

信頼性を確保するために 故障モードを探る

森 久史
材料技術研究部
(主任研究員)

辻村 太郎
同
(主管研究員)



もり ひさし つじむら たろう

はじめに

鉄道車両はお客様を安全に目的地にまで運ぶことが使命であり、部品には高い信頼性が求められます。そのために、国鉄時代から信頼性に関する研究開発が進められてきました。信頼性という言葉の説明するため、機器に必要なとなる主な性質を例に挙げて図1に示します。信頼性とは損傷せず、長期間にわたって高い稼働率を維持し、故障しても修理しやすい性質であり、機械的性能などとは異なって、故障や損傷に関する性質であると理解できます。したがって、信頼性を確保するために、部品などの品質の管理や保守方法の選定に際して、鉄道現場で発生した故障に関するデータ分析を行って、故障モードを明らかにすることが重要な課題になると考えられます。故障モードとは、例えば折損、摩耗、腐食、疲労など、故障をもたらす損傷の様式を分類したものです。ここではまず鉄道車両における信頼性の取り組みについて紹介し、その後故障モードを探る方法について説明します。

鉄道車両における信頼性確保の取り組み

鉄道車両には常に高い信頼性が求められ、使われる部品の一つ一つにも、一般的な機器や部品よりも高い水準の信頼性が求められます。部品の製造においては、過去の故障

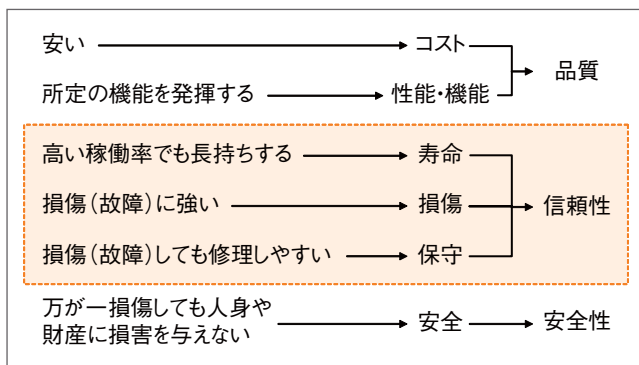


図1 一般の機器に必要な特性

データを参考にして、何度も強度計算などを行い、設計・試作・試験を繰り返して検討が進められ、高い信頼性を確保しています。しかし、設計どおりに製造しても、溶接部分や素材自体の疲れによってき裂が発生したり、摩耗や腐食により部材の肉厚が減じていくなど、時間の経過に伴って劣化損傷などが生じることがあり、最終的には故障が生じることもあります。このような故障は、必ずしも同じ時期に、同一箇所でおこるというわけではありません。また、故障にはそれぞれ固有の損傷の原因があり、発生時期にばらつきがあるということがわかってきています。このような経年的な故障は、劣化損傷に原因がありますが、その劣化損傷は部材にミクロン単位で形成されるため、目視での検査で見えるのは困難です。そのため鉄道事業者では、走行中に発生の可能性のある故障を未然に防止する目的で、作業検査や全般検査などの予防保守を行ってきました。予防保守は蒸気機関車の時代から現在に至るまで行われていますが、動力方式がディーゼル、電気へと代わり、さらに高い信頼性が求められる新幹線電車などの新しい車両が増加するとともに、保守の概念の見直しが必要となり、近代化された車両に適した、信頼性の高い効果的な保守方式が必要となってきました。

新幹線電車の開発以降、コンピュータの普及と信頼性に関する理論の進展、さらに故障解析に関する評価機器の発展により、損傷に関する現象も十分に解明されてきました。そこで、国鉄時代には図2に示すように保守に信頼性の考えを取り入れようとする研究が進められました。それらの研究は信頼度や重要度について、機器の故障状態や現象などを元に解析し、その解析データを活用しながら適切な保守方式のシミュレーションを行って、車両保守コストと故障に伴う損失が最小限となるような適切な保守の時間を導くというものでした。また、信頼性の解析は、保守の見直しの他、部品やシステム、材料の改良や製造の見直し、フェールセーフ設計などの信頼性設計の導入にも適用され

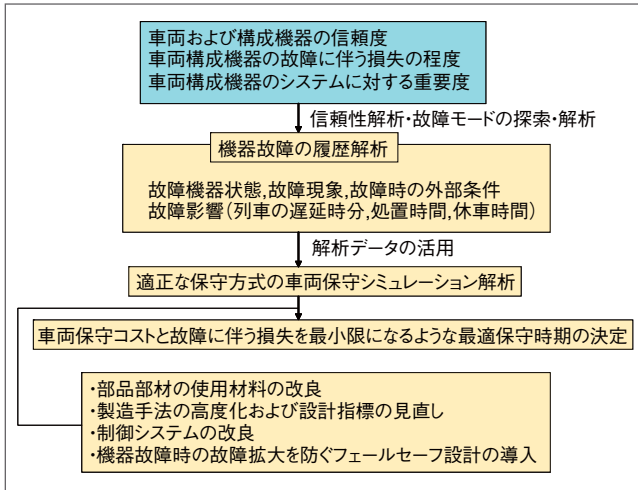


図2 国鉄時代に行われた信頼性を得るための解析

表1 信頼性を表す尺度(パラメータ)

尺度	意味
信頼度	求めたい任意の時間, 例えば10時間で故障しない確率
不信頼度	求めたい任意の時間ですでに故障している確率
故障率	単位時間あたり, 例えば1時間あたり, あるいは1ヶ月あたりに故障する確率
耐用寿命	摩耗や劣化故障などにより故障率が増加し, 機器として許容できなくなるまでの時間

てきました。

しかし、先ほども述べましたように、鉄道では、多種多様な部品が多数使用されているため、故障とはどういう定義で考えるのか、また、どのようなモードが存在するのかなどという整理を行った上で、信頼性の解析に必要な数値をどのように考えるのが課題になります。

故障モードを探る

信頼性を高める設計や保守などを実現するには、何らかの数値で信頼性を表現することが必要となります。そこには、故障や損傷など、極めて数値化しにくい性質が含まれますが、使用時間、故障数や発生時間などのデータを解析することによって、表1に示すような信頼度、故障率、耐用寿命などの尺度を用いて信頼性を表すことができます。特に信頼性解析に用いられる評価指標としては故障率が多く用いられます。

これらの尺度を設計などに適用するにあたり、故障モードを探ることが必要になります。図3に故障モードを探る流れを示しました。本来、故障とは、部品が劣化損傷を受けることにより、部品本来の機能を発揮しなくなることと定義されます。故障モードを探るには、故障の原因となる劣化損傷(以下、損傷)を検出し、それらの損傷のメカニズムを解明して、損傷と故障率との相関を明らかにするこ

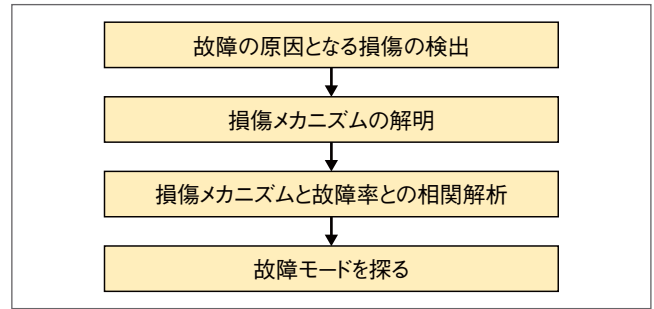


図3 故障モードを探る流れ



図4 ブレーキディスクの浸透探傷の試験前後の外観

とが必要になります。損傷の検出は目視検査で行われますが、目視で損傷を検出しやすくなるような工夫が必要になります。そこで、部材に損傷が発生している可能性がある場合には、赤色や蛍光色の液体を部品に吹き付けて傷などを非破壊的に検出する浸透探傷や磁粉探傷などが行われます。図4にブレーキディスク摩擦面に発生した傷の状態を解体したままおよび浸透探傷後に観察した結果を示します。解体したままの状態では、金属自体の光沢などが影響して傷を明瞭に検出することはできませんが、浸透探傷を行うことによって傷などを明瞭にすることができます。このような浸透探傷試験は非破壊検査と呼ばれ、壊さずに傷などを探る有効な手法です。台車の重要部品である台車枠や車軸にも磁粉や超音波などを用いた非破壊による探傷検査が行われ、溶接部や輪座面、ジャーナル部や車軸内部の傷の有無が確認されています。

損傷が生じていない部品は寸法確認などを行って再利用されますが、損傷が発生している場合には、その発生メカニズムについて調べることが必要になります。傷が確認された部品に対して、まず、傷の発生状況、発生箇所などを明らかにし、その後に、傷の発生面を保護しながら、人工的に荷重を負荷することによって、傷口を開き、開いて得られた傷の部分の破壊面を目視や電子顕微鏡などで観察して損傷メカニズムを調べます。破壊面は傷の発生原因となる痕跡を残しているため、破壊面の観察は重要な作業になります。車体ぎ装機器を締結していたねじに傷が発生し、

その傷を開口して破断面を目視および電子顕微鏡で観察した結果が図5です。破断面を観察すると、貝殻状のような模様が見られますが、これは「ビーチマーク」と呼ばれる、繰り返し応力がかかってき裂が進展した痕跡です。損傷面に見られるビーチマークを電子顕微鏡で詳細に観察すると、損傷面はいくつもの微細な筋状模様から構成されていることが分かります。これは金属が疲労（つかれ）で破壊した典型的な状態を表しています。このことから、ボルトの損傷メカニズムとして、このボルトは金属疲労が原因で損傷したという判断が行えます。

また、部材の初期の特性が損傷発生に及ぼす影響について調べる場合にも電子顕微鏡による観察が行われます。図6に試験的に負荷を与えた車両用板材の破断面を電子顕微鏡で観察した結果を示します。これら車両用板材は、あらかじめ熱処理により脆い状態と粘り強い状態に延性を調整して供した試験品です。図に示すように、脆い状態の試験品では平滑な破壊面であるのに対し、粘り強い状態の試験品では「ディンプル」と呼ばれるくぼみの見られる破壊面を示します。素材の粘り強さの有無によって破断面状態が大きく違うことがわかります。このような解析を行うことで、材料の初期の性質が損傷に影響を及ぼすことも明らか

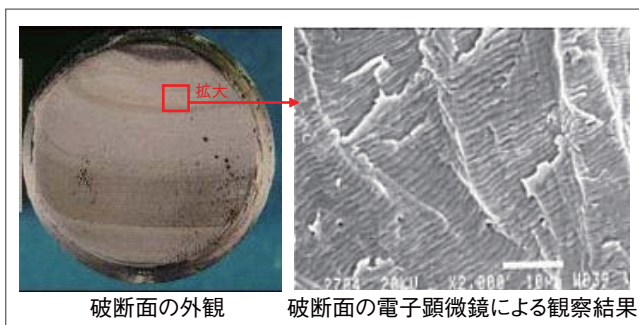


図5 破断した車両用締結ボルトの電子顕微鏡による破断面の観察例

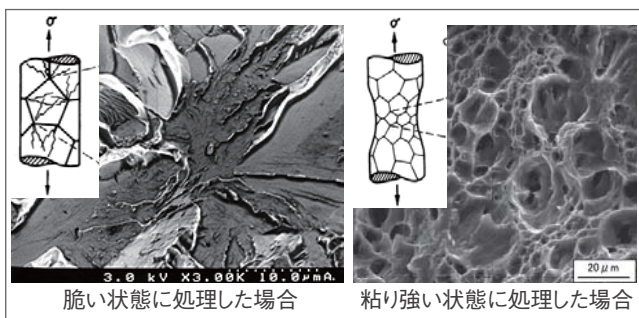


図6 性質の異なる板材の破面の電子顕微鏡による観察結果

かにすることができます。

部品等に発生する損傷を目視や光学顕微鏡などによって観察することも大切ですが、このように、故障モードを調べる上で、電子顕微鏡によって観察することも重要になります。

これらの手法を用いて認められた損傷のメカニズムをまとめて表2に示します。鉄道部材に見られる故障の多くは、繰り返し荷重負荷などによる疲労損傷、熱や摩擦で生じる摩耗損傷、外部の雨等による腐食損傷が原因であることが知られています。また、例は少ないですが、疲労、摩耗や腐食以外に、引張、せん断、曲げによる損傷や脆性的あるいは衝撃による脆性損傷が生じて故障に至ることもあります。これら故障を引き起こす損傷の原因は、主に疲労や摩耗、腐食などの材料の経年的な損傷であり、その損傷による故障は応力集中部や材料内部の製造欠陥、溶接欠陥から発生することが多く見られます。図7に溶接部の初期欠陥の断面観察結果を示します。巣状の欠陥があるとそこを起点として、設計よりも早期に損傷が発生し、初期故障につながる可能性があります。

故障モードの探り方

故障モードを探る最後の課題は、信頼性の尺度である故障率と損傷メカニズムとの関係を検討する必要があることです。故障率を発生時間と関連付けると図8のように、時間に対して減少する傾向（故障率減少型）や一定の傾向（故

表2 損傷メカニズムのまとめ

損傷	原因
引張降伏損傷	部品に負荷する応力が材料の降伏応力を超えると永久変形して寸法のずれ、あるいは破損する。
せん断荷重による損傷	過大なねじれとせん断荷重により永久変形して破損する。
脆性破損による損傷	表面亀裂や傷から変形を伴わずに、突然破損する。
曲げ破損による損傷	部材の片側に引張荷重、その反対側に圧縮荷重が生じるような荷重が複合的に生じて破損する。
疲労損傷	部材が降伏応力以下の荷重をくりかえし受けた際に亀裂が発生および進展して破損する。
摩耗損傷	部材の接触移動する面が摩擦を受け、摩擦熱および摩擦力で破損する。
応力集中に伴う損傷	不均一な形状の箇所不均一な応力分布が発生して構造物に作用する応力が急増し、応力の急増部で破断する
材料中の初期きずによる損傷	材料の製造時や溶接時に発生する介在物や溶接欠陥が原因となって損傷する。

障率一定型), 時間とともに故障率が増加する傾向(故障率増加型)に分類されます。この3つの故障率の傾向を合わせたのが, 信頼性の解析で良く目にするバスタブ曲線と呼ばれる曲線です。

これまでの経験や故障および損傷に関するデータから, 「故障率減少型」は素材製造時の介在物や割れ, 溶接欠陥を起点とした損傷が原因であること, 「故障率一定型」は疲労損傷, 故障率増加型の領域は摩耗や腐食損傷に対応することが知られています。このことから, バスタブ曲線に見られる「初期故障」は, 素材の初期欠陥あるいは応力集中により故障するものに, 「偶発故障」は疲労に, 「摩耗故障」は摩擦や腐食損傷に対応すると考えられます。

故障モードを探るためには, 現場から得られた故障に関するデータを整理して故障率を求め, 求めた故障率を故障発生時間に対する関数として表し, 得られた関数を解析することが必要になります。故障率を故障発生時間に対して表した関数を統計的に解析して故障モードと対比すると, 関数の解析で得られる指数(m値: ワイブル指数と言います)と故障モードとの間に傾向が見られます。その解析によると, ワイブル指数mが1以下では初期故障, mが1の場合は偶発故障, mが1より大きいときは摩耗故障と区別されます。例えば台車部品に用いられている軸受について, 故障率を走行距離に対して分析したところ, m値は1あるいは1以下となり, 初期及び偶発故障しか見られないと解析されます。このような解析を行って新幹線電車の部品のワイブル指数を求めた結果を表3に示します。

いずれの部品もm値は1あるいは1以下で, これらの機器の故障は初期故障及び偶発故障に整理されます。このような解析が機器毎に行われた結果, 車両の故障ではバスタブ曲線で示される摩耗故障は見られず, 初期故障と偶発故障のパターンしか見られないことがわかっています。摩耗故障パターンが見られないのは, 予防保全である検査で, 摩耗部品を取り替えてしまっているためと考えられます。

国鉄時代に行われた信頼度に基づく保守効果と故障影響の解析結果でも, 定期検査周期内で発生する故障と走行距離との関係を見ると, 走行距離の増加に伴って故障率が増大する摩耗故障パターンは少なく, 初期故障と偶発故障が多いことが示されています。このことから信頼性を確保するには, 材料の製造面や断面構造の検討から初期故障を減らし, 疲労強度の高い材料を使用することによって偶発故障を防ぐような改善が必要であることがうかがわれます。例えば, 車軸では, なるべく高真空中で車軸用鋼材を製造

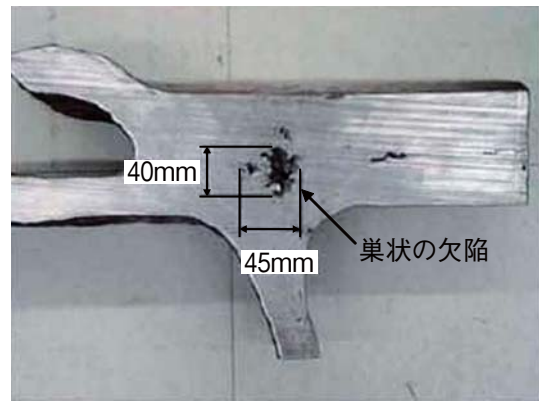


図7 溶接継手部の製造欠陥の外観

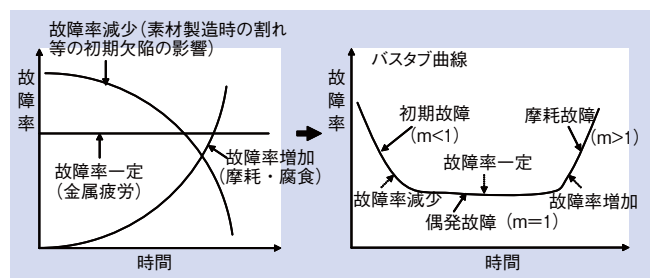


図8 故障率と時間の関係

表3 新幹線電車の部品の故障発生傾向のワイブル指数の解析例

機器・部品	各検査の周期で見たm値(ワイブル指数)		
	交番検査	台車検査	全般検査
パンタグラフ	1.0	—	1.0
主整流器	0.6	—	0.8
主電動機 電機子 界磁	0.8	1.0	—
	1.0	1.0	—
空気圧縮機	0.6	—	1.0
輪軸	—	1.0	—
軸受	—	1.0	—
空気バネ	1.0	0.7	—
オイルダンパ	0.8	1.0	—
車体設備	1.0	—	0.9

することによって, 金属疲労の原因となる介在物を減らし, 高周波表面焼き入れを行って疲労強度を上げるなど, 材料の製造方法を厳密に管理するような手法が取り入れられています。

おわりに

信頼性を確保するための故障モードの探り方について述べ, 故障モードを探る必要性は理解いただけたと思います。さらに信頼性を向上させるには, 故障の原因となる損傷の解析技術の高度化とともに, 部品のさらなる設計, 製造技術の改善が望まれると考えられます。RRR