avoid failures.

The paper shows the results of failure analysis of the brake system and offers some proposals to get an adaptive repair cycle of the system.

Key Words ; Failure Rate, MTBF, FTA, Repair Cycle.

1. ま え が き

機械は信頼性が充分高くないと安心して使用できない。このため稼動中に機械が故障を起さぬよう設計から製作に至るまで信頼性に留意した検討をしておかなければならない。特に、数多くの部品から成る機械システムにおいては、それを操作する人間も含め、また修繕も考慮に入れて信頼性の管理を徹底しなければならない。

信頼性管理の方法は対象とするシステムの機能や使用目的に応じて異なるが、基本的には、そのシステムに最も適した手段を用いて構成することになる。

本論文は、多くの機械部品より構成される鉄道車両のブレーキシステムを例に信頼性管理の方法を検討したものである。

2. 従来の信頼性維持対策

鉄道車両のブレーキシステムは、古くから圧縮空気を用いた所謂「空気ブレーキ」が主体となっている。

信頼性管理に関する理論と実際は近年発展した技術であるが、「空気ブレーキ」開発の初期にも幾つかの信頼性維持のための対策がとられていた。それらの一つはフェールセーフ設計であり、他はフルプルフ構造の導入である。フェールセーフは、ブレーキが故障した時、自動的にブレーキが作用するように働く構成であり、フルプルフは製作時あるいは修繕時、未熟な作業者によっても機能が失われないよう配慮された構造である。これらの概念はブレーキ設計の基礎であり、今日でも用いられている。

しかし、今日問題なのは、フェールセーフ設計によって車両運転の安全が保たれていても、ブレーキシステムの故障によって列車運転の円滑化を害しサービスの低下をもたらしている場合が多くみられる、ということである。

このため、故障の実態を把握し、更に進んだ検討によって信頼性を高める必要がある。

3. ブレーキ故障の実態

(1) 故障要因系統図

旧日本国鉄における車両運転事故のデータを数年分には亘り調査したところ¹⁾、ブレーキシステムに起因す

1994年9月13日受理

* 機械工学科

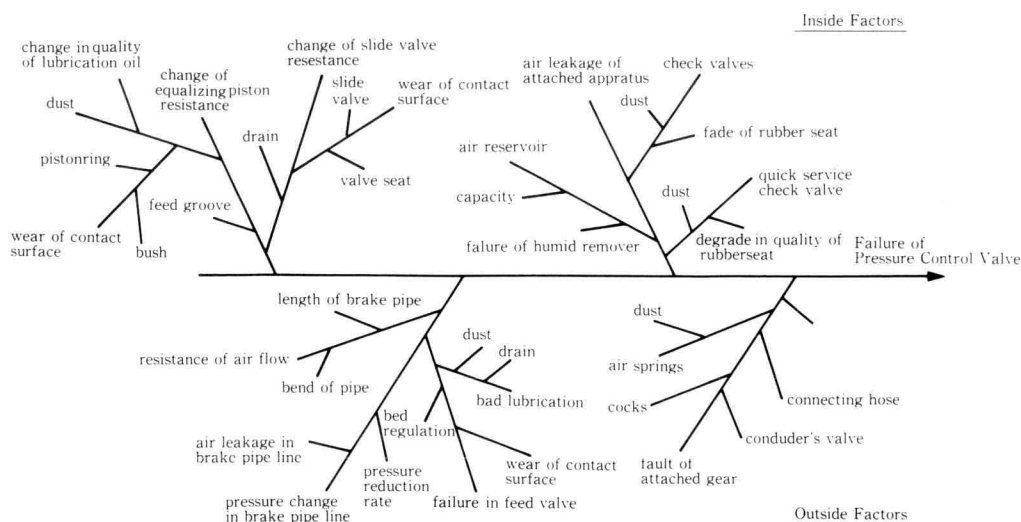


Fig. 1. Failure factors System

と思われる故障は、貨車で約 15%、客車で約 50% あり、これらのうち特にブレーキ圧力制御弁によると推測される故障は、貨車で約 30%、客車で約 70% あることが認められた。これらの故障内容を分析し検討するため、圧力制御弁の作動不良に関係すると思われる故障要因を系統図で示すと Fig. 1 のようになる。

(2) 故障の形態²⁾

修繕工場が受け取る故障圧力制御弁は、運転事故の原因になったもの、および列車編成時の仕立検査で不

合格になったものの合計である。毎月 3,000 個の圧力制御弁を修繕している工場において、任意の 1 ヶ月間の瞬間故障率を調べたところ Fig. 2 のような結果が得られた。ここで、修繕された圧力制御弁は時刻 $t=0$ で使用が開始され、その 8 ヶ月後に全数が予防修繕されるという方式になっている。また図中の瞬間故障率 $\lambda(t)$ は、時刻 t における故障数の残存数に対する比である。

Fig. 2 に示す圧力制御弁の故障は、初期故障の期間にあると考えられる。

また、Fig. 2 の $t=5, 6, 7$ の $\lambda(t)$ の値から偶発故障率の値を推測すると、 $\lambda(t)=0.013/\text{月}$ と読みとれるので、もしこのような $\lambda(t)$ がつづくとなれば、 $MTBF^* = 77(\text{月})$ と算出される。

4. 故障要因の検討と対策

故障要因は Fig. 1 に示したように、主として圧力制御弁の構造に直接起因する内部故障要因と、弁に付属する部品やその置かれた環境に起因する外部故障要因に分けられるであろう。

(1) 内部故障要因

構造に起因する故障に関しては、筆者は既に解析的検討を行ない、故障防止のための設計基準をあたえた。

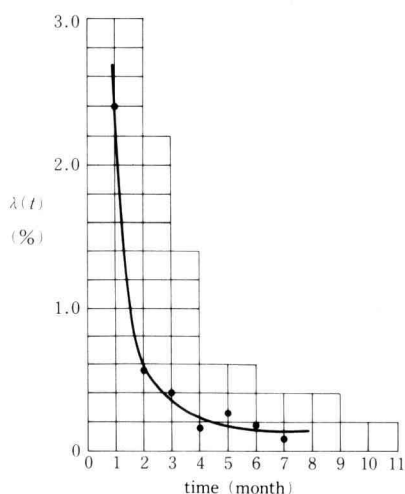


Fig. 2. Failure Rate of control valve

* MTBF...Mean Time Between Failures

その結果の概要を示すと、つぎの通りである。

圧力制御弁の構造各部の寸法間に次式の関係があることが望ましいという結論を得たのである。すなわち、

$$\frac{A_s V_0}{A^2 x_0} = K \quad (1)$$

また、

$$\frac{1}{V_0} = \frac{1}{V_{ARO}} + \frac{1}{V_{BPO}}$$

ここで、 A ；釣り合いピストンの断面積

A_s ；滑り弁滑り面の受圧面積

V_{ARO} ；補助空気だめ容積（初期値）

V_{BPO} ；ブレーキ管容積（初期値）

x_0 ；釣り合いピストンが動き始めてから所要空気通路が全開するまでの移動距離

である。(1)式において、 K の値は無次元量であり滑り面の潤滑によって影響される値である。また数多くの実用制御弁について得られた平均値 $K_c (=87.7)$ より小さい値をとると、ゆるめ不良によるブレーキ故障に移行し易く、逆に K_c より大きい値を取る時には、常用ブレーキ操作中に突然非常ブレーキ作用を起こすといった列車の運転阻害の恐れがあり望ましくない、といったことが明らかにされたのである³⁾。

(2) 外部故障要因

主として環境に起因する外部故障要因としては、ブレーキ配管や付属機器の大きさやその部分の空気漏洩、管内に発生する圧力波の変動、さらにブレーキシステムへの塵埃の混入、湿気によるドレンの発生、などの不確定な要因であり、故障との関係が一義的にきめにくい。したがって故障データの統計的性質からシステムの修繕に関する最適運用法をみつける必要がある。

(3) デバックング

上述の諸要因によって生ずる故障の形態は結果として前記の Fig. 2 に示した形となっていると認められるので、この故障率をへらすには修繕した弁を車両に取りつけるに先立って車両工場で「ならし」運転、すなわちデバックングしておくことが信頼性を高める上で有効であると考えられる。

(4) 冗長度の導入

システムの一部あるいは全部に冗長度を導入して信頼性を高めることができるが、これは通常、システムの中の故障を起し易い部分について実施する。すなわち、新交通システムの車両における油圧ブレーキシ

テムでは、システム全体を二重系にする。これは、単車でしかも無人の自動運転されることが多いからである。この場合特に運転指令システムの信頼性にも充分配慮しておかないと、近年の大阪南港の例のような思わぬ運転事故を起す危険性がある。

他方空気ブレーキシステムを用いる車両の場合には、油圧の場合と異なり配管その他に多少の漏洩があっても一般に空気圧が即座に失われるということはないので、システム全体を二重系にすることは殆どない。しかし信頼性を更に高めるために、システムの一部を二重系にすることがある。

筆者は高速車両の空気ブレーキシステムについて、故障の本解析 (FTA*) を用いて信頼性を検討した。すなわち「ブレーキが作動しない」というトップ事象に対して複式逆止弁に関連する管路がクリティカル経路であることを見出し、その部分を二重系にすることを提案した⁴⁾。これによってこのシステムの故障率は 1.10×10^{-6} 回/時が 0.85×10^{-10} 回/時と著しく小さくなり信頼性をきわめて高くできたのである。

(5) 修繕周期の適正化

圧力制御弁はブレーキシステムの心臓部であり、採用初期に故障が多かった事から、車両の定期修繕の時とは別に 8 カ月毎に全数を検査修繕する、いわゆる予防修繕方式がとられていた。

他方、車両は車種によって異なるが、大体 12 カ月を単位とする修繕方式であったので、圧力制御弁は 1 年に少なくとも 2 回修繕される。すなわち、圧力制御弁は予防修繕された後 4 カ月目に車両の定期修繕で再び修繕されることになる。これは初期故障期間にある圧力制御弁をまた初期故障期間に引き戻すことになり好ましくない修繕法と云えよう。

車両工場が修繕のため受け取った圧力制御弁の数を全国的に調べてみると Fig. 3 に示す如くであり、約 1 カ月の輸送遅れを考慮すると、9 カ月目に受け取り率が最大となることは当然である。4 カ月目にも山が現われる筈であるが、そうっていないのは初期故障期間にある圧力制御弁が多いことを示すものと推測される。

このような修繕法では修繕のため圧力制御弁を車両から着脱する手間と時間、およびこの間に生ずる車両運用上の損失とが発生し、システムの機能維持のためのコスト上昇が大きくなり好ましくない。

* FTA…Fault Tree Analysis

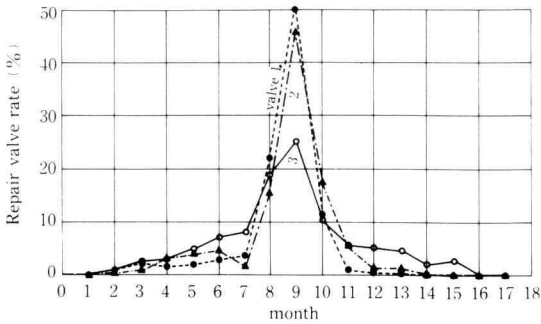


Fig. 3. Repair valves in a month

Fig. 2の特性より圧力制御弁の偶発故障期間は、修繕後6あるいは7カ月目から始まるようにみえる。また摩耗故障期間の始まりは、実験室での耐久寿命試験の結果⁵⁾を考慮すると12カ月目より先のようにみえる。したがって、圧力制御弁の修繕周期を12カ月まであるいはそれ以上にのぼしても差支えないように思われる。

そこで、圧力制御弁の修繕周期を12カ月あるいはその整数倍までのぼすことが出来れば、ブレーキシステムの保全において、信頼性を下げることなくコストを著しく低減することが出来るであろうと推測される。

5. 修繕作業の数量的検討

圧力制御弁の修繕周期が車両のそれより短いため、検査の現場(車両区)や修繕工場での作業量が必要以上に増えていると考えられる。そこで、修繕作業を数量化して検討することとした。

解析を容易にするため、修繕作業をモデル化して次のように考えた。

(1) 車両の修繕は圧力制御弁の修繕と無関係に実施され、車両が定期修繕される時には車両に取りつけられている圧力制御弁は、すべてその使用月数如何にかかわらず修繕される。

(2) 圧力制御弁の故障率 $\lambda(t)$ は一定値 λ と仮定する。すなわち、信頼度あるいは残存の確率は $R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$ と表わされるものとする。

ここで

$$R(t) = (t \text{ 時間後の残存弁の数}) / (\text{最初の弁の数})$$

である。

また、修繕後の故障率 λ は変わらないとする。

(3) 圧力制御弁の故障は各单位期間の終りにまとめて生ずるものとする。

(4) 故障の検査、故障弁の取り替えおよび修繕作業は瞬間的に行なえるものとする。あるいは単位期間に対して無視出来る程短いものとする。

(5) 検車区と工場との間の修繕弁の運搬に必要な時間は無視できる程小さい、あるいは単位期間に対して無視出来る程短いものとする。

(6) 故障の検出および修繕は完全であり、何時も同一技術水準にあるものとする。

(7) 検車区に予備の制御弁は持たないものとする。

以上のような仮定の下で解析した結果、修繕弁の総和 S_m は下式のように表わされる事がわかった⁵⁾。

$$S_m = n(1-R) \frac{i - iR^n - R^n + R^{(i+1)n}}{(1-R^n)^2} + [m(1-R) + R] \frac{1 - R^{(i+1)n}}{1 - R^n}$$

ここで、制御弁の修繕周期を n カ月、車両の修繕周期を $(in+m)$ カ月とした。また i は正の整数であり、 $m < n$ の場合を考えた。

次に、実用の車両と圧力制御弁の場合を考え、車両の修繕周期を12カ月、圧力制御弁の修繕周期を8, 9, 10, 11, 12カ月とすると、 $i=1$ として、

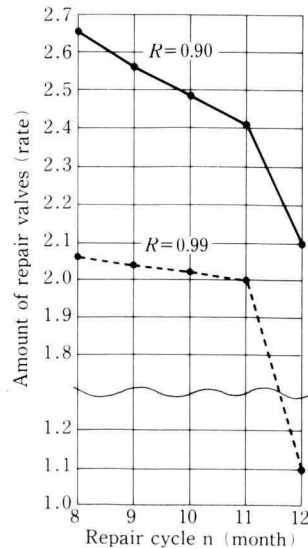


Fig. 4. Relations between Repair Cycle and amount of repair valves

$$n=8, m=4 \text{ の時 } S_{m1}=12-11R+(4-3R)R^8$$

$$n=9, m=3 \text{ の時 } S_{m2}=12-11R+(3-2R)R^8$$

$$n=10, m=2 \text{ の時 } S_{m3}=12-11R+(2-R)R^8$$

$$n=11, m=1 \text{ の時 } S_{m4}=12-11R+R^{11}$$

$$n=12, m=0 \text{ の時 } S_{m5}=12-11R$$

となる。そこで、 $R=0.90$ および $R=0.99$ について図示すると Fig. 4 のようになる。この図より、圧力制御弁の修繕周期を車両の修繕周期に近づければ近づける程、すなわち m を小さくする程、圧力制御弁の修繕数は減り、 $m=0$ の場合すなわち修繕周期を等しくすると著しく減少し、特に $R=0.99$ 時には約半分になることがわかる。ここで、Fig. 4 に示す修繕数は、 $R=1$ の時の 1 回の取り替え数を単位として示した。

6. 結 論

機械システムの例として鉄道車両のブレーキシステムを取りあげ、信頼性管理の問題を論じた。

まず、ブレーキ故障の実態を調べた上、故障要因を分析した。その分析で、機構に係る要因については、解析的に故障防止に役立つ設計の範囲を求めた。また、偶発的要因に左右される故障については、収集した多くの故障データから、故障率曲線を求め殆どが初期故障の範囲にあることを明らかにした。この初期故障率を低減するのに何らかのデバッキングを行うことが必要であることを示唆した。また別に FTA 解析によって事象間のクリティカル経路を求め、システムに冗長度を持たせることで信頼性を高め得ることを数量的に示した。

さらに、以上の結果を考慮に入れて、現在の修繕方式を見直し合理化することで、信頼性を害することなく、システムの保全コストを低減できることをモデル化した修繕作業の解析と共に示した。

信頼性の管理法は、対象とするシステムの機構によって変わると考えられるが、ブレーキシステムについては、本論文で述べた管理法によって信頼性は著しく高まり修繕のコストダウンにつながるものと確信している。

最後に、本論文をまとめるにあたり多くの文献を参照させていただいたが、データの収集において旧国鉄の関係の方々の協力を得たことにも深く感謝してい

る。

文 献

- 1) 日本国有鉄道編「運転事故統計」昭和 34 年以降。
- 2) Bazovsky, "Reliability Theory and Practice", 1961, Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 桜田 猛訳, 日刊工業新聞社。
- 3) 野村義夫;「滑り弁式ブレーキ圧力制御弁の適正構造」昭和 57 年, 幾徳工業大学研究報告 B 理工学編第 7 号。
- 4) 野村義夫;「地上輸送機関のブレーキに関する諸問題」昭和 56 年, 幾徳工業大学研究報告 B 理工学編第 6 号。
- 5) 野村義夫;「ブレーキ圧力制御弁の故障分析と修繕回帰」昭和 40 年, 鉄研報告 No. 471 号。
- 6) H.C. Schwartz, "Reliability engineering in Transportation—pragmatic approach", Proceeding 1976 Annual Reliability & Maintainability Symposium p. 319/321.
- 7) P.R. Esposito, "Role of assurance technologies in M-PRT evaluation", Proceedings 1977 Annual Reliability & Maintainability Symposium p. 472/477.
- 8) H.J. Bajarria, "Maintainability considerations in transportation industry", Proceedings 1978 Annual Reliability & Maintainability Symposium p. 45/49.
- 9) G.B. Mumma, "Hazard analysis—space applications to masstransit", Proceedings 1976 Annual Reliability & Maintainability Symposium p. 251/256.
- 10) R.G. Fenton, "Optimum reliability at minimum cost", ASME Paper 75-DET 120FZ-5454.
- 11) F.E. Kalivoda, "Modeling mechanical system accelerated life test", Proceedings 1976 Annual Reliability & Maintainability Symposium p. 206/212.
- 12) J.E. Anderson, "Life-cycle costs and reliability allocation in automated transit systems" High speed ground transportation journal 11, No. 1 p. 1/18 1977.
- 13) M.O. Locks, "Maintenability and Life-cycle costing", Proceedings 1978 Annual Reliability & Maintainability Symposium p. 251/253.