

鉄道システムに関する RAMS 性能評価法の 設計と検証

三和雅史 山口剛志 松本麻美 大山達雄

1 はじめに

我が国における鉄道事業は、約 150 年前に開業して以来、全国規模でのネットワークを有する主要な移動・輸送手段として成長を続けてきた。そして、現代では電気、ガス、水道、通信と同様の社会インフラとして広く利用されており、こうした発展の基礎となった要因として、安全性の維持、向上は勿論のこと、高品質なサービスの実現を挙げることができる。こうした状況は世界的にも同様であり、例えば高速鉄道は日本や欧州だけでなく、アジアでも建設が続く等、多くの国において、また国を跨いで、鉄道は重要な移動・輸送モードとしての地位を築いてきた。

このような鉄道の世界的な発展やグローバル化を背景にして、近年では鉄道システムの性能や仕様の国際規格化が進んでいる（関（2019））。例えば、電気、信号分野の信頼性、安全性については、2002 年に IEC（国際電気標準会議）の国際規格として RAMS（信頼性（Reliability）、可用性（Availability）、保全性（Maintainability）、安全性（Safety）を表す用語）が制定された（平栗（2012）、松本（2013））。この RAMS を規定する IEC62278 では、鉄道システム全般を対象に一連のライフサイクルの過程における性能評価内容が示されている。鉄道線路（軌道）の分野では、2006～09 年に EU の資金で実施されたプロジェクト INNOTRACK において、RAMS による分析・評価のガイドラインが検討され、報告書にまとめられた（INNOTRACK（2011））。また、鉄道車両分野では IRIS（International Railway Industry Standard）（IRIS（2016））が開発され、車両の品質向上等に用いられている。

このように、鉄道システムの性能評価、品質向上のために各種規格の開発が進められ、そこで用いられる指標については、今後、鉄道の各分野のシステムの設計や管理法の評価に適用されるだけでなく、総合システムとしての性能評価や鉄道事業者間の、或いは各国におけるサービス品質の比較等にも広く応用される可能性がある。本論文では、我が国の鉄道システムを RAMS の概念を用いて性能を評価する手法の設計を目的として、各種公表データに基づく評価指標の設計と各々に関連する各種パラメータの推計法を提案し、検証を試みる。

2 鉄道システムの性能評価と RAMS

2.1 鉄道システムの性能評価と影響特性要因

RAMS の概念を用いる主要な目的は、鉄道システムの安全で快適な輸送手段としてのサービスがユーザに機能的、効率的に提供される可能性を定量的に提示することである。従って、鉄道システムの輸送サービスに関する性能評価に際しては、その推進要因、阻害要因、それらの要因が有する特性、そして各要因の検知法等を考える必要がある。本章では、これらの影響要因を (1) 事故特性要因、(2) 被害・障害特性要因、(3) 復旧・保守特性要因の 3 種類に分類し、各々を考慮した評価項目を検討する。

以下では、各影響要因の概要と、これに関連する既存研究及びその成果について説明する。

(1) 事故特性要因

鉄道事故に関連して信頼性、安全性等を評価した既存研究は数多く存在する。我が国の鉄道事故データの分析例としては、列車衝突事故の発生過程を事故データの分析結果に基づきモデル化したもの (福田 (1997))、また個別の事故形態に着目し、その原因や背後要因について分析したもの (武内 (2017)、横井 (2021)) やヒューマンエラーの観点から事故発生プロセスを分析したもの (吉田 (2017)) 等がある。これに対し筆者らは、事故件数、事故原因の全体的な経年推移の傾向を把握する統計モデルを構築し、事故防止策を提案した (Miwa et al. (2006)、山口ほか (2015))。また、鉄道運転事故、踏切事故の発生件数の経年推移や安全設備の導入状況との関係性を分析した (Miwa et al. (2006))。一方で、被害が大きな鉄道重大事故の発生間隔や事故内容の履歴データを分析し、その統計的特徴や影響要因を明確化して、事故防止策を提案した (三和、大山 (2010))。更に、列車脱線事故データを分析して事故発生モデルを構築した (三和、大山 (2009, 2019)、Oyama & Miwa (2022))。

海外においては、事故発生率の推定モデルを列車キロや年をパラメータとして構築し、事故防止装置の導入効果の分析結果を示した研究がある (Evans (1997, 2001, 2002, 2003))。また、イギリス国鉄の民営化後に発生した幾つかの大規模な事故を分析した研究 (Richard (2002)) 等、個別の事故に関する分析、考察例が存在する。一方、安全性向上策の検討例としては、安全投資費用と効果の関係をリスクの最小化モデルとライフサイクルコストの最小化モデルにより概念的に示したもの (Sheng (2002)、Min & Jim (2002)) がある。

全体的には、既往研究の多くは個々の事故の発生メカニズムや背後要因の解明に関するものが多く、マクロな視点で事故の全体的な発生傾向を分析した例は少ない。

(2) 被害・障害特性要因

一般に、鉄道事故の発生に伴って人的被害、利用被害が生じる。人的被害としては事故に

伴って発生する死傷者が主要要因となる。一方、利用被害としては運転支障が主要要因として挙げられ、その評価指標としては、運転支障時間、列車遅延時間、運転休止（運休）本数等がある。

被害特性を扱った論文は、前述の筆者らによる運転支障時間の経年推移の傾向を把握する統計モデル分析や各年、或いは事故 1 件あたりの死傷者数の傾向を把握する統計モデル分析 (Miwa et al. (2006), 三和, 大山 (2009, 2010, 2019), 山口ほか (2015), Oyama & Miwa (2022)) があるが、筆者らの知る限りでは、このような被害を扱った研究は殆どない。

(3) 復旧・保守特性要因

鉄道事故が発生すると、運転再開（復旧）までに幾らかの時間を要し、この間、鉄道輸送のサービスを利用できない、或いは振替輸送により通常より長時間で乗り換えの多い移動が必要になることが一般的である。このような保全時間、運転支障時間は事故の種類や内容によって変動し、保全性に対する影響要因である。

一方、鉄道事故の発生を予防するために、軌道等の設備に対して保守が行われる。即ち、保守も鉄道システムの性能に対して影響する要因である。筆者らは、軌道の劣化状態を表すデータに基づいて将来の状態を予測するモデルを作成し (三和ほか (1999, 2001), Miwa et al. (1999)), その予測結果や保守用機械の移動等の制約を考慮しながら保守する箇所と時期を最適に決定する混合型整数計画モデル (三和ほか (2001), Miwa et al. (2001), Miwa & Oyama (2004), Oyama & Miwa (2006), 三和, 大山 (2013)) を構築して、これに基づくシステムが我が国の鉄道事業者において実際に利用されている (三和, 大山 (2013))。また、鉄道事故リスクを考慮した最適保守計画モデルに拡張して保守量とリスクのトレードオフ関係を定量化し、最適軌道保守量を提示する試みも行った (三和, 大山 (2009, 2019), Miwa & Oyama (2013), Oyama & Miwa (2018))。これらは、鉄道システムの信頼性、安全性を維持する上で、軌道の劣化を防ぎ、高い性能と品質の維持・向上に努めることが要求されるのに対応し、軌道の保守管理に関する意思決定をどのように行えばよいかという課題への成果である。

2.2 RAMS に基づく鉄道システムの性能評価

鉄道システムを RAMS により評価する研究や試みは、RAMS の制定以来、海外で多く行われてきた。

先述の INNOTRACK では、RAMS の各評価基準に対応する指標が提示された。また、アセットマネジメントを軌道に導入する必要があるとして、LCC 分析を行うことが強調された。LCC における費用分析は、技術的ライフサイクルに沿って発生する費用の評価により構成され、各作業等の費用は、時間軸とライフサイクルの 5 段階（調達、運転、保守、非

可用性, 社会経済) に割り当てられて 3 次元行列の形で表現される。INNOTRACK では、以下のような RAMS 性能の評価指標が示されている。

①信頼性 (R): 故障率・故障発生率 (RTRB), 平均故障間隔 (MTBF)

②可用性 (A): 列車遅延時間, 総列車遅延時間, 施設原因の列車遅延時間, 特定の施設原因の列車遅延時間, 旅客・貨物輸送の定時性

③保全性 (M): 平均保全時間 (MTTR), 故障設備に対する保全時間, 平均保全間隔, 平均修復間隔, 平均維持時間, 平均ダウンタイム

④安全性 (S): ハザード率, 事故件数, 脱線事故件数, 外部要因による事故件数, 内部要因による事故件数, 事故や損害に至るインシデント

IRIS は 2007 年に欧州や北米の鉄道車両メーカーが鉄道車両の品質を確保するために共同で作成した品質マネジメント規格である。欧州鉄道連盟 (UNIFE) は 2017 年に IRIS ver.3 を発行し, RAMS と LCC を並立的に扱っている。性能評価指標として, ①信頼性: 故障までの平均時間 (MTTF), MTBF, 故障間の平均走行距離 (MDBF), ②可用性: 稼働時間割合 (RTBF), ③保全性: MTTR が挙げられている。

一方, 国際規格とは別に, 軌道の設計と保守に関する決定を支援するために RAMS を用いた手法が提案されている (Filippo & Marinella (2017))。本手法では, 設計において短期と長期の費用をバランスさせるために, 建設, 検査, 保守, 更新等の事業者費用や利用者費用, 環境コストを含めた包括的な検討がなされている。RAMS に基づく分析モデルでは, MTBF, MDBF, MTTR の推計に, 以下の共通の定義式を用いている。

$$f(a, b, c, d, p, q) = 1 - \frac{a - be^p}{c - de^q} \quad (1)$$

a, b, c, d, p, q : パラメータ

RAMS の性能は, 以上の指標を統合した ORI (Overall RAMS Indicator) により評価される。ORI は 0 から 100% の範囲で次のように定義される。

$$ORI = \sqrt[4]{R \cdot A \cdot M \cdot S} \quad (2)$$

また, 信頼性と保全性の不確実性を考慮した LCC 推計法が提案されている (A. P. Patra et al. (2008))。具体的には, MTTF と MTTR を確率分布として与え, 列車の遅延, 脱線, 運休の発生を確率的に評価し, LCC を点推定ではなく範囲推定する。

RAMS と LCC を統合して評価する同様の試み (A. Calle-Cordón et al. (2018)) では, RAMS の性能が低いと運用や保守の費用が増大し, LCC が著しく大きくなる。一方, RAMS の性能が高いと運用や保守の費用は少なくて済むものの, 初期費用は大きくなる。従って, このような相互に関連する各種要因間のトレードオフ関係を明確にした上で, それらをどのように調整して最適戦略を得るかが鉄道事業にとって必要とされる。

表 1 鉄道事故の分類

鉄道運転事故 (列車の運転中における事故)	列車衝突事故	列車が他の列車または車両と衝突し、または接触した事故
	列車脱線事故	列車が脱線した事故
	列車火災事故	列車に火災が生じた事故
	踏切障害事故	踏切道において列車または車両が道路を通行する人または車両等と衝突し、または接触した事故
	道路障害事故	踏切道以外の道路において列車または車両が道路を通行する人または車両等と衝突し、または接触した事故
	鉄道人身事故	列車または車両の運転により人の死傷を生じた事故(上記の事故に伴うものを除く)
	鉄道物損事故	列車または車両の運転により500万円以上の物損を生じた事故(上記の事故に伴うものを除く)
輸送障害 (鉄道による輸送に障害を生じた事態)	鉄道による輸送に障害を生じた事態であつて、鉄道運転事故以外のもの	

3 RAMS に基づく性能評価指標の設計

3.1 性能評価指標の設計のための使用データ

我が国の鉄道事業法、軌道法、鉄道事故等報告規則及び軌道事故等報告規則では、「鉄道運転事故」は表1のように分類され、また、国土交通省監修の統計資料（運輸政策研究機構（1990-2022）、政府資料等普及調査会（1987-2020））では、10人以上の死傷者を伴う事故、或いは10両以上の脱線車両を伴う事故を「鉄道重大事故」と区分している。本章では、鉄道運転事故と鉄道重大事故の2種類に着目して過去の事故データに基づく鉄道システムの性能評価指標を提案する。

我が国の鉄道事故に関するデータは、国土交通省監修の出版物、統計資料や鉄道総合技術研究所の鉄道安全データベース（鉄道総合技術研究所（2022））に公開されている他、運輸安全委員会の調査対象事故等については報告書が公開されている。ここでは、これらのデータを用いてRAMS性能を評価する。分析するデータの期間は、データ取得可能期間を考慮して、鉄道運転事故については運輸安全委員会による調査が開始された2001.10～2019.3のデータを用いるのを基本とする。また、鉄道重大事故については、旧国鉄の分割・民営化後の1987.4～2019.3のデータを基本的に用いる。

なお、鉄道重大事故は分析対象期間中（32年間）に98件発生した。重大事故は先述のように死傷者数と脱線車両数という2つの基準によって分類されるが、発生した事故の殆どは死傷者数の基準に該当するものであり、脱線車両数の基準に該当するのは全て貨物列車による事故（7件）である。近年では、大都市圏を除くと10両以上の車両で組成された列車は

貨物列車と一部の長距離旅客列車のみであり、列車本数全体に占める割合は低い。そのため、基準の違いを特に安全性の評価の際には考慮する。

3.2 性能評価法の設計

(1) 信頼性

信頼性に関する性能評価指標としては、鉄道運転事故や鉄道重大事故の発生頻度・間隔等が考えられる。本稿では、我が国におけるデータの入手可能性を考慮して、INNOTRACK等で扱われている事故の平均発生間隔 (MTBF) と発生率 (RTRB) を用いる。

MTBF については、各事故の発生時刻と、その次の事故の発生時刻との間を発生間隔とみなして MTBF を推計し、また RTRB はその逆数として得られる。筆者らの研究 (三和, 大山 (2010)) によると、鉄道重大事故の発生はランダムな独立事象に基づく確率過程とみなすことができ、単位時間あたりの発生件数はポアソン分布に従うという知見を得ている。本分布は信頼性工学において故障率一定の設備での単位時間あたりの故障回数を分析するのによく用いられる (市田, 鈴木 (1984), 三根, 河合 (1989))。単位時間 (日, 週, 月等) あたりの事故発生件数を確率変数 x とすると、本分布の確率関数 $p(x)$ は、パラメータ λ を用いて、次式で表される。

$$p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad x = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

事故の発生件数がポアソン分布に従うとき、事故の発生間隔は指数分布に従う。指数分布の確率密度関数 $f(x)$ は次式で表される。

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (4)$$

この指数分布のパラメータ λ は RTRB に対応し、MTBF との関係は次式のように表される。

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

鉄道運転事故発生件数の年度推移を図 1 に、踏切障害事故 (踏切), 鉄道人身事故 (人身) とその他 (列車衝突, 列車脱線, 列車火災事故) の事故種類に分けて示す。MTBF は各年の日数を発生件数で除すことにより算出が可能である。発生件数は 2002 年 (年度) にかけて減少した後、2011 年までは変化は少ないが、その後は再び減少する傾向にある。このことから、大きく 2002 年以前, 2003~2011, 2013~2019 年の 3 期間に分けられる (Oyama & Miwa (2022))。また、踏切障害事故と鉄道人身事故の件数が多くを占めることから、これらの事故の防止が課題である。なお、以前は踏切障害事故の方がシェアは高かったが、近年では鉄道人身事故の方が高い。これは、高架化等による踏切の廃止や遮断機のない 3, 4 種

図 1 鉄道運転事故件数の推移

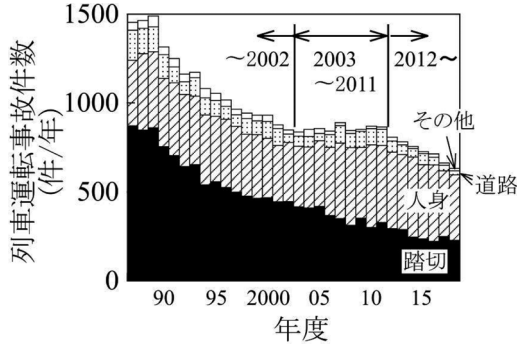


図 2 1日あたり鉄道運転事故発生件数の頻度

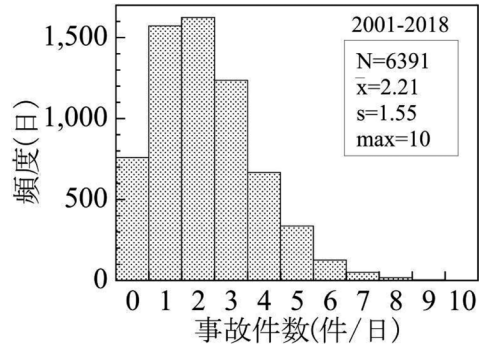


図 3 鉄道重大事故件数の推移

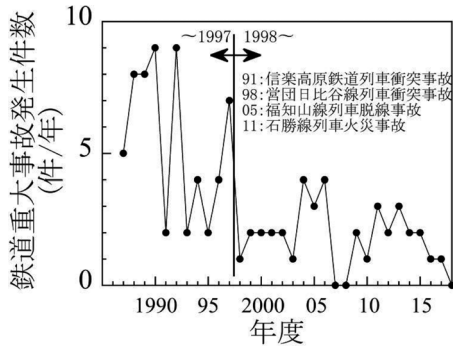
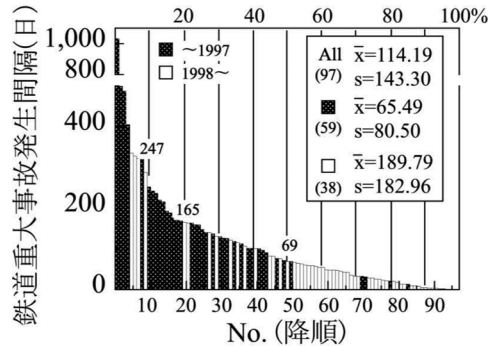


図 4 鉄道重大事故の発生間隔



踏切への遮断機の設置（1種踏切化）等の対策により、踏切障害事故の件数が減少したためと考えられる。

図 2 に 1 日あたりの鉄道運転事故発生件数の頻度分布を示す。1 日に 1~3 件程度の発生頻度が多く、裾野が右に広い分布形状であり、全国のいずれかの場所で鉄道運転事故がほぼ毎日発生している状況にある。ここで、本分布の一般的な確率分布への適合度を評価するために、分布の形状を考慮して、正規分布 (Norm)、指数分布 (Exp)、対数正規分布 (LogN)、ガンマ分布 (Gam)、カイ 2 乗分布 (Chi)、ワイブル分布 (Weib)、ポアソン分布 (Pois) を想定して評価した結果、全期を通して、また先に区分した 3 期間のいずれにおいても、ポアソン分布への適合度が高かった。よって、鉄道運転事故の発生過程についてもポアソン過程とみなすことができる。

鉄道重大事故発生件数の年度推移を図 3 に示す。ここでも MTBF は各年の日数を発生件数で除すことで算出できる。発生件数は、1997 年までは 2~9 件/年であるのに対して、それ以降では 0~4 件/年と少ない。列車衝突事故防止装置の設置や 3, 4 種踏切の削減等の安全性向上策が継続的に実施された効果によると考えられる。

鉄道重大事故の発生間隔の分布を上述の 1997 年の前後 2 期間で区別して図 4 に示す。1998 年以降では、以前に比べて平均値が約 125 日長い。この分布の一般的な確率分布への適合度を調べた結果、指数分布に対する適合度が高い傾向にあったことから、鉄道重大事故の発生もランダムで独立な事象とみなせる。このことは、先に実施した研究（三和、大山（2010））において得られた知見と一致する。

(2) 可用性

可用性に関する性能評価指標については、MTBF と平均保全時間（近似的に平均運転支障時間とみなす：MTTR）を用いて、「MTBF+MTTR」に対する MTBF の割合（稼働時間割合 RTBF）として以下の式で算出する。

$$RTBF = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (6)$$

上式は MTBF が大きい、或いは MTTR が小さい程、1.0 に近くなることを意味している。即ち、事故の発生が少ない、或いは事故時の復旧時間が短い程、RTBF は 1.0 に近くなる。

一方、最大遅延時間（MXDL）と運休本数（CNTR）については、いずれも各事故において得られる実績値データであるが、MXDL は影響を受けた幾つかの列車の中で遅延時間が最も長かった列車における値である。また、CNTR についても、複数の運休列車が存在した場合、運休区間が列車によって異なる状況まではデータから把握できない。このため、本稿では入手可能な MXDL と CNTR データを参考に用い、これを全事故について平均して評価する。

RTBF の算出に必要とされる MTTR の推計方法について述べる。鉄道運転事故において、各事故における運転支障時間を算出し、降順に並べた結果を図 5 に示す。全ての事故データには発生時刻の記録はあるが、運転再開時刻は必ずしも記録されていないため、本分析では運転支障時間を算出できた事故データを用いる。半分以上の事故では 1 時間以内に、また 80% 以上の事故では 2 時間以内に復旧したが、10% 程度の事故では 2.5 時間を超えており、72 時間を超える事故（全 25 件）は全て列車脱線事故であった。これは、運輸安全委員会による事故調査や復旧時に必要な脱線車両の載線、損傷した設備の修復、当面の事故再発防止策の検討・実施等に時間を要するためと考えられる。

鉄道重大事故についても、各事故における運転支障時間の分布を脱線の有無で分けて図 6 に示す。約 30% の事故で 24 時間／件を超え、ばらつきが大きいことから、重大事故での支障時間は非常に長くなる可能性があることが分かる。また、支障時間が特に長い 72 時間／件を超えるデータを除外すると、平均は約 13 時間／件であるが、脱線を伴う事故では伴わない事故に比べて約 12 時間／件長い。

鉄道運転事故における MXDL と CNTR を図 7、8 に各々示す。MXDL は半分以上の事故

図 5 鉄道運転事故の運転支障時間

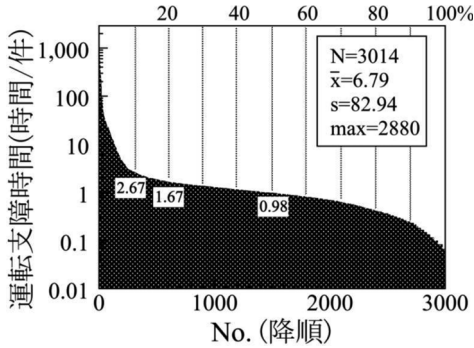


図 6 鉄道重大事故の運転支障時間

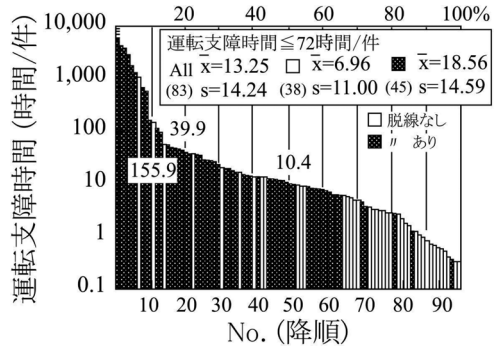


図 7 鉄道運転事故の最大遅延時間

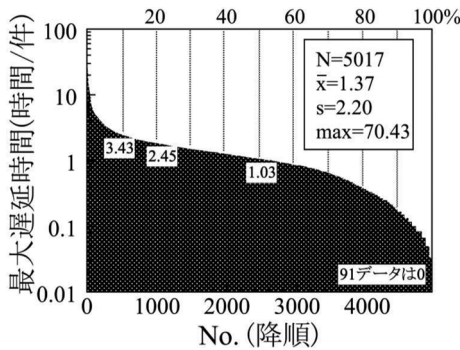
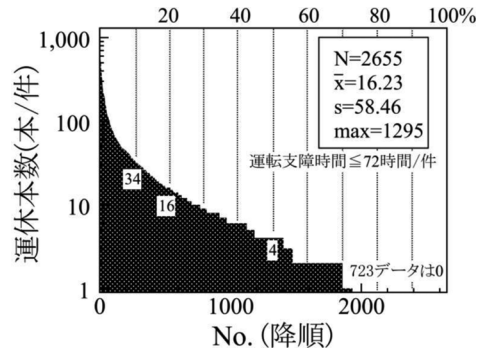


図 8 鉄道運転事故の運休本数



では 1 時間以内／件であるが、12 時間以上／件の事故が全体の 1% 弱存在し、その多くは列車脱線事故である。先述のように列車脱線事故では運転支障時間が長い傾向にあることが影響していると考えられる。また、長時間の遅延は JR で多く、これには貨物列車のような長距離を運転する列車で遅延が蓄積する影響等が考えられる。CNTR は殆どの事故で 30 数本／件より少ないが、ここでも列車脱線事故の場合に多く、JR と大手民鉄で多い。大都市圏（首都圏、大阪圏、愛知県）では、MXDL は殆どの事故で 18 時間以下／件である一方、CNTR が 200 本／件を超える事故が散見された。他の地域では、逆に MXDL が 20 時間超／件の事故が多い一方、CNTR は 200 本以下／件である。このような傾向は、事故時の運転整理において、大都市圏では密な列車ダイヤを前提とするため、列車を幾らか運休させることにより可能な限り迅速に正規のダイヤへの復旧を目指す傾向にあることが理由として考えられる。

鉄道重大事故についても、各事故における MXDL と CNTR を整理した結果を図 9、10 に各々示す。MXDL については、6 時間以下／件の比較的短いグループ（30 件）と 10 時間／件を超える長いグループ（10 件）が存在し、後者のグループの中の 9 件は鉄道車両と重量

図9 鉄道重大事故の最大遅延時間

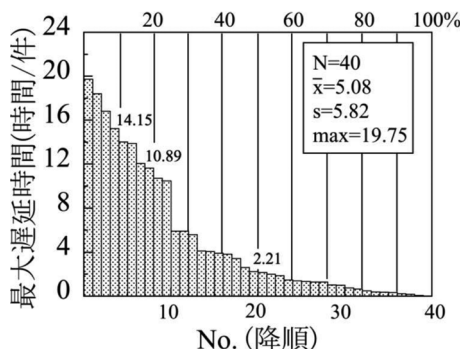
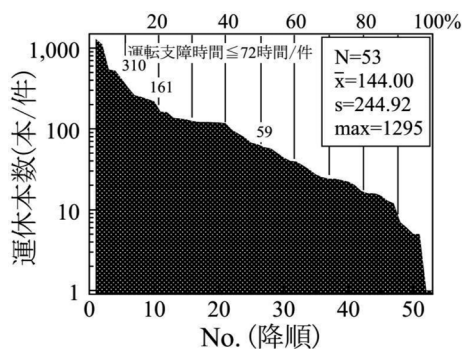


図10 鉄道重大事故の運休本数



物（大型自動車、建物、岩等）との衝突を伴うものであった。CNTRについては、上位10%では300本/件を超え、これらは運転本数が多い都市部で発生した事故であった。また、半数以上の事故では60本以上/件であり、鉄道運転事故での本数よりかなり多く、鉄道重大事故の影響度の大きさが現れていると考えられる。

(3) 保全性

保全性に関する性能評価指標としては、既存研究で多く用いられているMTTRを用いる。信頼性・保全性工学では、保全作業を構成する要素作業の重ね合わせ（比例効果則）として導かれる対数正規分布が様々なシステムの保全時間の分布を表すのに度々用いられる（市田（1979））。事故における運転支障時間についても、システムがダウンしてから回復するまでの時間であると考えられ、例えば筆者らが行った研究（三和、大山（2010））では、鉄道重大事故データの運転支障時間データは対数正規分布への適合度が高いという知見を得ている。この対数正規分布の確率密度関数は次の通りである。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

鉄道運転事故におけるMTTRについては、可用性に関する検討において算出したように、列車脱線事故で長かったことから、事故種類により増減すると考えられる。そこで、図11に事故種類別の運転支障時間の割合を示す。道路障害事故では全て1時間以内/件であり、また踏切障害事故と鉄道人身事故では概ね6時間以内/件である。一方、6時間/件を超えるのは殆どが列車脱線事故であり、前述のような復旧作業等に多くの時間を要するため、長時間化すると考えられる。

鉄道運転事故の運転支障時間の分布についても、一般的な確率分布への適合度の評価を試みた。ここでは、全種類の事故をまとめた場合とデータ数が多い事故種類の場合について評価した。いずれの場合についても、対数正規分布への適合度は高く、特に支障時間72時間

図 11 鉄道運転事故の運転支障時間（事故種類別割合）

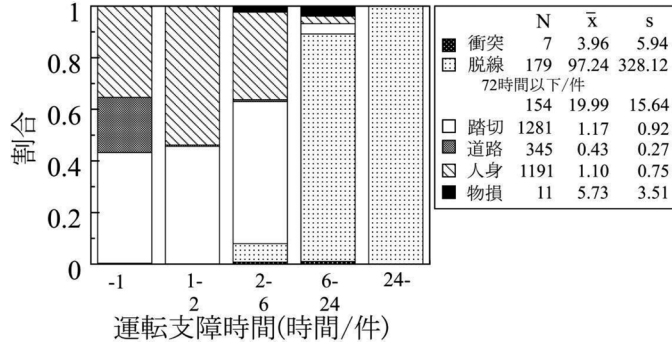
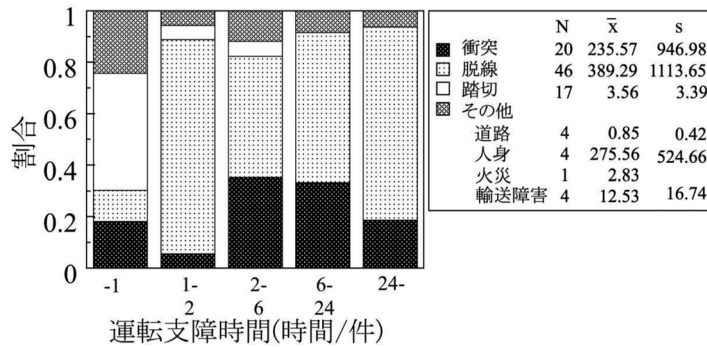


図 12 鉄道重大事故の運転支障時間（事故種類別割合）



以下／件の事故全体と列車脱線事故のデータへの適合度は非常に高かった。踏切障害，道路障害，鉄道人身事故においても，他の分布より概ね高かったが，適合度を表す χ^2 乗値が大きく，絶対的な適合度は高いとはいえなかった。図 5 に示したように，運転支障時間の大部分は 2 時間以下である一方，ごく一部では著しく長時間になるという，分布形状の特徴が影響していると考えられる。

鉄道重大事故の MTTR については，脱線の有無によって比較すると，約 19 時間（脱線あり）／件と 7 時間（なし）／件のように半日程度の差がある。そこで，事故種類別の支障時間の割合を図 12 に示す。事故件数が多い列車脱線，列車衝突，踏切障害事故に着目すると，支障時間の平均は，この順に長い。1 時間未満／件の事故では，踏切障害事故と，その他事故の割合が高いのに対し，1 時間以上／件の事故では列車衝突，列車脱線事故の割合が高いことから，これらの防止が支障時間の抑制に与える効果は大きい。

鉄道重大事故の運転支障時間分布（図 6）の一般的な確率分布への適合性を評価した。鉄道運転事故データの場合と同様に，対数正規分布への適合度が高かった。

以上の他，復旧性という意味での保全性とは異なるが，2.1 (3) で述べた鉄道施設等へ

の保守が鉄道システムの性能への影響要因となることから、例えば保守の費用や頻度を指標として想定することもできる。但し、保守費用等は鉄道事業者の経営状態や保有設備により変わり得ることから、各事業者の営業状況等の整理から行う必要がある。

(4) 安全性

安全性に関する指標としては、INNOTRACK において事故件数に関するものが幾つか示されていたが、他の既存研究では具体的な指標への言及がなく、また共通的に用いられている指標も認められなかった。従って本研究では、一般に鉄道システムの安全性の評価では人的被害が考慮されるべきと考え、1年あたりの死傷者数 (ACIN)、死者数 (ACDT) を安全性の評価指標とし、乗客、乗務員、公衆、旅客も含めた全数を考慮する場合と乗客のみを考慮する場合とに分けて考える。特に後者については、利用者が輸送モードとして鉄道を選択した場合における RAMS の性能評価に相当すると考えられる。

図 13 は鉄道運転事故における各年度での死傷者数 (ACIN) の推移について、乗客と他を区別して示したものであり、死傷者の大部分は乗客以外であることが分かる。これは、件数が多い鉄道人身事故において旅客や公衆の死傷者が多いことによる。また、2005 年の死傷者数が突出して多いのは、JR 西日本福知山線で発生した脱線事故において 669 人の死傷者が生じたためである。先述の発生件数と同様に、2011 年以降は死傷者数が減少する傾向にあり、全期での死傷者数、死者数の平均は各々 740.2、316.6 人/年であるのに対し、最近 5 年 (2014 年以降) では各々 612.2、282.4 人/年である。これを乗客に限定すると、全期では各々 106.6、6.71 人/年である一方、最近 5 年では 37.0、0.40 人/年で少ない。

各鉄道運転事故における死傷者数の降順データの分布を図 14 に示し、また事故種類別の死傷者数の割合を図 15 に示す。踏切障害事故、道路障害、鉄道人身事故の死傷者数は大部分の事故で 10 人以下/件であることが分かる。一方、11 人以上/件の事故の多くは列車衝突事故と列車脱線事故であり、平均、標準偏差が大きいことから、これらの事故では大規模化する可能性が高い。このことから、安全性を高めるためには、これらの防止が重要であるといえる。図 14 に示した分布の一般的な確率分布への適合度を評価した。同図からも分かるように、ごく少数の事故において極めて多くの死傷者数が発生したのに対して、僅かな死傷者数の事故が大多数であるという、特徴的な分布形状を有しているため、事故全体、また種類別データの全てに対して共通的に適合度が高い分布は存在しなかったが、一部種類の事故を除いてポアソン分布への適合度が高く、死傷者の発生にはランダム性があるとみなすことができる。

鉄道重大事故については、脱線車両 10 両以上の基準で重大事故に分類された事故を除く 91 件を対象として、各年度における死傷者数を乗客とその他に分けて図 16 に示す。鉄道運転事故において見られた傾向とは異なり、乗客が占める割合が非常に高いことが分かる。ま

図 13 鉄道運転事故死傷者数の推移

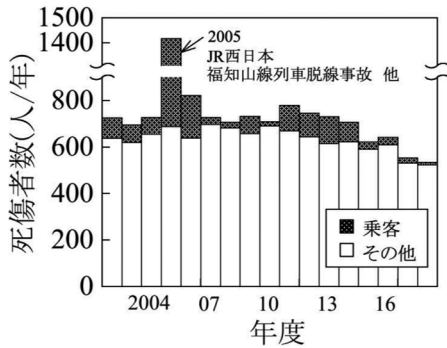


図 14 鉄道運転事故の死傷者数

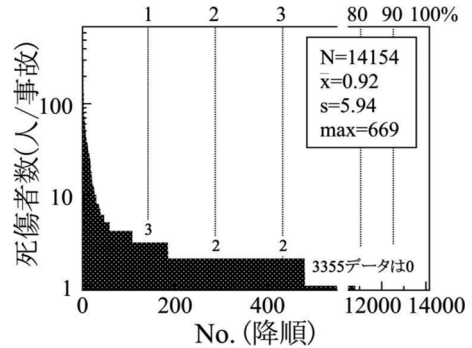
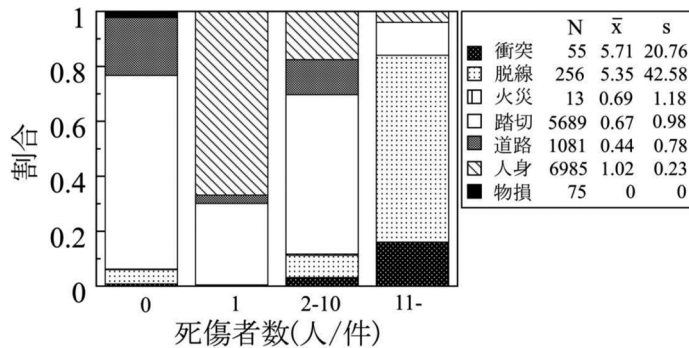


図 15 鉄道運転事故の死傷者数 (事故種類別割合)



た、1991年と2005年の死傷者数が多いのは、図中に示す大規模事故が発生したためである。長期的には死傷者数は減少する傾向にあり、特に2013年以降では本傾向が継続している。これは図3に示した発生件数の減少傾向に対応している。

各鉄道重大事故における死傷者数の分布を車両の重量物への衝突の有無で分けて図17に示す。平均は重量物への衝突を伴う事故では伴わない事故に比べて2倍以上であり、事故時の車両の挙動により、事故の規模が変化する影響が現れている。事故種類別の死傷者数の割合を図18に示す。事故件数が多い列車衝突、列車脱線、踏切障害事故に着目すると、1件あたりの平均死傷者数はこの順に多く、また死傷者数が多い事故では列車衝突、列車脱線事故の割合が高いことから、これらの事故の防止が人的被害の拡大防止に有効といえる。死傷者数分布(図17)の一般的な確率分布への適合性を検討した。死傷者数の分布は事故全体、また事故種類別の場合とも対数正規分布や指数分布への適合度が高かった。鉄道運転事故においてはポアソン分布への適合度が高かったが、鉄道重大事故においては死傷者数が10人以上という条件のために鉄道運転事故での分布とは形状が異なり、適合度の高い確率分布が両事故種間で一致しなかったと考えられる。

図 16 鉄道重大事故死傷者数の推移

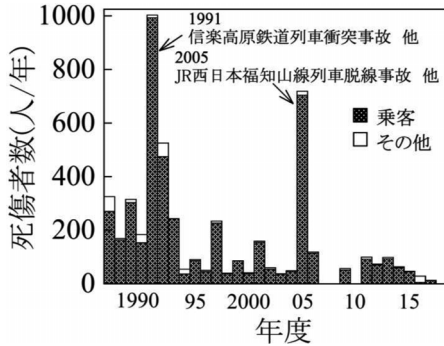


図 17 鉄道重大事故の死傷者数

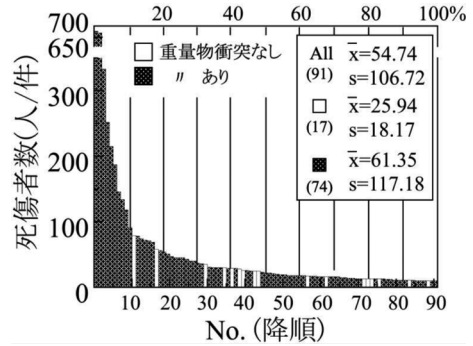
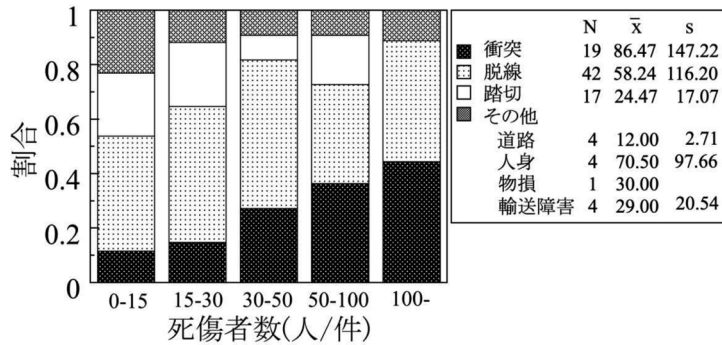


図 18 鉄道重大事故の死傷者数 (事故種類別割合)



4 RAMS に基づく性能評価指標の推計

前章に示した RAMS に基づく鉄道システムの性能評価法の設計概念をもとに、我が国の鉄道事故に関する時系列データを用いて各種パラメータ値を推計する。

4.1 信頼性

鉄道運転事故を対象として推計した平均発生間隔 (MTBF) と発生率 (RTRB) の年度推移を図 19 に示す。また 3.2 (1) に述べた 3 期間に分割した場合の各指標の推計結果を表 2 に示す。長期的には MTBF は増加し、RTRB は減少する傾向にあり、1987~2002 年での値に比べて近年における MTBF は 1.25 倍程度に長く、RTRB は約 80% 程度に減少している。MTBF の増加の傾向が、このまま線形に継続すると仮定すると、以下の関係式を得る。

$$y = a(x-t) + b \quad (8)$$

x は年、 y は MTBF である。 $t=1987$ とした場合に得られる係数 a, b の推計値は

図 19 鉄道運転事故の MTBF, RTRB の推移

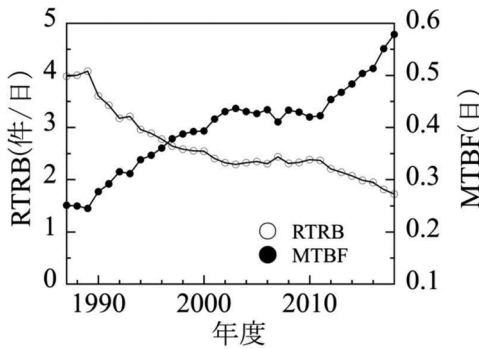


図 20 鉄道重大事故の MTBF, RTRB の推移

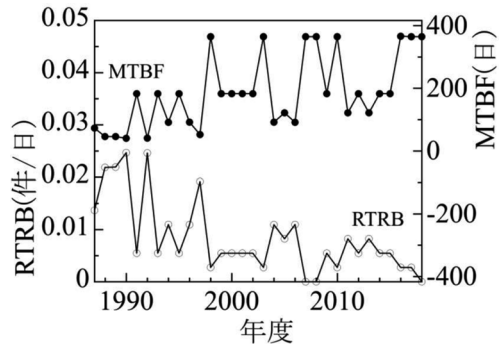


表 2 信頼性パラメータの推計値

鉄道運転事故

指数分布	発生率 (件/日)	MTBF (日)
全期	2.21	0.45
1987～2002	2.43	0.41
2003～2011	2.35	0.43
2012～2018	2.00	0.50

鉄道重大事故

指数分布	発生率 (件/日)	MTBF (日)
全期	0.0088	114.19
1987～1997	0.0153	65.49
1998～2018	0.0053	189.79

$a=0.0086, b=0.2662$ であった。本モデルの決定係数 R^2 は 0.912 と高く、例えば 2030 年における MTBF を算出すると 0.64 日となり、これに基づいて RTRB は 574 件/年を得られる。

鉄道重大事故について、各年の MTBF と RTRB の値を算出し、その推移を図 20 に示す。長期的に MTBF は増加、RTRB は減少の傾向にあるのは鉄道運転事故において見られた傾向と同じである。MTBF と RTRB を 1997 年前後に分けて算出した結果を先掲の表 2 に示す。いずれの指標も後期 (1998～) では前期 (～1997) に比べて大きく改善した結果、最近 5 年 (2014 年以降) では 0～2 件程度/年の発生に留まっており、この間における MTBF の平均値は 226.2 日であった。

4.2 可用性

鉄道運転事故での MTBF、平均保全時間 (MTTR) の推計値を用いて算出した稼働時間割合 (RTBF) の年度推移 (支障時間 ≤ 72 時間のデータのみ使用) を図 21 に示す。長期的には増加の傾向にあり、これは MTBF の増加傾向の効果によると考えられる。また、MTBF の算出時に考慮した 3 期間に分けて算出した RTBF を表 3 に示す。ここで、MTBF と MTTR の最近 5 年での平均値 (各々 0.53 日、1.60 時間/件) を用いて 2018 年での RTBF を推計すると 0.886 であり、実績値 (0.901) に近い。

図 21 鉄道運転事故の RTBF の推移

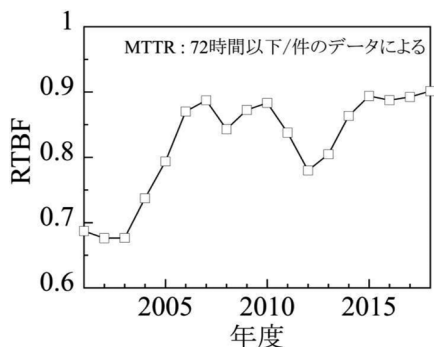


図 22 鉄道重大事故の RTBF の推移

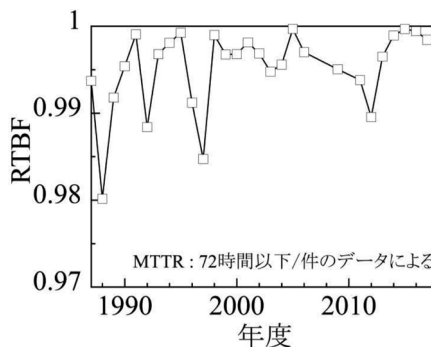


表 3 可用性パラメータ RTBF の推計値

鉄道運転事故			鉄道重大事故		
運転支障時間	全データ	≤72時間/件	運転支障時間	全データ	≤72時間/件
全期	0.615	0.841	全期	0.917	0.995
1987～2002	0.673	0.673	1987～1997	0.864	0.992
2003～2011	0.528	0.839	1998～2018	0.948	0.997
2012～2018	0.741	0.858			

鉄道重大事故における各年の MTBF と MTTR の推計値から算出した RTBF の年度推移を図 22 に示す。また 1997 年前後に分けて RTBF を推計した結果を先掲の表 3 に示す。支障時間が 72 時間以下／件の事故について、1997 年以前では 0.992、1998 年以降では 0.997 となり、長期的には増加傾向にある。これは MTBF の増加傾向の効果によると考えられる。MTBF と MTTR の最近 5 年での平均値（各々 226 日、7.73 時間／件）を用いて 2018 年での RTBF を推計すると 0.9986 となり、実績値（0.9992）に近い。

4.3 安全性

鉄道運転事故について、運転支障時間が 72 時間以下／件の事故での MTTR の推移を図 23 に示す。MTTR は 2006 年にかけて大きく減少した後、2012、2013 年を除くと変動は小さく、最近 5 年（2014 年以降）での平均は 1.60 時間／件である。運転支障時間が従うと考えられる対数正規分布のパラメータの推計値と MTTR を表 4 に示す。

鉄道重大事故について、運転支障時間が 72 時間以下／件の事故を対象に推計した MTTR の年度推移を図 24 に示す。一部の年において 40 時間／件を超えるが、明確な増減の傾向は見られない。概ね 20 時間以下／件であり、全体を通しての平均は約 13 時間／件である。運転支障時間が従うと考えられる対数正規分布のパラメータの推計値を先掲の表 4 に示す。

図 23 鉄道運転事故の MTTR の推移

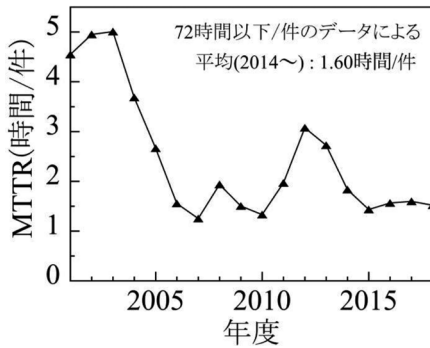


図 24 鉄道重大事故の MTTR の推移

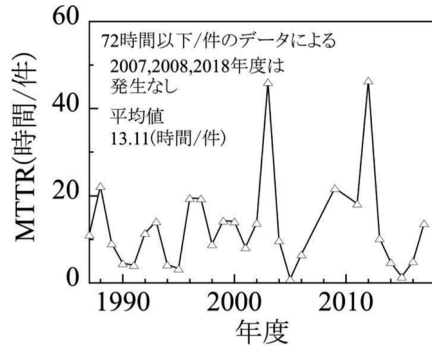


表 4 安全性パラメータの推計値

鉄道運転事故				鉄道重大事故						
対数正規分布		μ	σ	MTTR (時間)	対数正規分布		μ	σ	MTTR (時間)	
全体	(≦72時間/件)	-0.59	2.24	6.79	全体	(≦72時間/件)	4.20	1.63	248.31	
		-0.34	1.46	2.05			2.20	0.88	13.25	
脱線	(≦72時間/件)	3.32	1.59	97.24	脱線	あり	(≦72時間/件)	4.88	1.49	399.30
		2.76	0.69	19.99				2.68	0.69	18.56
	踏切	-0.09	0.69	1.17	脱線	なし	(≦72時間/件)	2.07	1.75	36.92
	道路	-1.02	0.58	0.43				1.31	1.12	6.96
	人身	-0.09	0.62	1.10						

4.4 安全性

前章に示したように、鉄道運転事故に伴う死傷者の発生には確率過程に従うランダム性があるとみなし、事故 1 件あたりの死傷者数はポアソン分布に従うと仮定してパラメータを推計した結果を表 5 に示す。列車衝突、列車脱線事故における推計値が大きいのは、図 15 で示したように、これらの事故で発生する死傷者数が多いことに対応している。

図 13 に示したように、鉄道運転事故における 1 年あたりの死傷者数 (ACIN) は 2011 年以降に減少する傾向にあり、特に乗客の死傷者数の減少は近年では緩やかで徐々に 0 人/年に近づきつつある。この傾向を考慮して、次式の指数関数により ACIN の推計モデルを構築する。

$$y = ae^{-b(x-t)} \tag{9}$$

x は年であり、 y は ACIN を表す。 $t=2011$ としたときに得られる係数 a, b の推定値は、 $a=799.78, b=0.055$ 、乗客に限定すると $a=155.43, b=0.331$ であった。各モデルの決定係数 R^2 は各々 0.935, 0.750 と高い。本モデルにより、2030 年における ACIN を推計すると、全

表 5 安全性パラメータの推計値

鉄道運転事故		鉄道重大事故				
ポアソン分布	平均死傷者数 λ (人/件)	対数正規分布	μ	σ	平均死傷者数 (人/件)	
全体	0.925	全体	3.22	1.25	54.74	
衝突	5.709	重量物 衝突	あり なし	3.35 3.06	1.24 0.63	61.35 25.94
脱線	5.348	衝突		3.78	1.17	86.47
踏切	0.672	脱線		3.26	1.27	58.24
道路	0.438	踏切		3.00	0.63	24.47
人身	1.017					

数では 280.00 人／年、乗客では 0.29 人／年である。

鉄道重大事故 1 件あたりの死傷者数は対数正規分布に従うとみなし、乗客の場合を対象にパラメータを推計した結果と死傷者数の平均は先掲の表 5 に示す通りである。列車衝突事故、列車脱線事故、重量物衝突を伴う事故において 2 つのパラメータの値が大きいことが分かる。

図 16 に示したように、鉄道重大事故の死傷者数は 2013 年以降に減少する傾向を有していたことから、この期間のデータを用い、鉄道運転事故における分析と同様に式 (9) の指数関数モデルを用いて死傷者数を推計する。 $t=2013$ のときに得られる係数 a, b の推計値は、 $a=105.74, b=0.482$ となり、決定係数 R^2 は 0.985 と高い。乗客に限定すると $a=103.45, b=0.675$ となり、決定係数 R^2 は 0.909 と高い。

4.5 RAMS 性能評価法の検証

前章までに示した鉄道システムの性能評価指標の設計と推計に用いた RAMS パラメータについて、鉄道運転事故、鉄道重大事故における推計結果を表 6 にまとめて示す。本表に示す値が我が国の鉄道システムの RAMS 性能であると考えられる。分析結果及び本表の概要は以下の通りである。

- 1) RAMS に基づいて設定した指標を過去の事故データから推計して評価することができる。
- 2) 鉄道運転事故、鉄道重大事故の発生については、いずれもポアソン過程に従うとみなすことができ、時間あたりの発生件数はポアソン分布のパラメータ値となり、また事故発生間隔は指数分布に従うとみなすことができる。
- 3) 事故 1 件あたりの運転支障時間は対数正規分布に従うとみなすことができ、死傷者数についてはポアソン分布や対数正規分布に従うとみなすことができる。

上記のような RAMS に基づく性能評価法によって鉄道システムの性能評価指標の設定が可能である。本稿で提起する RAMS に基づく評価指標は、我が国の鉄道システム全体の性

表 6 各事故における RAMS 性能評価指標のまとめ

		鉄道運転事故		鉄道重大事故		
信頼性	発生率 (RTRB)	全期	2.21件/日	全期	0.0088件/日	
		1987～2002	2.43	～1997	0.0153	
		2003～2011	2.35	1998～	0.0053	
		2012～2018	2.00			
	平均発生間隔 (MTBF)	全期	0.45日	全期	114.2日	
		1987～2002	0.41	～1997	65.5	
		2003～2011	0.43	1998～	189.8	
		2012～2018	0.50			
可用性	稼働時間割合 (RTBF) ※	全期	0.841	全期	0.995	
		1987～2002	0.673	～1997	0.992	
		2003～2011	0.839	1998～	0.997	
		2012～2018	0.858			
	最大遅延時間(MXDL)	平均	1.37h/件	平均	5.08h/件	
運休本数(CNTR)	平均(※)	16.2本/件	平均(※)	144.0本/件		
保全性	平均保全時間 (MTTR) ※	全体	2.05h/件	全体	13.25h/件	
		列車脱線事故	19.99	脱線あり	18.56	
				なし	6.96	
安全性	死傷者数 (ACIN)	全数	全期	740.2人/年	全期	155.7人/件
			最近5年	612.2	最近5年	30.2
		乗客	全期	106.6人/年	全期	146.6人/件
			最近5年	37.0	最近5年	24.2
	死者数 (ACDT)	全数	全期	316.6人/年	全期	5.53人/件
			最近5年	282.4	最近5年	0.40
		乗客	全期	6.71人/年	全期	4.94人/件
			最近5年	0.40	最近5年	0.40

※運転支障時間が72時間以内/件のデータにより推計

能を評価する手法として適用できる。

5 まとめと結論

本稿では、我が国の鉄道システムの性能評価法を提案することを目的として、RAMS 性能評価法の設計と性能評価指標の推計法を提起し、我が国の鉄道事故データを用いて推計を行った。RAMS 性能評価指標として、信頼性には事故の平均発生間隔 (MTBF) と発生率 (RTRB)、可用性には稼働時間割合 (RTBF)、列車の最大遅延時間 (MXDL) と運休本数 (CNTR)、保全性には平均保全時間 (MTTR)、そして安全性には1年あたりの死傷者数 (ACIN)、死者数 (ACPT) を設定し、その推計法を提案した。そして、各指標値を推計して我が国の鉄道システムの RAMS 性能を評価し、得られた知見は以下の通りである。

- (1) 事故の発生件数は年々減少の傾向にあり、その発生はポアソン過程に従うと考えられる。MTBF と RTBF は年々増加する傾向にある。
- (2) 事故 1 件あたりの運転支障時間は対数正規分布によりモデル化でき、脱線を伴う事故では長い傾向がある。
- (3) 死傷者数は長期的には減少の傾向にある。事故 1 件あたりの死傷者数は、鉄道運転事故ではポアソン分布、鉄道重大事故では対数正規分布や指数分布に従う。死傷者数の年度推移は指数関数によって表すことができる。

一方、本研究の実施によって明確になった課題を以下にまとめる。

RAMS に基づく各指標は輸送サービスの価値を表し、安全性や利便性を向上するための投資や維持管理のための検査・保守といったインプットに対するアウトプットであると考えられる。鉄道事業の経営においては、これらを別々に扱うのではなく、総合的に評価し、適切な投資、検査、保守の在り方を検討するのが適当である。これに関連する有効な考え方として、LCC が挙げられる。一般に、生産活動における LCC は、製造から使用、廃棄までの一連のプロセスを対象とするが、鉄道のように既存設備を対象とする場合、現状設備の改良から考えるのが適当であり、筆者らは軌道の構造改良を想定した LCC の算出手法を提案している（松本ほか、2020）。そこでは、軌道に起因する事故や輸送障害を構成要素としており、これらによる損失額を推計対象としている。従って、推計に必要な人的被害や運転支障の算出に本研究の成果を活用し、RAMS-LCC 最適化モデルとして発展させることが考えられる。

また、鉄道システムの RAMS 性能評価では、鉄道運転事故だけでなく輸送障害も考慮すべきである。特に、輸送障害の発生件数は近年では増加の傾向にあり（国土交通省（2021））、その削減は重要な課題であることから、輸送障害も考慮に入れた RAMS 性能の評価法についても検討する必要がある。更に、乗客の快適性については性能として考慮、検討しなかったが、旅客輸送サービスにおいては重要な評価対象になることから、これについても評価法の設計が必要であると考えられる。

参 考 文 献

- A. Calle-Cordón, N. Jiménez-Redondo, J. Morales-Gámiz, F. A. García-Villena, J. (2018) "Combined RAMS and LCC analysis in railway and road transport infrastructures", Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, Austria.
- A. P. Patra, P. Söderholm, U. Kumar (2008) "Uncertainty estimation in railway track life cycle cost: a case study from Swedish National Rail Administration", Proc. IMechE Vol. 222 Part F: J. Rail and Rapid Transit.
- Evans, A. W. (2003) "Estimating Transport Facility Risk from Past Accident Data", Accident

- Analysis and Prevention, 35, 459.
- Evans, A. W. (2002) "Speed and rolling stock of trains in fatal accidents on Britain's main line railways: 1967-2000", Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 216, No. F2.
- Evans, A. W. (2001) "Fatal Main-line Train Accidents", Modern Railways, Vol. 58.
- Evans, A. W. (1997) "A Statistical Analysis of Fatal Collisions and Derailments of Passenger Trains on British Railways: 1967-1996", Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 211, No. F2.
- Filippo Giammaria Praticò, Marinella Giunta (2017) "An Integrative Approach RAMS-LCC to Support Decision on De-sign and Maintenance of Rail Track", "Environmental Engineering" 10th International Conference.
- 福田久治, 佐藤幸正, 藪原晃 (1997) 「鉄道における安全性管理手法と安全管理支援システムの研究」, 鉄道総研報告, 第 11 巻, 第 11 号.
- 平栗滋人 (2012) 「RAMS の考え方に基づいて信号システムを評価する」 RRR, 第 69 巻, 第 8 号.
- 市田嵩, 鈴木和幸 (1984) 「信頼性の分布と統計」, 日科技連.
- 市田嵩 (1979) 「保全性工学入門」, 日科技連.
- INNOTRACK (2011) "Guideline for LCC and RAMS Analysis"
- IRIS (2016) "International Railway Industry Standard Guideline 4 RAMS/LCC"
- 国土交通省 (2021) 「鉄軌道輸送の安全に関わる情報 (令和 2 年度)」.
- Masashi Miwa, Tatsuo Oyama (2013) "Developing an Optimal Track Maintenance Scheduling Model Taking Train Derailment Accident Risk into Consideration", Railway Engineering 2013, London, UK.
- Masashi Miwa, Brian Gozun, Tatsuo Oyama (2006) "Statistical data analyses to elucidate the causes and improve the countermeasures for preventing train accidents in Japan", International Transactions in Operational Research, Vol. 13.
- Masashi Miwa, Tatsuo Oyama (2004) "All-integer Type Linear Programming Model Analyses for the Optimal Railway Track Maintenance Scheduling", OPESEARCH, Vol. 41, No. 3, Operations Research Society of India.
- Masashi Miwa, Tatsuya Ishikawa, Yoichi Okumura, Tatsuo Oyama (2001) "Modeling the Optimal Decision-Making Multiple Tie Tamper Operations", WCRR2001, Koeln.
- Masashi Miwa, Tatsuya Ishikawa, Tatsuo Oyama (1999) "Modeling the Transition Process of Railway Track Irregularity and its Application to the Decision Making for Maintenance Strategy", WCRR'99, Tokyo.
- 三根久, 河合一 (1989) 「信頼性・保全性の基礎数理」, 日科技連.
- 三和雅史, 大山達雄 (2019) 「列車脱線事故に関するリスクを考慮した軌道保守計画最適化モデルの構築と検証」, 土木学会論文集 D3, 第 75 巻, 第 1 号.
- 三和雅史, 大山達雄 (2013) 「最適軌道保守計画作成モデルの実施検証に基づく性能評価と運用実施の汎用化」, 土木学会論文集 D3, 第 69 巻, 第 2 号.
- 三和雅史, 大山達雄 (2010) 「鉄道重大事故統計データ解析に基づく事故防止策の提案と評価」, 土木学会論文集 D, 第 66 巻, 第 4 号.
- 三和雅史, 大山達雄 (2009) 「リスクを考慮した最適軌道保守計画策定のための最適化モデル分析」,

鉄道システムに関する RAMS 性能評価法の設計と検証

- 土木学会論文集 D, 第 64 巻, 第 1 号.
- 三和雅史, 石川達也, 大山達雄 (2001) 「軌道状態推移予測モデルの構築と最適保守計画作成のための全整数型数理計画モデル分析」, 土木学会論文集 IV-52, No. 681.
- 三和雅史, 石川達也, 大山達雄 (1999) 「軌道変位保守計画のための軌道状態推移モデルの構築」, 土木計画学研究・講演集, 第 22 号.
- 松本麻美, 石川智行, 三和雅史 (2020) 「軌道改良を考慮したライフサイクルコストを最小化する軌道メンテナンス手法の開発」, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第 24 巻.
- 松本雅行 (2013) 「鉄道の RAMS を変える～日本からの提案～」 JR EAST Technical Review, 第 43 巻.
- Min An, Jim Lupton (2002) "Safety Assessment in Railway - The current Status and Future Aspects", Railway Engineering 2002, London.
- Richard, H. (2022) "Accidents Raise Fears about Britain's Fragmented Railway", Japan Railway & Transport Review, Vol. 33.
- 政府資料等普及調査会 (1987-2020) 「鉄道統計年報」.
- 関清隆 (2019) 「鉄道分野の国際規格審議状況」 RRR, 第 76 巻, 第 8 号.
- Sheng Huang (2002) "Safety Management in the UK railway Network", Railway Engineering 2002, London.
- 武内寛子, 辻野直良, 森本裕二 (2017) 「プラットフォームからの転落や列車接触に至る酔客の行動特性」, 人間工学, 第 53 巻, 第 2 号.
- Tatsuo Oyama, Masashi Miwa (2022) "Applying Probabilistic Mathematical Modeling Approach and AI Technique to Investigate Serious Train Accidents in Japan", Sustainability Analytics and Modeling, Vol. 2.
- Tatsuo Oyama, Masashi Miwa (2018) "An optimal track maintenance scheduling model analysis taking the risk of accidents into consideration", International Transactions in Operational Research, Vol. 25, No. 5.
- Tatsuo Oyama, Masashi Miwa (2006) "Mathematical Modeling Analyses for Obtaining an Optimal Railway Track Maintenance Schedule", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 23, No. 2.
- 鉄道総合技術研究所 (2022) 「TECCE 鉄道技術推進センター (パンフレット)」.
- 山口剛志, 三和雅史, 大山達雄 (2015) 「わが国の鉄道事故の発生状況と列車運行に与える影響分析」, 交通と統計, 第 41 号.
- 横井祐一 (2021) 「台風の影響による鉄道脱線事故の要因分析」, 朝日大学経営論集, 第 35 巻.
- 吉田裕 (2017) 「ヒューマンファクターの視点による鉄道事故の研究」, JREA, 第 60 巻, 第 6 号.
- (財) 運輸政策研究機構 (1990-2022) 「数字でみる鉄道'90～2022」.

付記 本稿は, 東京経済大学 2023 年度個人研究助成費 (受給番号 23-29) による研究成果の一部である。