

# 鉄道システムにおける安全性の定量的評価法

交通システム研究領域

水間 毅

山口 知宏

佐藤 安弘

大野 寛之

## 1. はじめに

日本の鉄道は安全で信頼性が高いと国際的にも高く評価されている。その一方で新しい技術を導入して鉄道システムをより高度化していこうという動きも活発である。しかし、新技術を導入しても安全率が現在よりも損なわれるのであれば、日本では許容されない風潮にあり、それが新技術の導入に慎重な側面もあった。一方で、外国の技術は、国際規格内で定めた一定の安全性要件を満たせば、どの鉄道にも適用可能だという論理の基で、積極的な攻勢をかけ始めている。その場合は、日本の鉄道における安全性に関する考え方とはともすれば相容れない考えもあるが、国際規格に準拠する方向に進む以上、この面からの攻勢も無視できない状況にあるといえる。

従って、本稿では、日本の鉄道システムにおける安全性について、定量的に分析し、国際規格の論理に十分耐えうる、定量的な評価方法を検討した結果の概要を示す。

## 2. 現状の日本の鉄道の安全性

### 2.1. 統計からみた評価

鉄道統計年報<sup>1)</sup>等に記されているデータによると、例えば平成12年度において、日本の鉄道全体において、運転事故(30分以上運転が停止した事故)件数は931件にも上っているが、そのうち、責任事故(鉄道事業者の責任により発生した事故)件数はわずか28件(3%程度)である。また、死傷者はそれぞれ、312人、376人ではあるが、鉄道側の責任により起こった死傷者数は、それぞれ2人、5人と1%程度である。これは年によってばらつきはあるものの、日本の鉄道事故の大部分は、鉄道事業者外の原因によって引き起こされていることがわかる。図1に、運転事故の原因別の分類を示すが、約半数は踏切での事故であり、その中の6割が自動車との衝突である。従って、鉄道の安全性については踏切関係が最重要である。

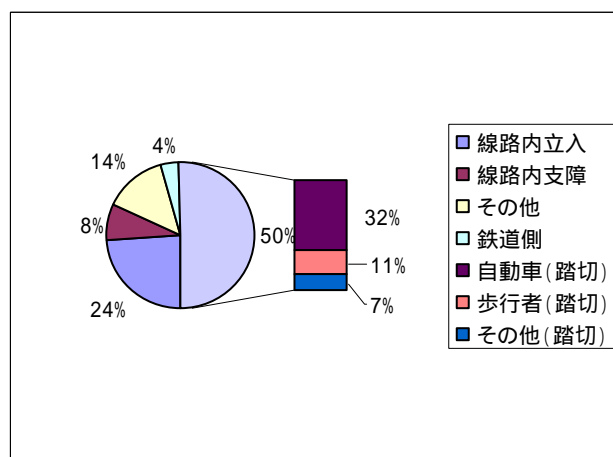


図1 運転事故の原因別分類

しかし、運転阻害件数は平成12年度で約1,500件にも上り、車両と施設を合わせると90%以上となり、一歩対応を誤れば運転事故につながる可能性がないわけではない。こうした原因に関して事故につながらないような分析、対応が必要である。

### 2.2. 安全の原則から見た評価

2.2.1. ヨーロッパにおける安全の原則 安全に関する原則については、ヨーロッパではリスクの許容限度を数値で規定している。イギリスではALARP(As Low As Reasonably Practicable)、フランスではGAMAB(Globalment AuMoins Aussi Bon)、ドイツではMEM(Minimum Endogeneous Mortality)として判断基準が示されている。図2にMEMで規定されている死者数と個人の許容できるリスクとの関係を示し、現在の日本の鉄道における死傷者となる確率を図中に示す。この確率は、死傷者、鉄道事業者の責任による死者を鉄道の輸送人員で除したものである。

これによると、日本の鉄道における安全性は、ヨーロッパにおける許容リスクに対し、1桁以上安全度が高いことが確認され、鉄道事業者の責任による死者で

判断すると、4桁以上安全度が高いことが確認される。

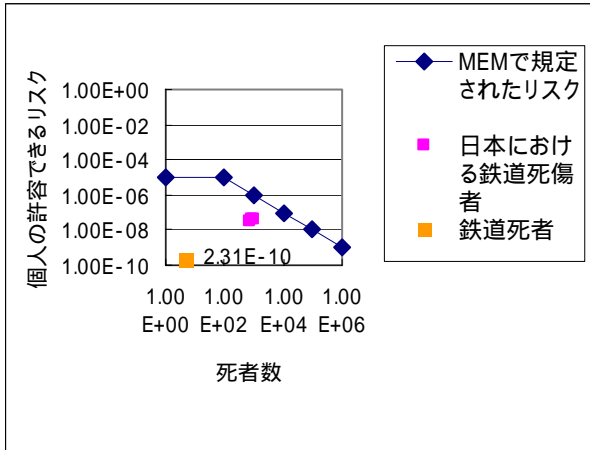


図2 MEMで規定された許容リスクと日本の鉄道の安全性

従って、日本の鉄道における安全性を論ずる時、こうしたヨーロッパで認められている許容リスクに対して十分すぎるほど満足していることを前提とした上で議論すべきである。

**2.2.2. 日本における安全の原則** ヨーロッパでは安全に関する許容リスクを数値で示しているのに対し、日本では数値的なものは何もない。省令では、「鉄道輸送の用に供する施設および車両の構造および取り扱いについて、必要な技術上の基準を定めることにより、安全な輸送および安定的な輸送の確保を図り、もって公共の福祉の増進に資する」ことを唱っており、それを鉄道事業者が実現するための具体的な内容を解釈基準で定めている。従って、必ずしも数値的な基準によって安全を確保しているわけではない。

しかし、国際規格への対応、新しい技術への公正な評価のためには、ヨーロッパで定められているような数値による評価も今後は検討していく必要があると思われる。

### 3. 鉄道の安全性に関する評価法

日本の鉄道は安全であると言われており、現在もこれまでの流れで進んでいくものと思われるが、国際化の流れの中で、新しい技術に対してどのように評価していくのかを検討する必要がある。本章では、これまで実施されてきた、あるいはされつつある安全に関する定量的評価法について整理する。

#### 3.1. 静的評価法

新しい技術を鉄道に適用する場合、その技術の安全性、信頼性の検証も重要であるが、鉄道システムとし

ての安全性、信頼性を事前に検証しておくことが重要である。それは、設計段階、試作段階での評価となり、基本的には机上検討が中心となる。

**3.1.1. 評価指針** 一般に部品レベルでは、故障率が設計段階で示され、それが仕様となる場合もあるが、これは故障確率(10<sup>+</sup>)で表される。一方、システムレベルでは、部品の積み上げで構成されるため、単純に故障率の積では評価すると部品階層が多いと故障率が非常に大きくなってしまいう結果となり、実情に合わない場合も生ずる。従って、鉄道のような場合では、危険側故障確率等で示される場合がある。その場合、1時間あたり1回危険側故障が発生する確率(10<sup>-6</sup>/h)を算定することが望ましいのであるが、これを設計段階で評価することは難しく、試験等を通じて行うことが望ましい。

**3.1.2. FMEAによる評価** これは Failure Mode and Effects Analysis の略であり、設計されたシステムについて、部品故障を始めとして考えられる潜在的故障を列挙し、それらの故障モードが発生した場合に、システムにどのような影響を与えるかを表形式のような形で整理したものである。表1に交通研で実施した概要(項目)例を示すが、影響の大きさをハザードレベルで評価し、一定のハザードレベルに達しないものは安全ではないと判定する。

表1 FMEAによる評価例

構成要素	故障モード	推定原因	影響範囲	影響状態	故障検知箇所	対応	ハザードレベル
電源装置	供給断	断線	システム全体	システム停止	電圧検出器	予備電源への切替	
制御装置	CPU過電流	素子短絡	駆動装置	システム誤動作	過電流検知	主電源断	
論理部	2重系ダウン	電源異常	制御装置	制御装置停止	照合回路	制御装置切替	

ただし、ハザードレベル : システム正常動作  
 : 機能の一部停止  
 : システムの動作停止  
 : システムの錯誤動作

この例の場合、ハザードレベル となる故障モードに対しては対策を指示し、さらに、故障検知箇所、故障時の対応等を再検討して、ハザードレベル 以下になるように修正させて再評価する。

**3.1.3. FTAによる評価** これは Fault Tree Analysis と呼ばれ、システムの動作として好ましくない事象を top 事象として挙げ、それに至る原因を tree の形で論理記号を使って展開していく手法である。これにより、危険事象の発生防止や予防保全に効果的な対策を生ずることが可能となる。

図 3 に、交通研が実施した FTA の例を示すが、交通研では、各々の事象における発生確率を算定し、システムとして危険事象が生ずる確率を計算し、それが一定の値以上であれば、対策を採るよう指示している。

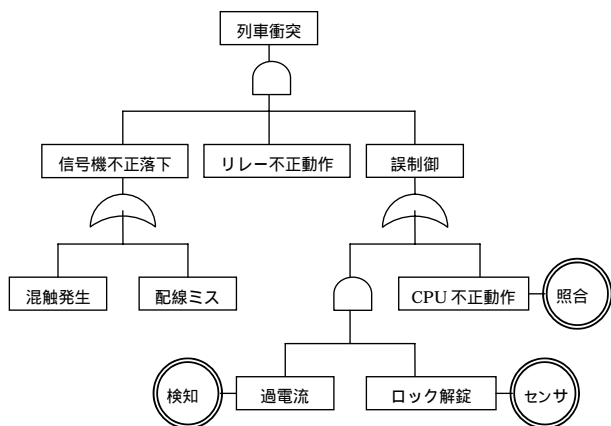


図 3 FTA による評価例

ここで、それぞれの事象が起きる確率を計算して、top 事象が起きる確率を計算することにより、例えば図 3 の例では、列車衝突が起きる確率が  $10^{-12}/h$  となっていれば安全なシステムとして評価し、そうでなければセンサや検知装置等の対策により  $10^{-12}/h$  以下となるように対策を取ることを指示するという評価手法である。

### 3.2. 動的評価

以上のような評価手法は、設計方針、設計値を基に故障に関する連鎖、関係を表現し、できる限り危険側事象が起きる確率を低減するために利用される。しかし、実際のシステムにおいては、故障が同時に発生したり、連鎖関係を持って発生したりと表や tree 形式で表現できない形で発生することもある。従って、こうした事象には、動的に評価する必要がある、システ

ムが複雑になればこうした評価が重要になってくる。

**3.2.1. 評価指針** 動的な評価では、対象システムの試験を通じて行うのが望ましいが、その場合の評価指針としては、ダウンタイム率（総運転時間に占める故障時間の割合）や時間故障率（1時間あたりの故障発生率）があり、それらを利用してシステムの評価を行うことが可能となる。

例えば、開発中の交通システムでの実績と、それに基づいたシステムの信頼性評価例を表 2 に示す。

表 2 新しいシステムの信頼性評価例

総走行時間(h)	14,300
故障件数(試験中)	0
故障件数(試験前)	4
ダウンタイム率	0
時間故障確率	0
故障率	$4 \times 10^{-4}/h$

試験走行中の故障は 0 のため、時間故障率は 0 と判断されるが、試験前の故障も含めても  $4 \times 10^{-4}/h$  程度となり、ほぼ在来の鉄道と同程度であるので、本システムの信頼性として十分であると評価した例である。

**3.2.2. シミュレーションによる評価** 試験走行ができないようなシステムでは、想定実用線区の状態を可能な限り模擬して、実車両を走行させ、その中でランダムに故障を発生（1重、同時、時間差等）させ、システムの動作がどうなるかを確認し、その安全性を確認するという評価方法がある。

図 4 に、IMTS の安全性を評価する際に用いられたシミュレーションの例を示す。

このシミュレーションは、愛知万博 IMTS における地上側機器、コース線形、車両走行パターン、運行パターンをソフトウェア上で全て表現し、機器に故障を発生させて、地上側における信号保安のアルゴリズムの安全性を確認するものである。故障は 1 箇所、同時 2 カ所、時間差 2 カ所故障まで想定し、走行中の random なタイミングで発生させ、不安全な事象（衝突、追突等）がないことを確認する。

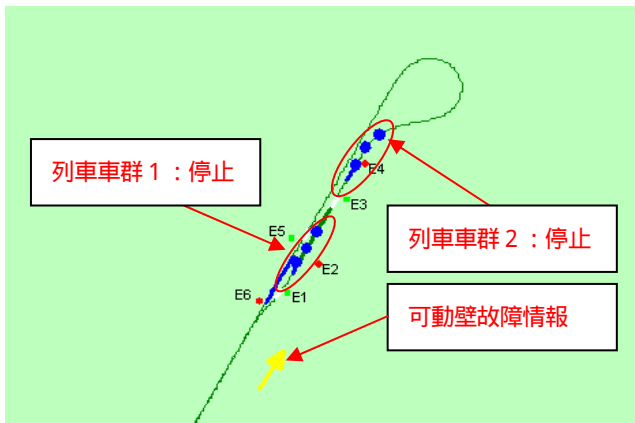


図4 動的シミュレーション結果例

こうした動的シミュレーションを通じて、総走行時分 50,000 時間に対して不具合が発生することなく動作することを確認し、各 10 万回づつの故障発生に対しても全て安全側に停止することが確認され、システムの安全性が評価された。

#### 4 . 国際規格による評価

近年は、ヨーロッパを中心として、国際規格を定め、それに従った統合的な鉄道システムを目指す動きが強まっており、安全性評価の分野においても例外ではない。

##### 4 . 1 . IEC による評価

一般に、システムの安全性に関しては IEC(国際電気標準会議)で定められており、それに従って国内規格を構築するよう求められている。ここでは鉄道の安全性に関する規格と日本の対応について述べる。

**4 . 1 . 1 . IEC 6 2 2 7 8 による評価** これは鉄道システムの信頼性、可用性、保守性、安全性に関して、定量的に評価、管理するための規格である。ここで特徴的なことは、鉄道関連設備の安全に関して要求されるレベル(SIL: Safety Integrity Level) を定め、事業者の責任において設計、製造、管理を行うという考えである。

表3に SIL レベルとその場合に要求される危険側故障発生確率の関係を示すが、日本の鉄道信号システムでは、SIL4 以上の安全率を確保していると思われ、これをどう評価するかが今後の課題と思われる。

また、この規格ではシステムの計画から廃棄までの一連の過程において(ライフサイクル) それぞれに要求される作業を実施し、評価、管理しなければならないとあり、日本でも今後、こうした評価の文書化が必要となってくると思われる。

表3 SIL レベルと要求される危険側故障発生確率

SIL レベル	1 時間に 1 回危険側故障が発生する確率( $10^{**}/h$ )
4	$10^{-8} \sim 10^{-9}$
3	$10^{-7} \sim 10^{-8}$
2	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
1	$10^{-5} \sim 10^{-6}$

**4 . 1 . 2 . IEC 6 2 2 7 9 による評価** これは、鉄道の信号保安用ソフトウェアに関する規格であるが、基本的な要求事項は IEC62278 の考え方を踏襲している。これについては、日本では鉄道局、鉄道総研を中心に対応がなされている。

#### 5 . おわりに

以上、鉄道システムにおける安全性の定量的評価法について、主に交通研で実施してきたものを中心に述べたが、新しい技術の評価する場合、(1)まず FMEA や FTA を通して評価し、故障の発生が不安定事象を引き起こさないよう対策が採られていることを確認し、またそうした不安定事象の発生確率が従来システムでの確率と同程度以下になっているかを設計段階で静的に確認する。(2)次に、試験やシミュレーション等を通じて、故障を発生させ、それに対する安全性や連続走行試験を通じた信頼性の評価を動的に行い、不安定事象の発生が極力抑えられているかを確認する。(3)さらに、国際規格等で定められている数値に対して満たしているか等を確認する、といった手順を示した。

しかし、新しい技術は日進月歩で進化し、また、外国の新技術の導入に対する要求が増してきている現状においては、これらの手法をゆっくりと実施している時間はない。従って、今後は、シミュレーション等の動的評価手法を充実化し、新しい技術が提案された場合に、直ちに安全性、信頼性が評価可能なようなシミュレータの開発が望まれ、こうしたシミュレータを通じた評価が国際規格にも合致していく、あるいは国際規格の評価法に採り入れられるようになることを望む。

#### 参考文献

- 1)平成 13 年度 鉄道統計年報 国土交通省鉄道局
- 2)石田「今後の鉄道安全を考える-ヨーロッパにおける RAMS の制定等について -JREA Vol.46,No.6 pp29264-29276,2003