

S7-3-7 シミュレーションを利用した鉄道システムの 安全性評価法の構築 (第1報) (鉄道の構成要素の故障率を反映させたシミュレーション)

○ 杉浦 章之, [電] 中村 英夫 (日本大学), [電] 山口 知宏, [電] 水間 毅 (交通安全環境研究所)

Construction of safety evaluation method of railway system using simulation(1st report)
(Simulation that reflects failure rate of component of railway)

Noriyuki Sugiura, Hideo Nakamura (Nihon University), Tomohiro Yamaguchi, Takeshi Mizuma
(National Traffic Safety and Environment Laboratory)

It begins to be requested to evaluate it by numerical values of the safety rate and utilization rates, etc. as a technique for evaluating the safety of the railway system in an international standard etc. though the examination etc. have been mainly done so far. In this laboratory, the failure rate of the railway system configuration element is set, the simulation to make it actually run in the vehicle is developed, and the technique for calculating safety and reliability concerning running is being examined in that upon expressing numerically. In this lecture, the result of examining whether the outline of this simulation and the failure rate of each element are reflected in safety and the reliability of the railway system very seem is described.

キーワード: 鉄道, 国際規格, 安全性, 信頼性, シミュレーション

Keywords: Railway, International standard, Safety, Reliability, Simulation

1. はじめに

鉄道システムの安全性を評価する手法としては、従来は試験走行等を中心に行われてきたが、国際規格等では、安全性、信頼性等を数値で評価することが求められている。また、これらを数値で評価することは、海外等の新技術を日本の鉄道に導入する際にも有効であると思われる。安全性、信頼性等の数値化に際して、鉄道システム構成要素の故障率を設定し、実際に車両を走行させるシミュレーションを開発し、その中で、走行に関する安全性、信頼性を計算する手法を検討している。ここでは、このシミュレーションの概要と、各要素の故障率が鉄道システムの安全性、信頼性にどのように反映されるのか検討した結果を述べる。

2. シミュレーションによる安全性の評価

近年のコンピュータシミュレーション技術の発達に伴い、シミュレータを用いた評価法が各分野でも取り入れられている。鉄道分野においては運転手の訓練等を目的とした運転シミュレータが実用化されているが、新技術、新システムの評価に対しては、試験走行による評価が基本となっている。しかし、従来とは異なる新しい技術を導入して鉄道システムを高度化、高機能化する場合や、

IEC62278 のように数値による評価が求められている国際規格の適用を求められる場合、また新しいシステムの導入にあたって環境がどのように変化するのか、といった評価に関しては、実際に車両等を走行させて評価値を示すことは困難である。

このような場合はシミュレーション技術を利用して、より実際に近い形での計算が可能となれば、コスト負担増が少なく、新しい評価が可能となる。

また、シミュレーションによる評価の特徴としては、時間的な制約が少なくあらゆるケースを網羅できることが挙げられる。通常の試験では、critical なケースを含めた全てのケースを試してみることは不可能に近いが、シミュレーションを用いることでそれが可能となる。

3. 国際規格への対応

現在、日本では鉄道システムの安全性について、具体的な基準は定められていない。しかし、ヨーロッパでは安全に対する許容リスクを数値で示しており、日本の鉄道に海外の新技術を導入していきこうという動きとともに、日本の鉄道の安全性を国際規格 IEC62278 (RAMS 規格) に準拠させていく必要がある。また、海外の新技術への公正な評価のためにも、国際規格に準拠した数値による評価が必要になってくると考えられる。

新しい鉄道システムは RAMS 規格に従うことになるが、そこでは、数値による安全性の評価が求められている。安全性を数値で評価する際には、定量的な評価は必要不可欠であり、そのような場合にもシミュレーションによる定量的な評価は非常に有効であると考ええる。

このように、数値による安全性の評価が求められる場合においても、シミュレーションによる評価は有用であると考えられる。

〈3・1〉 IEC62278(RAMS 規格) について

IEC62278 は RAMS(Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety) 規格と呼ばれる国際規格である⁽²⁾。この規格は、plan-do-see の plan の段階で、信頼性、可用性、保守性、安全性に問題を生じる可能性のある事柄をよく検討し、そのシステムが達成すべき RAMS の各数値を設定し、それが達成可能であることを証明し、実際に運用し(do)、see の段階でその数値が実際に達成されていることを確認する。確認の時点で、達成されていない場合、または、達成度のマージンが少なくなっていると判断される場合には、改善のための対策を行う。

このサイクルをシステムの寿命まで継続していくというのが、RAMS 規格で述べられている。この規格は、数値や、具体的な方法論については記述されておらず、鉄道事業者が、認可機関との合意のもとにそれらを決めていく性質のものである。

新しい鉄道システムは RAMS 規格に従うことになるが、そこでは、数値による安全性の評価が求められている。安全性を数値で評価する際には、定量的な評価は必要不可欠であり、そのような場合にもシミュレーションによる定量的な評価は非常に有効であると考ええる。

このように、数値による安全性の評価が求められる場合においても、シミュレーションによる評価は有用であると考えられる。

4. 事故発生模擬シミュレータ

今まで述べてきたように、日本の鉄道システムを国際規格に対応させることは重要なことである。しかし、国際規格では安全性等の数値的な評価が求められているが、日本ではこれまで安全性を数値的には評価してこなかった。安全性を数値的に評価するには、より定量的な評価が必要であると考えられ、本研究ではシミュレーションを用いた安全性の定量的評価によって、安全性の数値的な評価を試みる。本節では、利用するシミュレータについて述べる。

〈4・1〉 概 要

鉄道システムの安全性は信号システムにより担保され

ているが、信号システムは、各種フェールセーフ装置、機器、連動装置、転轍機等の組み合わせにより構成されている。従って、新しい装置、機器、連動機能等を含むシステムでは、これらの装置、機器、機能の故障に対して安全であるかを検証することが重要であるが、実際の車両を走行させて検証することは、危険を伴うケースが考えられるため、実際は FTA や FMEA によって事前に静的に検証してきた。

本シミュレータは、こうした機器、装置、機能を個別構成要素間の関係も含めてモジュール単位で設定し、これらのモジュールの故障モード(フェールセーフ側、フェールアウト側)と故障発生確率を設定して、車両走行シミュレーションを実施することにより、走行中の任意の時間に故障が発生した場合のシステムの安全性を動的に検証するものである。

故障については、現状では地上装置のみを対象としている。具体的には、信号現時、接近鎖錠、進路鎖錠、転轍制御、転てつ制御、転てつ機、軌道反応リレーなどである。これは、大抵の故障は地上側で起こっているためであるが、今後、車上側の故障についても考慮にに入れて進めていく。また、故障モードについては、今回の場合は安全側と危険側の2つに大別して扱っている。故障条件設定画面を kosho に示す。

線区については、実際の駅の一部とその周辺部を模擬している(sen)。この線区を各駅停車、急行追い越し、折り返しの3つのパターンで走行することができる。これに走行条件や故障確率の設定を行うことで、安全性の評価を行う。

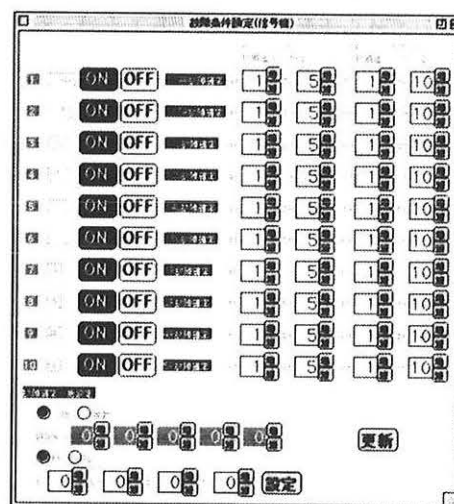


図 1 故障条件設定

Fig. 1. Failure Condition Setting

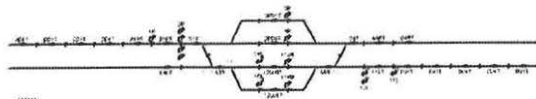


図 2 走行線区

Fig. 2. Railway Section

〈4・2〉 シミュレータの動作

本シミュレータは前述した通り、故障発生確率を設定し、その確率に従って各機器に故障を発生させ、そのときの車両の動作を確認するものである。ここで、その方法として具体的にどのようにシミュレーションするのかを述べる。

まず、構成要素の故障発生確率を設定し、長期間のシミュレーションを行い、確率的なデータを得ることができる。現状のシステムや新しい技術の導入の際の評価には、通常はこのような方法での評価が基本となる。

次に、システムの一部に新技術を導入した際や、長期間のシミュレーションにおいて重大な事故が確認された場合、該当箇所の故障発生確率を極端に上げて、故障の発生から事故に至る詳細な状況（設備の挙動や車両の速度変化等）など、短い時間内に発生する現象を詳細に解析することもできる。

このように、試験走行のように長期間の走行を行い、確率的なデータを得る手法と、事故原因の究明等のために、故意に故障を発生させ、現象を詳細に解析する手法がある。

5. シミュレーション

まず最初に、機器の故障率を一律に設定し、1つの機器に対してのみ故障率を変化させ、その機器の故障率が全体に及ぼす影響について評価を行う。この評価では、全ての機器の故障率を $1 \times 10^{-6}/h$ とし、評価対象機器の故障率を $1 \times 10^{-3}/h$ から $1 \times 10^{-9}/h$ まで変化したときのシステム故障率を算出する。シミュレーション時間は1日20時間走行とし、10年間行った。これを1つの故障率について3回行い、その平均値からそれぞれの故障率でのシステム故障率を算出した。結果を g1 に示す。

この結果から、 $1 \times 10^{-5}/h$ から $1 \times 10^{-9}/h$ に関してはほとんど差がなく、 $1 \times 10^{-4}/h$ からシステム故障率の上昇が見られ、 $1 \times 10^{-3}/h$ のときはその機器の故障率がシステム故障率とほぼ等しくなっている。つまり、他の機器が $1 \times 10^{-6}/h$ 程度のとき、故障率が $1 \times 10^{-3}/h$ の機器を導入すると、そのシステムにおけ

る故障のほぼ全てが故障率 $1 \times 10^{-3}/h$ の機器の故障となる。他の機器と故障率が同一の場合の機器故障率に点線を引いているが、 $1 \times 10^{-4}/h$ より右を除いては、点線の左右にほとんど差が見られない。ここから、1つの機器の故障率が下がった程度ではシステム全体としては何ら影響のないことがわかる。また、1つの機器の故障率が全体と比較して大きすぎる場合、その部分の故障がネックとなり、結果としてシステム故障率は増加してしまうこともわかる。

このようなシミュレーションを行うことで、全体と比較して信頼性の高い機器に対してはどの程度まで信頼性を下げてコストダウンを計れるか、また全体からみて信頼性のやや低い機器に関してはどの程度の信頼性を維持できればシステムに及ぼす影響を最小限にできるのかわかる。本システムの場合、他の機器が $1 \times 10^{-6}/h$ であるので、少数の機器であれば信頼性の高いものについては $1 \times 10^{-6}/h$ 程度、信頼性のやや劣るものについては $1 \times 10^{-5}/h$ 程度の故障率であれば、システムへの影響はほとんどないといえる。

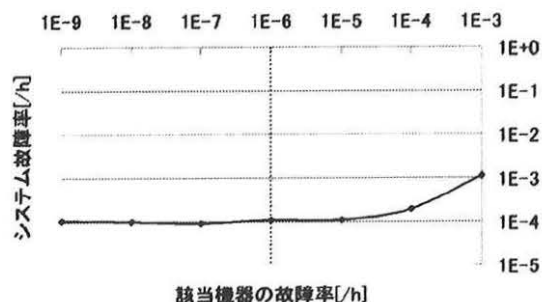


図 3 1つの機器の故障率-システム故障率

Fig. 3. Failure probability of one equipment - System Failure Rate

表 1 1つの機器の故障率を変化させたときのシステム稼働率

Table 1. System Utilization Rates when Failure Rate of One Equipment is Changed

対象機器	システム稼働率 [h]
—	0.9997
a	0.9982
b	0.9988
c	0.9986

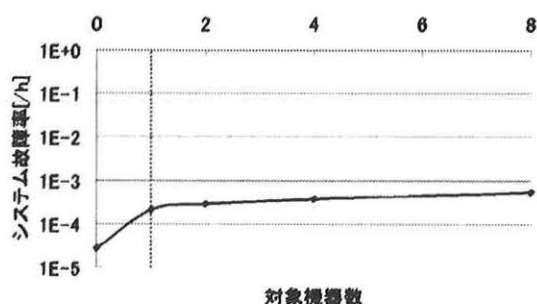


図4 対象機器数-システム故障率

Fig.4. Number of Object Equipment - System Failure Rate

次に全ての機器の故障確率を $1 \times 10^{-6}/h$ とし、1つの機器の故障確率を $g1$ よりシステムに影響があると判断される $1 \times 10^{-4}/h$ として、その機器の場所によってシステム稼働率がどの程度変化するかを評価した。シミュレーション期間は10年とし、結果を $t1$ に示す。

ここで、対象機器とは故障確率を $1 \times 10^{-3}/h$ とした機器である。1つの機器の故障確率をある程度以上上げることで、システム稼働率が影響を受けるが、故障機器によりその程度は異なることが確認された。従って、機器の故障率とシステムの稼働率が定量化されることにより、例えば、稼働率維持のためにどの機器の故障率を下げればよいか等の検討が可能となる。この場合では、機器 a の故障率を上げた場合のシステム稼働率が最小であったことより、機器 a の故障率を下げることで、システム稼働率維持のためには効果的である。

また、場所ではなく対象機器の数を増やした場合のシステム故障率の推移を $g2$ に示す。

これより、対象機器数が1つのときは影響が大きく、対象機器数が増えるに連れてシステム故障率の変動は小さくなっているのがわかる。 $g1$ でわかったように、このシステムにおいて機器故障率が $1 \times 10^{-4}/h$ 程度になると、その影響がシステム全体に大きく関わるため、システム故障率は大きく上がる。その後の変化量は機器数に比例し、その影響は最初の1つよりも遥かに小さい。 $g1$ の場合では少数の機器にしか対応できなかったが、このようなグラフを作成することで多数の機器に対応することが可能となる。システム故障率に閾値を設けることで、それ以下ならば問題はなく、それより大きい場合は故障確率が高すぎると捉えることができる。

最後に、安全側故障確率を $1 \times 10^{-6}/h$ 、危険側故障確率を $1 \times 10^{-8}/h$ とし、100年間の走行シミュレーションを行い、そのときのシステム故障率を算定した。これは試験走行を100年間行ったと考えることができる。結果を $t2$ に示す。

表2 100年間のシミュレーションにおけるシステム故障率

Table 2. System failure rate in simulation of 100 years

故障モード	故障発生回数	システム故障率
安全側	53	7.3×10^{-5}
危険側	1	1.4×10^{-6}

このように、長期間のシミュレーションによって定量的に安全性を評価することができる。RAMS規格では安全性をSIL(Safety Integrity Level)で表現しているが、そこでは危険側故障率はSIL4($10^{-8} \sim 10^{-9}/h$)以上が望ましいとされている。ここで、各機器についてはSIL4を達成しているが、システム故障率をみるとSIL2($10^{-6} \sim 10^{-7}/h$)程度であることがわかる。100年間という走行時間の制限もあるが、機器数が増えるにつれてシステム故障率は上がるため、1つ1つの機器がSIL4を達成しているからといって、それが安全なシステムであるとはいえない。このような全体を通しての長期間のシミュレーションによる定量的な評価も可能である。

6. まとめ

安全性等の数値的な評価手法としてシミュレーションを用いた評価法を検討した。シミュレーションによる評価法では、従来の手法では不可能なケースの評価が可能であると共に、時間的、またコスト的にも有効であると考えられる。鉄道システムの高度化・高速化、安全性・信頼性の向上を目指す等、鉄道システムは日々進化している。そんな中で、今後新しい鉄道システムは国際的にRAMS規格に従う方向にある。その際、安全性の定量的数値的な評価が非常に重要である。今回示したようなシミュレーションによる評価を用いれば、今までは困難であった動的な故障に対する安全性の定量的な評価が可能となる。

また、新しい信号システムや鉄道システムの実用化を図る場合、実際の線区で、実車両により安全性評価試験を実施することが望ましいが、クリティカルな試験で実施困難なものもある。また、長期間の試験による安全性の評価は非常に難しい。その場合、実設計に近いシステムによるシミュレーションが効果的となると考えられる。

文 献

- (1) 水間、山口、佐藤、大野：「鉄道システムにおける安全性の定量的評価法」，平成15年度交通安全環境研究所 研究発表会（2003）
- (2) 鉄道総合技術研究所：「RAMS規格の適用事例に関する調査検討報告書」（2003）