

鉄道システムの安全性定量的評価を目的とした動的シミュレータの開発・検討

交通システム研究領域 吉永 純 水間 毅 山口 知宏

1. はじめに

鉄道システムは、他の交通機関と比較して安全性が高いといわれているが、最近の例を引くまでもなく一旦事故が生じた際の被害の甚大さ、その社会的な影響は計り知れないものであり、鉄道システムの安全性、信頼性を堅持し、向上させていくことは最大の課題である。

これまでの安全対策は、事故から得た教訓を対策に生かして来たが、システム全体の安全性の議論はなされず、安全を過度に担保するシステムが構築される場合や、逆に事故が起きるまで安全への配慮が見落とされがちになるなど、必ずしも均一ではなかった。

本研究は、鉄道システムにおける安全性等について事前に、リスク分析等や国際規格である RAMS を活用して定量的に評価し、システム全体の安全性等を確保する方策を提言可能な手法を開発することにより、さらに安全性の高い鉄道システム設計を行うことが可能な、動的シミュレータの開発を行うものである。

本稿では動的シミュレータを開発し、信号システムの個々の機器の故障率がシステム全体の故障率及び稼働率に与える影響等について解析を行ったので報告する。

2. 国際規格による安全性等評価

2.1. RAMS 国際規格の利用

平成7年に発効した WTO/TBT 協定（貿易の技術的障害に関する協定）により、WTO 加盟国は原則として ISO、IEC 等の国際規格を基礎として国家規格を制定することが義務づけられ、これを契機として日本においても国際規格への対応が急速に進められている。また、国際的な動きとして、自国の規格又は EN 規格（欧州規格）等の地域規格を国際規格化する動きが非常に活発化している。

鉄道分野においても、EN 規格をベースとした国際規格の制定が進んでおり、その多くが個々の装置、部品等の仕様を定める規格ではなく、システム全体を対象とした規格という点も特徴である。これらのうち、平成14年に発行した「RAMS 規格」(IEC62278)は、次節にて詳細を述べるように、鉄道システムに関して、安全性等の許容リスクを数値化し客観的な評価を行うための手順を定めた（具体的数値は定められていない）国際規格であり、少なからず今後日本に対しても影響を与えるものと思われる。

RAMS 規格では具体的な安全性等の評価方法、検証方法は定められていないため、RAMS 規格を適用するには、どのような定量化手法・評価方法により算出するかが課題である。

そのため、本研究では事故発生の可能性を定量的に検証することが可能な動的シミュレータを用い、RAMS 規格へ対応できるものの開発を目的とした。

2.2. RAMS 規格の構成

RAMS 規格の規格名は正式には The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability, and safety であり、以下の4つの頭文字から RAMS と称されている。

- ・ Reliability (信頼性)
- ・ Availability (可用性、稼働率)
- ・ Maintainability (保守性)
- ・ Safety (安全性)

上記4項目について、鉄道システムが達成すべき目標値をそれぞれ設定し、それが達成可能であることを証明し、実際に稼働した後は、その数値が実際に達成されていることを確認することを規定している。達成されていないと判断される場合、又は達成度のマー

ジンが少なくなっていると判断される場合には、改良のための対策を行う。

システムの一部の改修又は更新等を行う場合に関しても、このサイクルを繰り返し適用し、最終的にシステムを廃棄するまで続けることが定められている。

しかし、RAMS 規格においては、鉄道事業者及びメーカーが行うべき検証の項目及びその手順等は定めているが、具体的な数値的規定や数値の設定方法、検証方法は規定されていないため、ケース毎に検証の深度が異なる可能性がある。

2.3. 安全性等の評価方法

システムの安全性等を評価するための評価手法としては、静的評価法と動的評価法があり、それぞれ下記のような特徴がある。本研究は、個々の構成装置に発生した故障が、システム全体の安全性等に与える影響等の解析を行うことを行うため、動的評価法を採択したシミュレータを開発することとした。

2.3.1. 静的評価法

一般に、新しいシステムの設計段階及び試作段階において行うもので、机上検討が中心となる。このような事前の検証も非常に重要ではあるが、基本的に個々の機器の故障に対しての評価となるため、静的評価法のみで故障の同時発生や、連鎖的に発生する場合等の動的なものに対して評価を行うことは極めて困難である。

2.3.2. 動的評価法

主に、試験走行を通じて行う評価を指す。シミュレーションによる評価も動的評価法に分類される。静的評価法では対応しきれない、故障の発生が他の機器に新たな不具合を発生する等の動的な変化を伴う故障に対する評価や、任意期間における故障の発生確率等の時間的経過を伴う場合の評価が比較的容易な方法である。

実物により試験を繰り返し、それを評価することがもっとも正確ではあるが、多大なコスト及び時間を要するため、シミュレーションによる評価を用いることが有効である。

3. 事故発生模擬シミュレータの開発

3.1. 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。信号システムは、連動装置、リレー接点、鎖錠装置、転てつ機等の非常に多くの機器により構成

され制御されている。そのため、新しいシステムを開発又は導入する際には、これら構成装置、機器及び機能に、確率的に故障が発生した場合に対しても信号システムとして重大な事故に至らないよう動作することを検証し、設計を行うことが重要である。

しかし、実際の車両を走行させて検証することは危険を伴い、また時間的制約があることから、現状では F T A 解析、F M E A 解析により静的な評価が行われている。

一方、本シミュレータでは、こうした構成機器、装置及び機能について個々に、またシステムとして構成機器等の相互の動作を検証することが可能となるよう、モジュール単位を設定し、これらのモジュールの故障モード（安全側、危険側）及び故障発生確率を任意な値に設定し、車両走行シミュレーションを実施することにより、列車走行中の任意の期間に故障が発生する確率、及び発生した場合の信号システムの安全性を動的に検証するものである（図 1）。

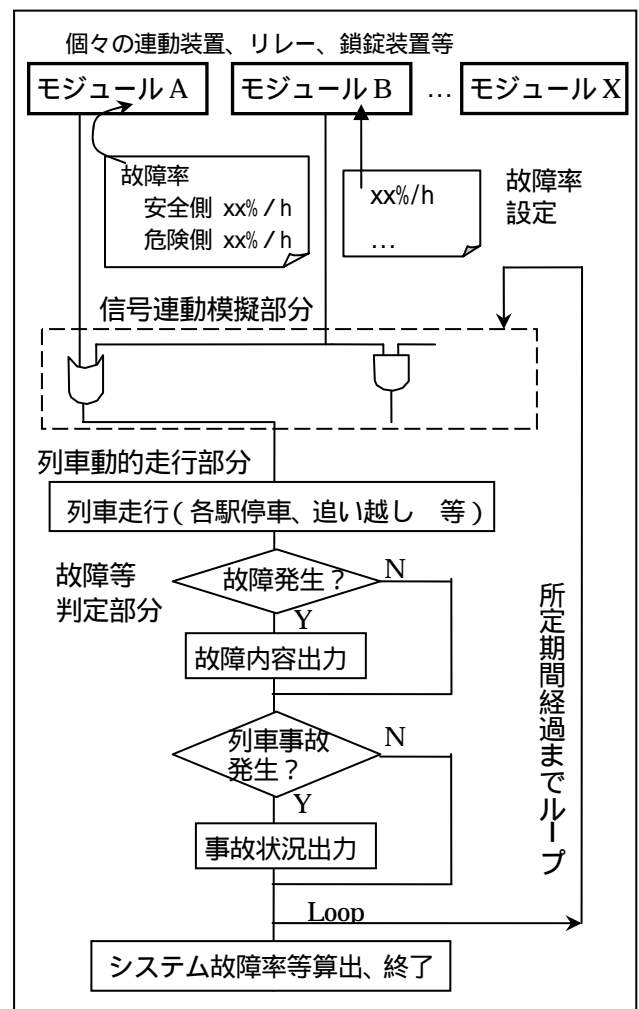


図 1 シミュレータの動作ブロック図

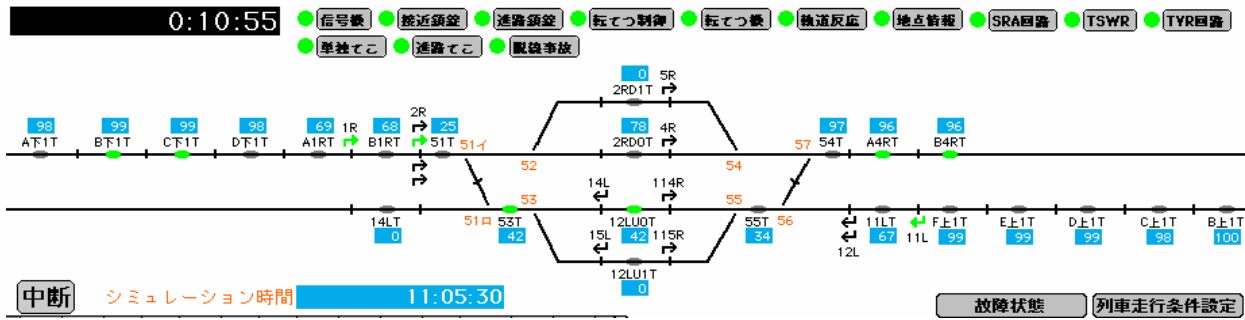


図2 シミュレータにおける走行路線

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、信号現示、接近鎖錠、進路鎖錠、転てつ制御、転てつ機、軌道反応リレー等である。これは大半の故障は地上側で生じていることを踏まえたものであるが、今後、列車側での故障の発生についても考慮にいれ、シミュレータの改良を進めたい。また、故障モードについては今回の場合は安全側、危険側の2つに大別して扱っている。

シミュレータの対象線区については、実際の駅の一部とその周辺部を模擬した(図2)。この線区を各駅停車、急行追い越し、折り返しの3つのパターンの列車を走行させることができる。これに、走行条件や故障率の設定を行うことで、安全性の評価を行う。

3.2. シミュレータの動作

本シミュレータは前述したとおり、故障率を設定し、その確率にしたがって各機器に故障を発生させ、その際の列車の動作を評価するものであるが、その具体的なシミュレーション方法を述べる。

一つは、システムを構成する要素の個々の故障率を設定し、長期間のシミュレーションを行い、システム全体の安全性及び信頼性に関する確率的なデータの取得を行うものである。稼働中のシステム又は新しい技術を導入する場合の評価方法としては、通常このような方法での評価が基本になる。

一つは、システムを構成する要素の故障率は同一値に設定し、うち一部の機器の故障率のみを極端に上げて設定することで、特定の機器における故障の発生が事故に至るまでのシステムの挙動や車両の動態の変化等の詳細な解析を行うものである。これは稼働中のシステムの一部に新技術を導入する場合や、前述の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等の解析及び対策の立案のために有効な方法である。

4. シミュレーション実験結果

4.1. 特定機器の故障がシステムに与える影響

4.1.1. 信頼性についての検証

すべての機器の故障率を一律に設定し、特定の1つの機器のみ故障率を変化させ、その機器の故障率がシステム全体に及ぼす影響について評価を行った。

この評価では、全ての機器の故障率を $1 \times 10^{-6} / h$ とし、評価対象とする特定の機器の故障率(以下「特定機器の故障率」という。)については、 $1 \times 10^{-3} / h$ から $1 \times 10^{-9} / h$ まで変化させ、それぞれの場合におけるシステム全体の故障率(以下「システム故障率」という。)を算出した。シミュレーション時間については、1日20時間走行とし、10年間行った。これを1つの故障率に対して3度行い、その平均値からそれぞれの故障率におけるシステム故障率を算出した。その結果を図3に示す。

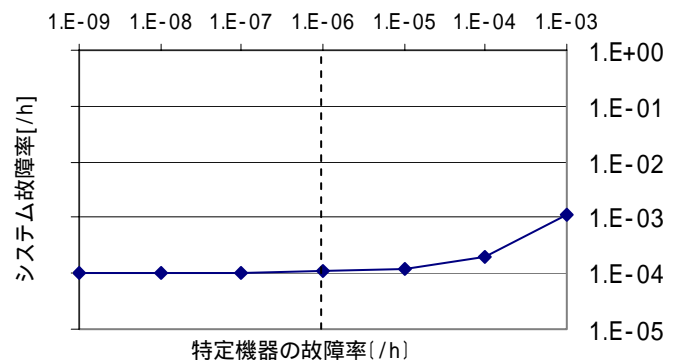


図3 特定機器の故障率 - システム故障率

この結果では、特定機器の故障率が $1 \times 10^{-9} / h$ から $1 \times 10^{-5} / h$ までの間のシステム故障率には、ほとんど差が生じなかった。 $1 \times 10^{-4} / h$ から上昇がみられ、 $1 \times 10^{-3} / h$ の時に、特定機器の故障率がシステム故障率と一致する結果を示した。

これは、特定機器に発生する故障が、システムに発生する故障のほとんどを占めた結果、1つの特定機器

がボトルネックとなり、システム全体の故障率を悪化させていることを示している。また、逆に、特定機器の故障率が他の機器の故障率 $1 \times 10^{-6} / \text{h}$ (図3中の点線部)より左では、システム故障率に変動を生じていないことは、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ほとんど影響がないことを示している。

このようなシミュレーションを行うことにより、全体と比較して故障率の高いと思われる機器に対しては、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化できるか、という評価が可能になる。本実験の場合では、他の機器の故障率が $1 \times 10^{-6} / \text{h}$ であり、 $1 \times 10^{-5} / \text{h}$ 以下であれば、システムの影響はほとんどないといえる。

4.1.2. 稼働率についての検証

全ての機器の故障率を $1 \times 10^{-6} / \text{h}$ とし、特定機器の故障率を前節図3よりシステム故障率に影響があると判断される $1 \times 10^{-4} / \text{h}$ とし、その機器の場所によってシステム全体の稼働率(以下「システム稼働率」という。)が、どの程度変化するかをシミュレーション期間10年として検証した。結果を表1に示す。

表1 特定機器の故障率 - システム稼働率

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

表1により、1つの機器の故障率が、システム稼働率に影響を与えるが、故障機器によりその程度に差があることが示された。したがって、機器の故障率とシステム稼働率とを定量化することにより、例えば、稼働率を高めるためには、どの機器の故障率を改善すればよいか、等の機器単位での検討が可能になる。この場合では、機器aの故障率が悪い場合のシステム稼働率がもっとも低いことから、aの故障率を改善することがシステム稼働率の向上に有効であるといえる。

4.2. 長期間における故障率の検証

安全側の故障率を $1 \times 10^{-6} / \text{h}$ 、危険側の故障率を $1 \times 10^{-8} / \text{h}$ とし、100年間の走行シミュレーションを行い、システム故障率を算定した。また、発生した故障の詳細の出力を分析し、列車走行に与える影響か

ら、安全側の故障、危険側の故障に分類した。その結果を表2に示す。

表2 100年間でのシステム故障率

故障モード	故障発生回数	システム故障率
安全側故障	53	$7.3 \times 10^{-5} / \text{h}$
危険側故障	1	$1.4 \times 10^{-6} / \text{h}$

このように長期間のシミュレーションによって定量的な安全性の評価を行うことができる。

RAMS規格では、安全性を SIL (Safety Integrity Level) で表すこととしている。具体的に SIL をどの程度とすべきか規定されていないが、RAMS規格の詳細を定めた EN50129 (Communication, signalling and processing systems Safety related electronic systems for signalling) では、参照情報として、危険側故障率は、SIL4 ($10^{-8} / \text{h} \sim 10^{-9} / \text{h}$) 以上が望ましいとされている。

この場合、各機器については SIL4 を達成しているが、システム故障率では、SIL2 程度 ($10^{-6} / \text{h} \sim 10^{-7} / \text{h}$) 程度であるとわかる。機器数が増えるについてシステム故障率は悪化するため、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、システム全体を通じての長期間のシミュレーションによる評価が可能である。

5. まとめ

鉄道システムは、高度化、高速化、安全性・信頼性の向上を目指し、日々進化している。そのような中で、国際的に RAMS 規格の活用等、安全性の定量的数値的評価が重視されるようになってきている。

今回示したようなシミュレーションによる評価により、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になる。

このシステムは、現在は、信号システムの故障に限った機能としているが、今後は、車両側の故障を含めることで、さらに実設計に近いシミュレーションが可能になるため、効果的な評価が行えるものと考えている。