

シミュレータによる鉄道技術の定量的評価法

交通システム研究領域

水間 毅 佐藤 安弘 山口 知宏

1. はじめに

近年はシミュレーション技術が発達し、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、実際に走行させた上での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、IEC 62278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行った評価に際しては、実際に車両等を走行させて、評価値を示すことが困難である。

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。

本稿では、シミュレーション技術を利用して、鉄道システム、技術の評価が可能なる例を、交通研が開発したシミュレータを基に説明し、鉄道技術の定量的評価とシミュレーション技術の利用例について述べる。

2. 鉄道技術の評価とシミュレーション

2.1. シミュレーションの種類

シミュレーションは実際には実施し得ないまたは起きてはいけない事象を模擬して、システムや新技術の動作、応答を確認して、評価するものである。従って、航空機のフライトシミュレータや鉄道の運転シミュレータ等は、最大限実機を使用して、その走行を正確に模擬し、その上で、実際には起きてはいけない事象（故障、異常等）を発生させて、その時の飛行機、鉄道の動作を忠実に模擬させて、パイロット、運転士の対応を評価するものである。従って、実動作を忠実に模擬する必要があり、それが重要である。

また、一方では、車輪 - レールの接触や車両の運動・挙動のように、モデル化をして、実動作に近づけようとするためのシミュレーションもある。これは、鉄道走行に伴う物理現象を把握しようという目的で開発が行われている。

これらのシミュレーションの特徴は表1のように整理される。

表1 シミュレーションの種類と役割

	利用用途	利点	欠点
実機等を用いる形態	訓練（運行シミュレータ）	実動作を忠実に再現可能	規模が大きくなりコスト大
モデル化による形態	現象把握（走行シミュレータ）・解析	コンピュータにより簡易に実現	実動作との乖離が課題

2.2. 交通研で開発するシミュレータのコンセプト

以上の特徴を踏まえ、交通研では、実機を意識して、限りなく正確に模擬し、現象把握が可能なシミュレータを開発し、そのデータにより定量的な評価が可能なソフトウェアを開発している。

2.2.1. LRT 走行シミュレータ¹⁾ 列車走行シミュレータは従来から開発され、列車の走行に関するモデル化も各方面から開発されてきている。

交通研は、これらの成果を基に、こうした列車走行を実地図上に走行させる、モデル化と実規模の複合したシミュレータを開発している。また、このシミュレータでは、実地図上の走行に伴う、電力消費量、二酸化炭素排出量等も走行に従いながら計算可能としている。

2.2.2. 事故発生模擬シミュレータ²⁾ 国際規格等で求められているシステム、装置の安全性に関する定量的評価は実際の装置、システムで実施すると長時間とコスト増となってしまう。しかし、単純なモデル化によるシミュレーションでは、実際の値と異なる可能性がある。

従って、交通研では、実際の装置、システムを忠実にモデル化したシミュレーションを作成し、それを利用した定量的評価法の検討を行っている。

2.3. シミュレーションの利用法

シミュレーションの利用方法は各種、各様あると思われるが、交通研では、2種類のシミュレータにより、以下の目的でシミュレーションを利用することとしている。

表2 交通研シミュレータの利用法

	概要	利用法	利点
LRT 走行シミュレータ	地図上を、交通信号機に従い LRV と自動車が走行する	LRV 導入時の自動車交通への影響、混雑率の変化を評価する	実機を導入しなくてもその効果が評価可能
事故発生模擬シミュレータ	列車走行中に故障が発生した場合のシステムの安全性を確認する	国際規格に求められている定量的評価を実施する	critical な条件による安全性の確認が可能

すなわち、実機を利用して長期間あるいは高コストで行われていた評価を短期間で精度良く実施すること、実際に起こりえない事象を装置レベルで発生させ、その動作をシステムレベルで動的に再現させ、評価することを目的として開発を行っている。

3. シミュレータによる定量的評価

本章では、交通研が開発したシミュレータにより定量的評価を実施した例を示す。

3.1. LRT 走行シミュレータによる評価

LRT はヨーロッパを中心に普及が進んでいるが、日本においては、自動車交通との関係で導入には慎重である。従って、LRV の導入と自動車交通、交通施策の効果との関係を定量化できるシミュレータを開発中である。

3.1.1. シミュレータの概要 本シミュレータの特徴は、導入する LRV の車両性能を模擬するだけでなく、道路上に敷設することを想定して、地図上に路線を設定して、道路交通(自動車、バス)と並行して、また交通信号機に従って模擬走行することが可能な

点にある。

図1に、地図上に LRV 路線を設定し、道路交通と並行して走行している画面例を示す。

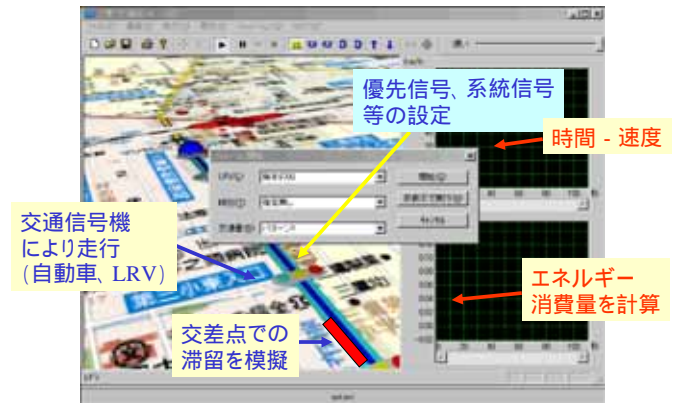


図1 LRT 走行シミュレーション例

LRV は、設定した路線を設定した車両性能、速度制限、交通信号機に従って走行するが、その時の速度、電力消費量(力行、回生)はリアルタイムに計算、表示される。また、自動車交通は、流量として計算し、赤信号により滞留して、それが制限値を超えた場合は渋滞と判断して、赤列表示となる。

こうしたシミュレータにより、LRV に乗車した場合の平均乗車時間、電力量が計算されるばかりでなく、LRV を導入して道路車線が減ることによる渋滞量の伸び、自動車の平均走行時間の変化や優先信号や自動車流制限等の交通施策を行った場合の成果等を定量的に示すことが可能となる。

3.1.2. シミュレータによる評価例 三鷹駅 - 交通研前間に LRV 路線 (6 駅、2.3km) を設定し、現状の自動車交通流が LRV を導入することによりどのように変化するかをシミュレートした。路線上には 13 の交通信号機と関連する 31 の道路がある。

現状の自動車交通量及び信号現示変化は調査を行ったデータに基づいて設定した。

LRV の走行結果を図2に、自動車交通量の変化を表3に示す。

自動車については、1時間あたりの交差点での交通量を実データに基づいて設定し、交差点での自動車待ち台数により交通流として計算した。ここで、平均待ち時間は、交差点で待っている自動車ののべ台数を赤信号時間で割って算定した。また、LRV は北から南に単線走行させた。

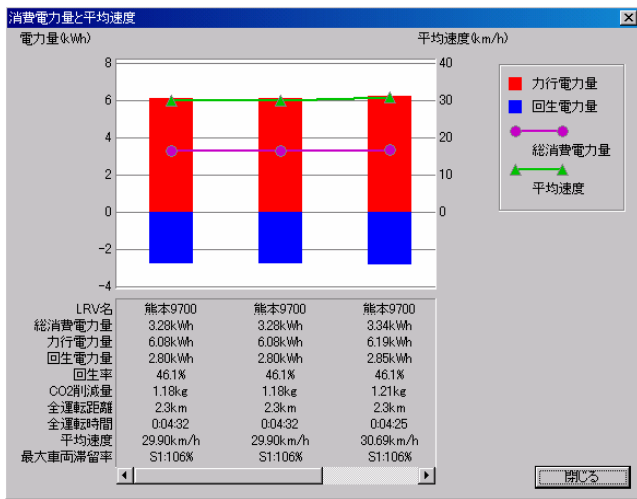


図2 LRV 走行結果例

表3 自動車交通量変化計算例

	路線数設前		一般信号		優先信号		
	路線数	平均待ち時間(s/台)	路線数	平均待ち時間(s/台)	路線数	平均待ち時間(s/台)	
交差点1	北南	2	43.88	1	83.21	1	83.21
	南北	1	57.93	1	57.81	1	57.81
	東西	1	28.51	1	28.51	1	28.51
	西東	2	28.42	2	28.43	2	28.42
交差点2	北南	2	31.90	1	57.53	1	49.91
	南北	1	58.52	1	58.42	1	50.77
	東西	1	27.02	1	27.02	1	27.27
	西東	1	26.90	1	21.20	1	20.72
期待値		37.87		45.27		43.33	

この例によると、LRVは通常交通信号機制御では272秒で走行していたものが、優先信号機制御になると265秒で走行可能となり、優先信号機の効果が示されている。また、LRVの路線を設定する前と後で、LRVの走行方向と同一の自動車一台当たりの交差点における平均待ち時間は、ほぼ倍に増えた事が分かる。ただし、優先信号機を設定しても、道路での自動車の平均待ち時間はそれほど変化していないことが確認された。

これは、LRVの性能が自動車の性能に比してそれほど悪くないため、LRV用の優先信号機に対しても、自動車はスムーズに対応できることと、この例の場合は、元々、南北方向の自動車交通流の多さに合わせた信号機制御がなされていたため、路線数が一つ減っても、それほど自動車交通の滞留が増えなかったものと考えられる。

このようにして、本シミュレータを利用すれば、LRV走行による直接的な評価（走行時間、電力消費量等）ばかりでなく、影響を受ける自動車交通流の評価も可能となり、各種施策（優先信号、パークア

ンドライド等）を施した場合の効果、実車両の導入前にある程度、定量的に把握可能となる。

3.2. 事故発生模擬シミュレータによる評価

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、criticalな試験で実施困難なものもある。その場合は、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。本シミュレータでは、信号、車両のcriticalなケースの安全性を検証可能なように開発を進めている。

3.2.1. シミュレータの概要

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、転つ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も考えられるため、実際はFTAやFMEAにより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）と故障確率を設定（図3参照）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しようというものである。

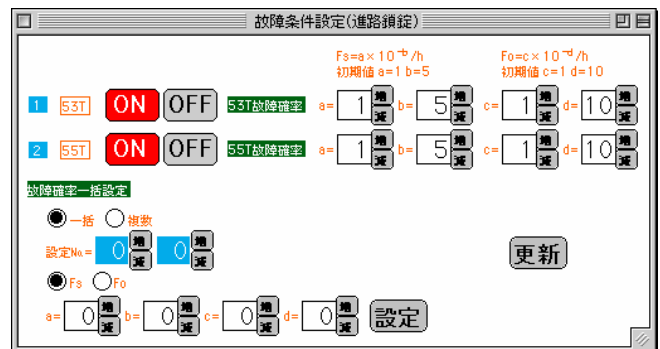


図3 故障モードと故障確率の設定

この場合は、設定した故障確率によっては、同時に故障が発生したり、フェールアウト側（危険側）の故障を意図的に発生させることができ、その場合のシステムの安全性を評価できる。

図4に、故障設定画面とその時の車両の動作を示した例を示す。

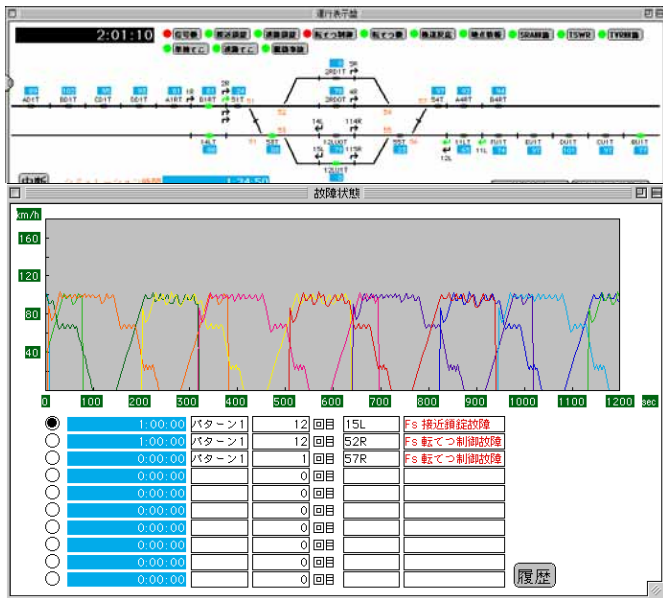


図4 故障設定画面とそのときの車両走行例

この例では、接近鎖錠と転てつ機制御機能が故障した時に、赤信号により列車が停止したことを示している。ただし、これが車両が当該転てつ機直前を走行している場合は、脱線という事象に至ることも考えられ、この再現については、本シミュレーションでの長時間走行時に検証可能となる。

3.2.2. シミュレータによる評価例 鉄道システムは機器故障等の異常が起きた場合の安全性を評価するだけでなく、もし危険側故障がある場合には、その発生確率とその場合の影響度を評価することも重要である。

表4に、現状の軌道回路・連動論理による駅周辺部における安全性を、機器の故障率を変化させて、 1×10^5 時間、車両走行をシミュレートした結果例を示す。

表4 機器故障率に対するシステム安全率評価例

機器故障確率 (Fs)	機器故障確率 (Fo)	故障件数 (Fs)	故障件数 (Fo)	安全側故障率	危険側故障率
$1 \times 10^{-5}/h$	$1 \times 10^{-8}/h$	23	1	$2.3 \times 10^{-4}/h$	$1 \times 10^{-5}/h$
$1 \times 10^{-6}/h$	$1 \times 10^{-9}/h$	2	0	$2.0 \times 10^{-5}/h$	0

この例では、機器の安全側故障確率が $1 \times 10^{-5}/h$ 程度であると、約10年間で20回程度のシステム停止があるが、故障確率を一桁下げることによりシステム停止回数も一桁下げられることを示している。また、

危険側故障確率も示されているが、この場合は、車両走行と関係ないところでの危険側故障であったため、車両の脱線、衝突には至らなかったが、 $1 \times 10^{-8}/h$ 程度の危険側故障確率では10年に一回程度は危険事象が起こる可能性があることが示されている。

こうしたシミュレーションを通じて、システムの許される範囲で、妥当な機器故障確率を設定することが可能となる。

4. シミュレーション技術と鉄道技術の定量的評価

以上のようなシミュレータにより、計算値が求められるが、これらの計算値をどのように評価していくかも重要な課題である。

4.1. 環境影響評価

LRTシミュレータのようなものは、実際に走行しなくても、電力消費量、自動車からの排気ガス量が算定されるため、こうした計算値を用いて、環境への影響や省エネルギー効果がどのように変化するかを評価することができる。また、走行時間や乗り換え抵抗等の計算値により乗客の快適性、満足度等も評価可能となる。

4.2. 国際規格対応

新しい鉄道システムの評価は、IEC62278に従うこととなるが、そこには、システムの危険側故障確率をSIL(Safety Integrity Level)で評価することとなっている。信号システム等の安全に関連する部分はSIL4($10^{-8}/h \sim 10^{-9}/h$)が求められており、表4の例では、機器単体ではSIL4を達成しているが、システムとしては、走行時間の制限もありSIL1($10^{-5}/h \sim 10^{-6}/h$)となっている。

5. おわりに

以上、鉄道システムにおけるシミュレータの利用法について、交通研での実施例を中心に述べたが、今後、ますますコンピュータ技術が発展していくことを考慮し、より実用に近いシミュレータを開発していき、シミュレーションしかなしえない事象の解析の評価についても検討する必要がある。そして、シミュレーションによる評価法の標準化に関する検討も必要となってくると思われる。

参考文献

- 1) 工藤他 2004 電気学会 産業応用部門大会 Y-63
- 2) 杉浦他 2004 電気学会 産業応用部門大会 Y-15