

鉄道システム全体の 戦略的信頼性評価手法の 開発



犬塚 史章* 福山 浩史* 香西 恵介*

当社では、安全で安定した輸送サービスの向上を目指して、車両・設備・営業の各方面から様々な対策を行ってきており、その結果、個々の分野における安全性や信頼性は着実に高まってきている。しかし近年の技術革新やニーズの多様化により、鉄道システムは高度化・複雑化しており、今後もより効果的な対策を実施するためには、鉄道システム全体としての弱点を適切に把握し、どこに重点的な設備投資等の施策が必要かを判断するための統一的な指標が必要である。本研究は、当社の営業エリア全体を1つのシステムとして捉え、安全面・安定輸送面から総合的に評価する取組みである。既に基礎モデルを構築し、その有効性を確認している。ここでは、基礎モデルの概要と現在の取組みについて紹介する。

●キーワード：信頼性、安全性、リスク、評価

1 はじめに

近年の技術動向、ニーズの多様化に代表されるように、鉄道事業をとりまく環境は常に変化にさらされている。これに対して当社は、安全で安定した輸送やその他サービスの向上を目指して、車両・設備・営業等の各面から評価や対策を行ってきており、その結果、個々の分野における安全性や輸送の安定性は着実に高まってきている。今後さらなる向上を推進するためには、鉄道システム全体として、どこが弱点であり、どこに重点的な設備投資等の施策が必要か、また各種施策により当社の安全性・安定性はどこまで向上が見込めるか等、鉄道システム全体を俯瞰した統一的な指標が必要である。

こうしたことを背景に、本研究では鉄道システム全体を安全面、安定輸送面について総合的に評価し、設備投資等各種施策の順位付けやその効果の確認等に有効と考えられる信頼性評価手法の構築に向け研究を行っている。既に基礎モデルを構築しその有効性については確認しており、現在は基礎モデルの抱える課題について取り組みを進めている。

本報告では、構築した基礎モデルと現在の取組みについて紹介する。なお本文中の説明に数字やグラフを用いた箇所があるが、説明を容易にするための参考データであり事実とは異なるものである。

2 信頼性評価手法の考え方

2.1 本研究における信頼性とは

本研究における『信頼性』とは、お客様の当社に対する期待と考えた。これまでの当社における設備投資等の対策では、対策実施により対象とした事故や輸送混乱（以下事故等と呼ぶ）の発生件数が何パーセント減少するか、という観点が多かった。今後はお客様の視点に立ち、対策の実施によりお客様の期待する内容がどれだけ向上するか、というアプローチが必要である。

お客様が当社に期待することは、安全性と輸送安定性である。したがって本研究を進める上で信頼性を構成する要素に安全性及び輸送安定性を考慮し、それぞれについて評価することとした。

2.2 安全性に関する国際規格

安全性について取り扱う以上、国際的な標準や規格などについて確認をしておくことは重要である。ここで国際的な動向について簡単に示す。

国際的な標準や規格については、ISO（国際標準化機構）やIEC（国際電気技術会議）等により多数発行されてきた。これら相互の整合性を持たせるため、1990年にISO/IEC Guide51が制定され、その後1992年に改定されている。

Guide51によると、安全(Safety)は「受け入れることのできないリスクからの解放」と定義されている。また「リスク」等、主要な用語も定義されており、それぞれ以下の通りである。

- (1)リスク(risk):「危害の発生する確率と危害の重大さの組み合わせ」
- (2)危害(harm):「人体の受ける物理的な障害若しくは健康障害、または財産若しくは環境の受ける害が生ずること」
- (3)許容可能なリスク(tolerable risk):「その時代の社会の価値観に基づいて、所定の状況において受け入れられるリスク」

ISO/IEC Guide51は1999年2月に改定により「危害」の定義が大きく変わり、旧版では「(人の) 傷害または健康障害」と定義されていたが、環境問題に対する意識



図1：JR東日本の営業エリア

の高まりを受けて、上記のように財産と環境に関する記述が追加された。

この改定は安全を考える上で大きな転換をもたらした。単純なシステム停止は安全とは言えず、冗長化や故障診断機能の充実により系の稼働率を高め、すみやかな障害復旧を図ることによりリスクを低減することが求められることになったのである。

2.3 目標設定

本研究の目標は、図1に示す当社の営業エリア全ての鉄道システムについて、安全性（お客様の死傷、社員の死亡）及び輸送安定性（お客様の遅れ時分）を損なう事象をリスクと定義し評価することである。

モデルは図2に示すように、諸条件を入力すると安全性及び輸送安定性の2種類の評価値が出力される構成とする。運行ダイヤの変更や各種設備の統廃合、お客様の変動などを評価値に反映し、事故等の対策効果が検証できるものを目指している。

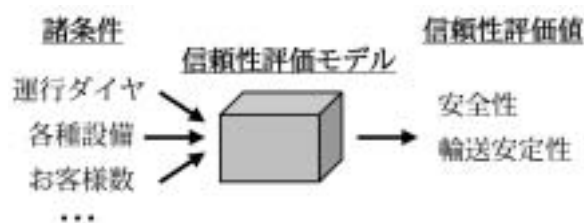


図2：信頼性評価モデル入出力イメージ

3 信頼性評価モデルの構築

3.1 基礎モデルについて

評価は、一般的なリスクアセスメント手法を用いている。リスクアセスメントの考え方では、リスクは次式で表すことができる。

$$\text{リスク} = \text{発生頻度} \times \text{影響規模}$$

本研究においてもこの考え方を適用し、リスクを伴うシナリオを定義し、それら全てについて当社の営業エリア全域で計算を行い、その積算値を信頼性評価値とした。

主な作業の流れは、図3に示す通りであり以降にそれぞれの作業について説明する。



図3：信頼性評価の進め方

(1)シナリオの分類

最初にリスクを伴うシナリオを定義する。今回の評価では、安全性と輸送安定性を損なう事象をリスクと定義した。

具体的な方法として、当社で情報収集に用いている運転事故データベースの分類を参考に進めることとした。このデータベースは、当社内で事故等が生じた時、再発を防止するためにその都度情報を収集し蓄積しているもので、当社が発足した1987年4月1日以降のデータが蓄積されている。分類は、大別すると鉄道運転事故と輸送障害に分けられ、前者は省令により定められた図4に示す6項目であり、後者は鉄道による輸送に障害を生じた事象のうち鉄道運転事故以外のもので当社では約40項目を

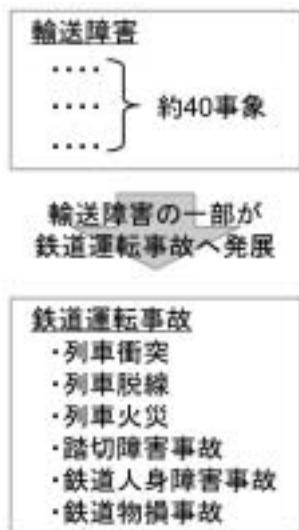


図4 事故等の報告分類

定義している。

本研究では、上記の分類を基本として細分化を進めた。分類の細かさについては、安全性及び輸送安定性の観点から影響の大きく異なるものが同一分類の中に混在していないかを確認し、混在している間は細分化を進めることとした。その結果、今回の研究で用いるシナリオは鉄道運転事故と輸送障害それぞれを細分化したものを合わせて約450シナリオとなった。

(2)発生頻度分析

本研究の狙いは、鉄道システム全体を適切に評価し、各種施策実施時の効果を事前に把握して設備投資判断の材料にすることにある。施策の多くは、設備の機能向上や廃止により発生頻度の高いシナリオの誘発要因を削減することにある。このため発生頻度の定義は、発生メカニズムを考慮し、誘発要因を構成する回数や長さ等を計算過程に包含することが必要であると考えた。

一方で事故等は、列車本数や旅客数、保安設備、周辺環境、ヒューマンファクターなど様々な要因が複雑に絡み合って生じ、これら全てを適切に発生頻度に組み込むことは困難である。このため複数の要因のうちシナリオ発生に最も関わりの深いもの（複数の要因を組み合わせる場合もある）を主要因とし、この主要因により発生頻度を定義することを検討した。ここでは、主要因を構成する数を「基数」と呼ぶこととし、シナリオ毎にこの基数を定義して、シナリオ発生実績を基数で除することで発生頻度を算出することとした。

また鉄道運転事故の主要因は輸送障害と考えることができるため、予め評価した関係する輸送障害の評価件数を鉄道運転事故の基数とした。これにより施策実施で輸送障害が減少した時、それを主要因とする鉄道運転事故も減少するような評価が可能となる。

$$\text{輸送障害:発生頻度} = \frac{\text{シナリオ発生実績}}{\text{基数}}$$

$$\text{鉄道運転事故:発生頻度} = \frac{\text{シナリオ発生実績}}{\text{関係輸送障害評価件数}}$$

以下「ATS-S_n区間における場内信号機冒進」のシナリオを例に具体的に説明する。信号冒進とは、運転士が停止信号を超えて進行する事例で列車衝突など重大事故につながる可能性があり、この対策としてATSに代表される保安装置を設置している。発生頻度は、保安装置の種類によっても異なり、またその時の影響は何の信号機を冒進するかにより異なる。このためシナリオには保安装置の種類と信号機の種類を含む必要がある。

信号冒進は、運転士が停止信号の確認を誤ることで発生するので、主要因としては「運転士が停止信号を確認する回数」が考えられる。しかし停止信号は、先行列車との関係により現示されるものでもあり、この数を集計することは困難である。そこで『運転士が信号を確認する回数が増えれば運転士が停止信号を確認する回数も増加し見誤る回数も増加する』と仮定すると、「運転士が信号を確認する回数」が基数と考えることができる。

例えば東北本線仙台駅において運転士が信号を確認する回数は、信号機の数と列車本数の積として算出できる。また仙台駅は、東北本線の他に仙山線や仙石線もあるためそれぞれ算出を行う。同様に各線各駅の組合せ全て（約2100箇所）について算出し、この総和が当社の「運転士が信号を確認する回数」であり基数となる。仮にこの数が2億回/年、信号冒進が年に10件発生しているとすると発生頻度は次式で算出できる。

$$\text{発生頻度} = \frac{10}{0.2 \times 10^9} = 0.5 \times 10^{-7} (\text{件/回})$$

さらに、このようにして発生頻度が決定すると、駅毎に基数の元になった数値にこれに乗ずることで、その駅におけるシナリオの発生件数が算出できる。これらを集

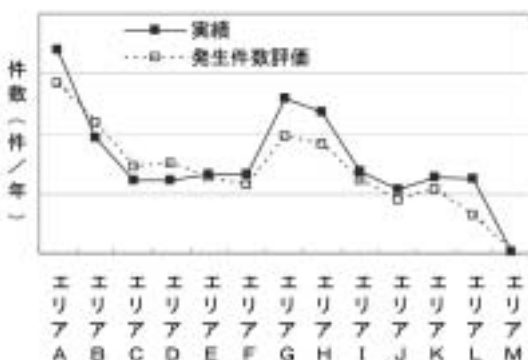


図5 基数を用いた発生件数評価と実績の比較

計して図5のように特定のエリアの実績値と比較することで、基数の妥当性を検証することが可能である。

(3) 影響規模分析

影響規模分析は、安全性と輸送安定性についてそれぞれ行う。

○安全性

安全性の影響は、当社のお客様と社員の死傷を考慮し下記を対象とした。

お客様：列車内・ホームに関するもの（自殺除く）

社員：鉄道運転事故に関するもの

影響の大きさは、シナリオ毎に過去の実績による平均値を定義した。

$$\text{安全性影響(人)} = -(\text{シナリオ})$$

○輸送安定性

輸送安定性の影響は、お客様に与えた迷惑度を表現するために、乗車中及びホーム上のお客様の待ち増分の総和（人・分）と定義した。具体的には、シナリオの大きさ（運行中止時間）と発生場所（線駅名）をパラメータとする関数を考え評価に用いた。

この関数は、パラメータ「線駅名」をあらかじめ約200に分割した当社の営業線区に対応させ、それぞれの区間の平均運行間隔や乗車人数・乗降客数を取得し、これらに影響規模を示すパラメータ「運行中止時間」を加味してお客様の延べ待ち増分を意味する輸送安定性影響を算出する。算出方法が複雑なためここでの詳細説明は割愛するが、シナリオの大きさや発生場所の違いをパラメータとして吸収し、1つの関数で影響をモデル化したのがポイントである。

$$\text{輸送安定性影響(人・分)} = -(\text{運行中止時間、線駅名})$$

なお後半に述べるが、基礎モデルの影響算出方法では評価に発生時刻が反映できていないことが課題として挙げられる。

(4) リスク計算

リスク計算は駅又は駅間を最小単位として、図6に示すように、全ての箇所個別に計算を行い、それらを比較したいエリア（特定の線区）・シナリオを立体的に集計し評価値を算出する。以下にリスク計算の流れを示す。

- ① シナリオ毎に基数を元にして各箇所の発生頻度（件/年）を算出
- ② シナリオ毎に発生頻度（件/年）に影響を乗じて信頼性評価値（安全性・輸送安定性）を算出
- ③ 比較対象毎に集計し次の信頼性評価値を得る
 - ・ 安全性評価値
 - ・ 輸送安定性評価値

$$\text{信頼性評価} = \frac{\text{（箇所毎評価値）}}{\text{エリアシナリオ}}$$

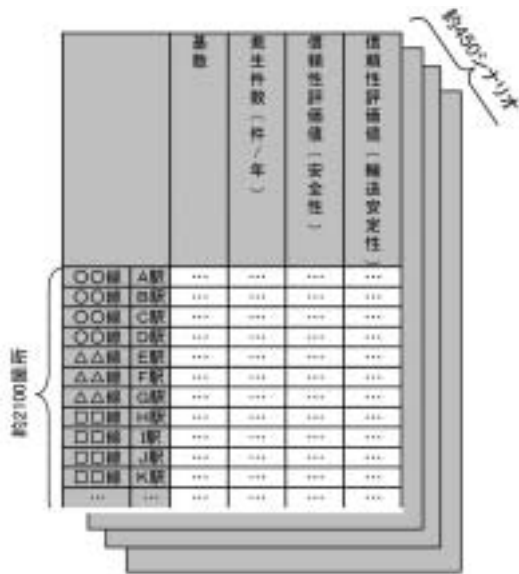


図6：リスク計算イメージ

(5) 活用例

以上のようにして構築したモデルがどのように活用できるのか、いくつかの例を示す。

1つ目として、現状把握に用いることが挙げられる。例えば図7は、当社の輸送安定性評価値を特定のエリアに分割し、類似したシナリオをまとめたシナリオ群毎に示したグラフである。評価値はリスクを見積もっているため、大きい値を示している箇所は対策の必要性を検討すべきものである。当社は営業エリアを12支社に分けて管理しているが、仮にエリアを支社にすれば、当社全体

における弱点支社・シナリオが分かり、またエリアを支社内の管轄線区などで表せば、各支社が何の対策に重点をおくべきか定量的に把握することが可能となり、対策の絞込みに活用することができる。

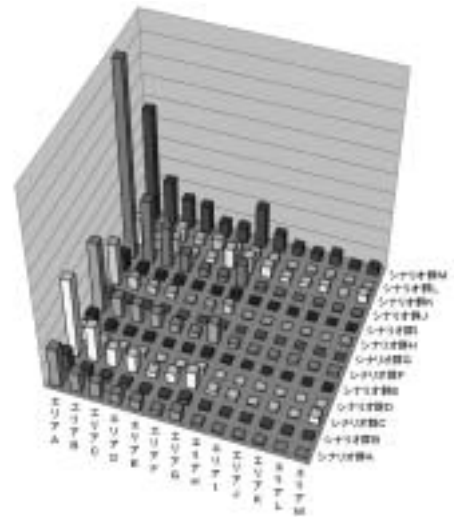


図7：エリア・シナリオ群別輸送安定評価値

2つ目として、施策の比較に用いることが挙げられる。例えば、現状把握により対策を必要とするエリアを絞り込み、踏切事故や防災対策に重点をおく必要があることが明らかになったとする。踏切事故対策Xと防災対策Yについて、基礎モデルへの入力を変更し算出した結果、効果が変更前の会社全体の評価値に対して表1の通りであり、必要とする費用は踏切事故対策Xに比べ防災対策Yが3倍だとすると、費用対効果では踏切事故対策Xの方が安全性及び輸送安定性いずれも効果的であると判断することができる。

表1：施策効果の比較

	安全性	輸送安定性
踏切事故対策X	0.07%減	0.580%減
防災対策Y	0.15%減	0.014%減

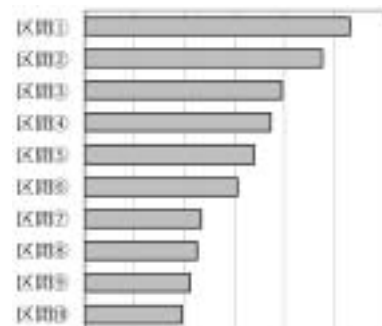


図8：対策効果の大きい区間

3つ目として、効果の高いエリアを検索することが挙げられる。例えば、踏切事故対策Xを施行しようとする時、予算等の都合から対象箇所を限定して対策を実施せざるをえないことがある。この場合、全ての踏切に対策を実施したと仮定して、図8に示すように効果の大きい区間の順に並べることで、効果的な対策実施区間を検索することが可能である。

3.2 現在の取組み

基礎モデルはプロトタイプであり、次に示すいくつかの課題を抱えている。現在は、これらの課題を通して基礎モデルの改善に取り組んでいる。ここでは1つ目の課題について問題点と解決の方向性について示す。

- ・不確実性の考慮
- ・潜在的なリスクの定義
- ・リスク値が同等で影響規模が異なるシナリオの比較など

○「不確実性の考慮」について

事故等は偶発的に発生するために、発生時間帯の不確実性や発生頻度が低い場合はその発生間隔の不確実性などが伴う。基礎モデルでは、バラツキは平均値として計算を行っているため不確実性を考慮できていない。このことは、モデル活用時の判断に誤りを招く懸念がある。

例えば発生時間帯の不確実性について考える。車両故障が発生することを考えた時、その影響は発生時間帯が通勤ラッシュ帯か早朝や深夜、昼間の閑散とした時間帯かで大きく異なる。しかし基礎モデルではその評価方法に時間帯を考慮せず、算出根拠にしている列車本数や乗車人数、乗降客数は1日の平均データを用いているため、通勤ラッシュ帯に多いシナリオを評価する場合には、その影響を過小評価する可能性がある。同様に考えると、閑散時間帯に多いシナリオを評価する場合には、その影響を過大評価する可能性もある。この場合、AとBの2つのシナリオについて対策を検討する場合、基礎モデルの評価結果を用いると図9のような懸念が生じる。



図9：基礎モデルにおける概念

実際に過去の実績からシナリオ毎に発生時間の傾向を調べると、特徴的なものとして次の(a)から(d)に示すシナリオが挙げられ、これらには図10に示す傾向がある。

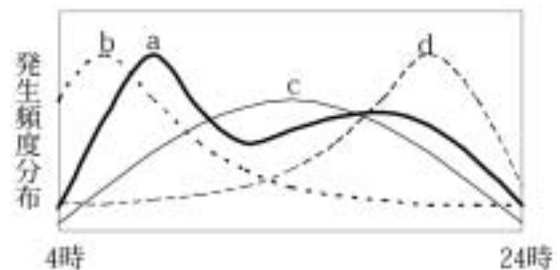


図10：シナリオタイプ別発生時間傾向

- (a) 車両故障、信号冒進など列車本数に関係するもの
- (b) 転てつ装置や信号装置など設備に関係するもの
- (c) 踏切支障、線路内支障など昼間の社会活動に関係するもの
- (d) 鉄道人身事故、ホームからの転落など

タイプ(a)は、車両故障などを示す頻度分布である。車両故障が偶発的に発生するならば、その発生する時間帯分布は列車本数の時間帯分布と相関関係があると考えられる。列車本数の時間帯分布もタイプ(a)と類似した分布であり、発生メカニズムの面から考えても車両故障が発生する時間帯分布はタイプ(a)であることが裏付けられた。

タイプ(a)に属するシナリオである車両故障や信号冒進は通勤ラッシュ帯に発生する可能性が高いにも関わらず、基礎モデルでは影響算出に用いる数値は平均値を採用していることから、その影響を過小評価する可能性がある。このため発生時刻の不確実性をモデルに反映させることが検討課題として挙げられる。

また他の例として、発生頻度が極端に少なく影響規模が大きいシナリオの場合にも懸念が生じる。例えば平均

すると50年に1度発生する大規模地震を考えた場合、「50年に1度」という定義は数少ないデータの平均により定めたもので、実際は50年ではなく25年あるいは100年に1度かもしれない。発生間隔を実際より長く見積もってしまった場合には影響を過小評価してしまう可能性がある。このため発生間隔が長く影響が大きいシナリオの場合、発生間隔の不確実性をモデルに反映させることが検討課題として挙げられる。

これらの課題を考慮し、基礎モデルをより実践的なモデルに改良するため、入力値に確率変数を適用することを検討している。このような方法としてモンテカルロシミュレーションが挙げられる。この方法はいくつかの確率変数を入力として、出力値の分布を推定するものである。(囲み記事参照)

例えば影響に時間帯を反映させる場合、検討するシナリオがどのタイプに属するか判断し、発生時間の特定に図10で示した(a)から(d)の確率分布を入力として適用する方法が考えられる。また発生頻度が極端に少ないシナリオに対しても、発生頻度に確率分布を適用し検討することが可能と考えている。

4 おわりに

高度化・複雑化した鉄道システムにおいては、人の感覚に頼るのではなく、それらを適切に評価(定量化)して対策を実施することが重要である。基礎モデルの構築により、鉄道システム全体に対して統一的な指標を用いた一定の評価ができるようになったが、今回の報告で紹介したいくつかの課題が残されている。

今後もこれらの検討を進め、安全でかつ安定した輸送サービスの更なる実現に向け役立てたいと考えている。

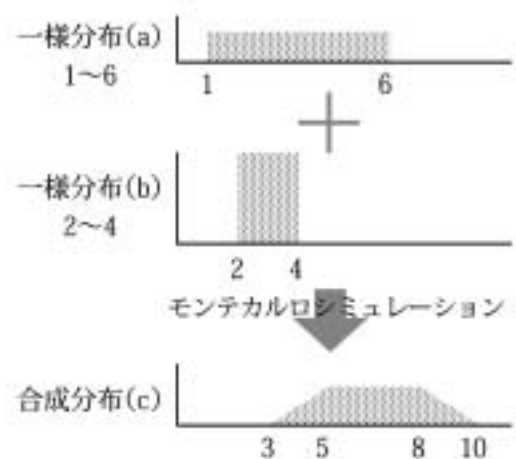
参考文献

- 1) 石津、福山、犬塚、釜瀬：鉄道の信頼性に関する研究，第40回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2003
- 2) 石津、福山、犬塚、釜瀬：鉄道の信頼性に関する研究, J-Rail, 2003

モンテカルロシミュレーションとは

モンテカルロシミュレーションとは一般に乱数を用いる数値シミュレーションの総称である。入力データに確率変数を適用することができ、各入力値として指定された確率分布にしたがってランダムにサンプリングされた値を使用し、繰り返し計算を行う。この結果として出力データも確率分布として得られる。

(例)



上図で一様分布(a)と一様分布(b)の合成結果を問われて即答できる人は少ないと思われるが、モンテカルロシミュレーションを用いると、合成結果を合成分布(c)として簡単に得ることができる。