

列車脱線事故データの統計的特徴と 安全性等向上策

三和雅史 大山達雄

1 はじめに

一般に、鉄道は他の輸送手段に比べて確実性、高速性、安全性等において優れているとされているが、事故の発生による社会的不安、損失は大きく、また鉄道事業者にとっても被害の補償、信用の失墜、運輸収入の減少等をもたらす。従って、安全な輸送を安定的に確保するためには、事故の発生に伴う影響や損失を考慮して、事故の発生や被害拡大を防止する方策を定めることが重要である。

我が国における鉄道事故は、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（国土交通省鉄道局（2022））において表1のように分類されている。このうち、鉄道運転事故の一部である「列車衝突事故、列車脱線事故、列車火災事故」は、被害が大規模化する可能性が高い。そのため、我が国の事故調査機関である運輸安全委員会では、他の調査対象事故は被害規模や内容を考慮して調査対象に選定されるのに対し、上記の3種の事故

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って、鉄道運転事故以外のもの	

は無条件に全事故が対象となっており、これらの中でも列車脱線事故は発生頻度が最も高い。

以上のことから、本研究では列車脱線事故に着目して過去の事故データを分析し、その統計的特徴に基づいて安全性等の性能を評価した上で、これに影響する要因を把握する。そして、性能向上のための方策を提案し、その実施効果をシミュレーションにより検証する。

2 既存研究と本研究の意義

鉄道事故の実績やデータに基づき、安全性の向上のために実施されてきた研究としては、特定の事故の防止を目的としたものが多い。特に大規模事故の発生は、同種の事故を防止するための新たな技術や仕組みを開発、導入する契機となってきた。このようなアプローチは、分析対象の事故や事象を予め決めた上で事故発生の過程を推定し、防止策を検討するものである。本研究もアプローチとしては同様ではあるが、個々の事故内容を詳細に分析するというよりは、各事故が共通して内包する発生要因及び被害拡大要因を事故データから抽出するというマクロな分析結果に基づいて課題を明確化し、具体的な防止策を導く点に特徴がある。

我が国の事故データを分析した例としては、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（武内ほか（2017））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））等が存在する。これらは、事故の発生状況の説明が中心であり、事故防止策を具体的に提案し、その効果を定量的に検証するまでには至っていない。

海外においては、例えば Richard（2002）はイギリス国鉄民営化後に発生した大事故を個別に分析し、また Evans（1997, 2001, 2002, 2003）は列車の衝突、脱線、オーバーランによる事故を死者数や列車速度、自動列車停止装置の有無に基づいて分類した上で、列車キロや発生年をパラメータとして事故発生率や死者数の推定モデルを構築した。

一方、安全性向上策の検討例としては、前述のように特定の事故の防止を目的としたものが多いが、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（Huang（2002）、An & Lupton（2002））がある。

全体的には、上記の Evans の研究を除くと、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や被害の傾向を分析した例は少ない。そこで筆者らは、事故件数、事故原因、被害状況（運転支障時間、死傷者数）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、事故発生や被害拡大の防止策を提案した（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を分析し、発生や被害の特徴を明確にした（Miwa et al.（2006））。一方で、被害が大きな鉄道重大事故を対象に、発生間隔や被害の履歴データ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及び被害推計モデルを構築し、リスクを考慮した軌道保守計画法や軌道劣化状態の管理基準設定法を提案した (三和, 大山 (2009, 2019), Oyama & Miwa (2022))。

以上いくつかの研究例を示したが、これら各研究成果の社会的価値を向上するための課題としては、事故データ、或いはその調査結果を総合的に分析して得られる知見から、鉄道事業全体にとって有効かつ具体的な安全性等の性能向上策を提案し、評価、検証することが挙げられる。そのため、本研究では列車脱線事故を対象に、事故データに基づいて性能向上策を提案し、評価、検証する。

3 列車脱線事故データの分析

3.1 分析方法

列車脱線事故に関する過去のデータを分析し、データの統計的特徴に基づいて安全性等の性能を評価した上で、その性能に影響する要因を把握する。

(1) 分析対象データ

我が国の鉄道事故データとして、国土交通省監修の出版物等 (国土交通省鉄道局 (1990-2022), 国土交通省鉄道局 (1987-2020)), 統計資料にまとめられたものを分析に用いることができる。また、(公財) 鉄道総合技術研究所の鉄道技術推進センター会員に公開されている「鉄道安全データベース」(鉄道総合技術研究所 (2022)) には各事故の基本的な情報が保存、公開されている他、2001 年 10 月以降に発生した事故で運輸安全委員会 (2008 年 10 月までは国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会) が調査したものについては、その報告書が公開されており、事故後の対策等措置も含めて細かな情報を得ることができる。

本研究では、これらのデータを分析するが、分析期間はデータ取得可能期間を考慮して、運輸安全委員会による調査が開始された 2001 年 10 月以降、2019 年 3 月までを基本とする。

(2) 性能評価指標

鉄道の電気、信号分野の安全性等については、2002 年に IEC (国際電気標準会議) の国際規格として RAMS が制定された (平栗 (2012), 松本 (2013))。RAMS は信頼性 (Reliability), 可用性 (Availability), 保全性 (Maintainability), 安全性 (Safety) の頭文字をつなげたものであり、これを規定する 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評価内容が示されている。そこで、本研究では、これらの性能に対応する指標により、鉄道システムの列車脱線事故に対する性能を評価する。各性能を表す具体的な指標には、取得したデータを用いた評価の可否を考慮して、以下を用いる。

a) 信頼性 (Reliability)

既存研究等 (INNOTRACK (2011), IRIS (2016), Pratico et al. (2017), Calle-Cordon et al. (2018)) において多く用いられている故障等の平均発生間隔 (MTBF) を信頼性の評価指標として用いる。ここでは、「故障」を「事故」と読み替える。一般に、MTBF の算定には、対象の稼働開始時刻から事故発生時刻までの時間を計測した複数のデータの平均を算出して用いるが、事故後の運転再開時刻の情報は鉄道事業者から運輸局への報告項目に含まれていないため、全事故データにおいて存在するわけではない。また、後述するように事故の発生間隔は日単位であるのに対し、運転支障時間は時間単位で短い。よって、ある事故の発生時刻と、その次の事故の発生時刻との間の時間 (発生間隔) を計測し、その平均を MTBF とする。

b) 可用性 (Availability)

可用性の指標としてアベイラビリティ (稼働時間割合) を用いる。また、鉄道サービスを利用者が望む条件で提供できるかという観点で、列車の最大遅延時間と総運休本数についても参考に用いる。アベイラビリティ A は事故発生間隔の平均値である MTBF と運転支障時間の平均値、即ち MTTR (平均保全時間) を用いて次式のように算出する。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

ここで、MTTR については、事故の発生時刻と運転再開時刻の両方を把握できる事故データを用いて、各事故における運転支障時間を算出し、これを平均して用いる。一方、最大遅延時間と総運休本数については、いずれも事故 1 件ごとに、その影響として得られる実績であり、最大遅延時間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での値である。本来は影響を受けた各列車での遅延時間を累積する等し、影響本数と遅延時間の両方を考慮して評価すべきであるが、分析する事故データには、各列車についての詳細な情報は含まれないため、最大遅延時間を用いる。また、運休については、列車によって全区間、一部区間での運休等、その形態は様々であるが、分析データには総運休本数の情報しかないため、入手が可能な総運休本数により評価する。

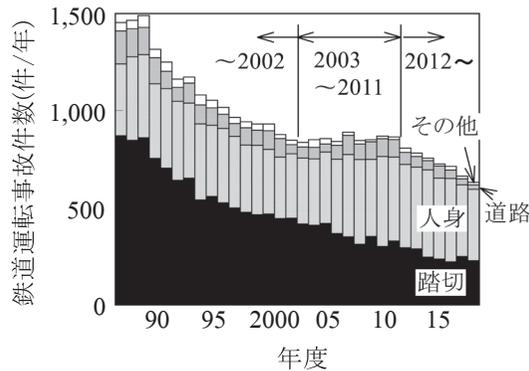
c) 保全性 (Maintainability)

保全性の指標には、既存研究等 (INNOTRACK (2011), IRIS (2016), Filippo et al. (2017), Calle-Cordon et al. (2018)) でも多く用いられている MTTR を用いる。推計の方法は b) に示したとおりである。

d) 安全性 (Safety)

安全性の指標として、事故 1 件あたり、また 1 年あたりの死傷者数、死者数を用いる。ここでの死傷者数、死者数には、乗客、鉄道事業者の社員の他、公衆、旅客を全て考慮する場合と、乗客のみを考慮する場合に分けて考える。特に後者については、利用者が輸送モード

図 1 鉄道運転事故件数の推移



として鉄道を選択した場合における安全性に相当する。

3.2 分析結果

(1) 事故発生状況

a) 発生件数と原因

列車脱線事故を含む鉄道運転事故全体の発生件数の年度推移を図1に示す。本図では、事故種類を踏切障害事故（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）に分けて示す。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（Oyama & Miwa (2022)）。また、以前は踏切障害事故のシェアは高かったが、近年では鉄道人身事故のシェアが高い。高架化等による踏切の廃止や遮断機のない3、4種踏切への遮断機の設置（1種化）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。本研究で着目する列車脱線事故は、図中の「その他」に分類され、運転事故件数全体におけるシェアは非常に小さい。即ち、列車脱線事故の発生頻度は低いものの、(2) b) で後述するように、人的被害が拡大する可能性が高いため、その発生件数の削減と発生時の被害の低減が課題である。

列車脱線事故の発生件数の推移を図2に示す。列車脱線事故には、車両や軌道を原因とする脱線の他、運転取り扱いの誤りによる脱線、また鉄道外の原因として踏切事故や災害による脱線が存在する。特に、踏切での自動車等との衝突に伴って発生する脱線事故は踏切障害事故の延長上に存在する事故である点が特徴的である。そこで、本図では踏切事故による脱線と他の脱線を区別して示した。各年における発生件数は、2009年にかけて減少傾向が明確である。近年では減少傾向は明確ではないが、踏切事故による脱線が占める割合は以前より低い。鉄道運転事故データの分析結果で述べたのと同様に、各種踏切事故対策の効果によると考えられる。

図2 列車脱線事故件数の推移

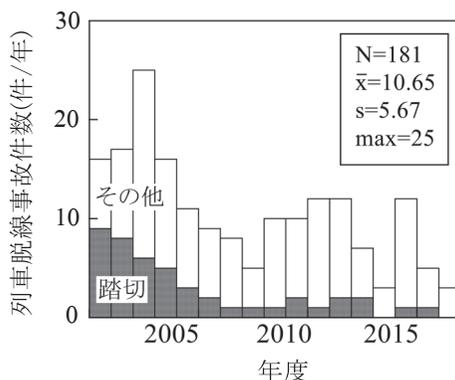
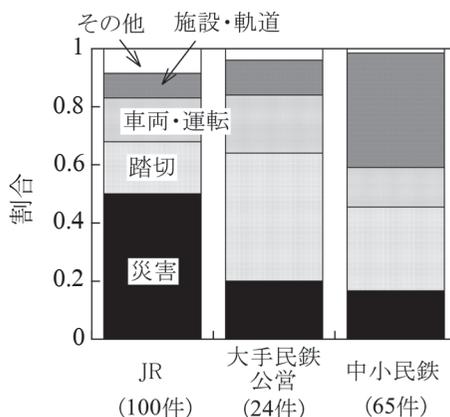


図3 列車脱線事故原因



列車脱線事故の発生原因について、鉄道事故等報告規則での分類を考慮し、事業形態で分けて図3に示す。JRでは災害、大手民鉄・公営では踏切を原因とする事故が多い。災害による事故は、大雨に伴う斜面や路盤の崩壊、地震、強風、落石、雪によるものであり、踏切での事故の多くは自動車との事故である。中小民鉄では施設・軌道が原因の事故件数が多いが、その約半分は軌間（左右レール間の距離）が拡大して車輪が軌間内に落下して発生する軌間内脱線である。この脱線は、主に木まくらぎの腐朽等によりレールの締結力が低下して軌間が拡大することで発生し、木まくらぎを用いた軌道構造が多い鉄道事業者でしばしば起きている。

b) 発生間隔

列車脱線事故の発生間隔（日数）の分布を図4に示す。平均発生間隔（MTBF）は約33日であるが、踏切、災害等の鉄道外原因による事故を除外すると約103日である。本分布の一般的な確率分布への適合度を評価する。ここでは、分布の形状を考慮して、正規分布

図 4 列車脱線事故発生間隔

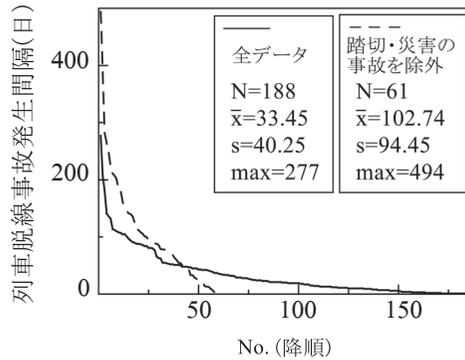


表 2 発生間隔データの分布適合度評価

	1	2	3
分布名	Exp	LogN	Norm
χ^2 値	27.11	29.50	222.1

(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, ワイブル分布 (Weib), ポアソン分布 (Pois) を想定する。評価結果 (順位が 3 位までの分布名と χ^2 乗値) を表 2 に示す。指数分布に対する適合度が高く, また図 4 において平均値と標準偏差の値が近く, 指数分布の特徴を有していることから, 発生間隔は指数分布に従うと考えられる。即ち, 列車脱線事故の発生は, ランダムで独立なポアソン過程による事象とみなせる。指数分布は故障率一定の設備での故障までの平均時間や待ち行列理論において顧客の到着時間間隔のようなランダムで独立な事象の発生間隔を分析するのによく用いられる (市田, 鈴木 (1984), 三根, 河合 (1989))。指数分布の確率密度関数を以下に示す。

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \tag{2}$$

本分布のパラメータ λ と MTBF の推計値を表 3 に示す。このパラメータ λ は信頼性工学で用いられる故障率に相当する。MTBF は全事故を対象とする場合と踏切等原因の事故を除いた場合とで, 各々 33, 103 日となる。故障率 λ と MTBF の年度推移を図 5 に示す。長期的には故障率 λ は減少傾向, MTBF は増加傾向にある。

(2) 被害発生状況

a) 運転支障時間

列車脱線事故を含む鉄道運転事故全体における事故種類別の運転支障時間の割合を図 6 に

表3 信頼性に関するパラメータの推計値

指数分布	故障率	MTBF
	λ (件/日)	$1/\lambda$ (日)
全原因	0.0299	33.45
踏切等原因除外	0.0097	102.74

図5 故障率, MTBFの推移

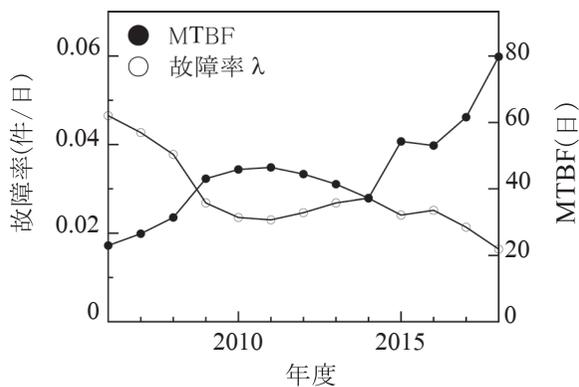
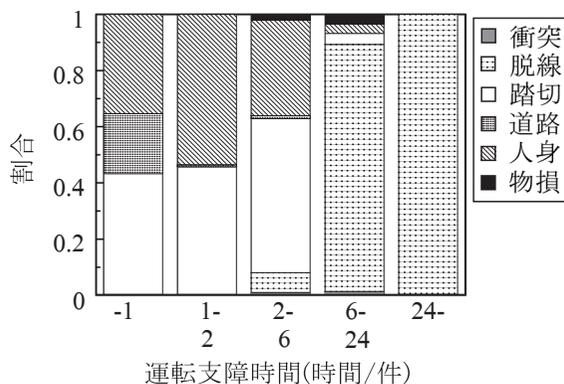


図6 事故種類別運転支障時間



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、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等に時間を要するため、長時間化すると考えられる。

各脱線事故における運転支障時間の分布を図7に示す。支障時間が特に長い(72時間超

図 7 列車脱線事故の運転支障時間

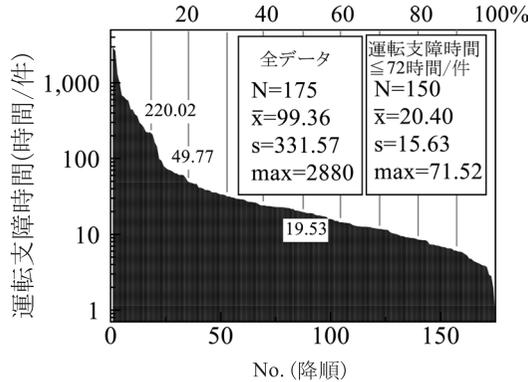


表 4 運転支障時間隔データの分布適合度評価

		1	2	3
全体	分布名	LogN	Gam	Exp
	χ^2 値	38.04	149.9	194.5
(≤72 時間/件)	分布名	LogN	Gam	Weib
	χ^2 値	4.27	9.12	12.24

／件) 事故の半分以上は災害を原因とするものである。こうした長時間の事故を除くと、支障時間の平均は約 20 時間／件であり、平均的には約 1 日で復旧すると考えられる。本分布の一般的な確率分布への適合度の評価結果を表 4 に示す。対数正規分布への適合度が高いことから、支障時間については対数正規分布で表すことができる。信頼性・保全性工学では、対数正規分布は様々なシステムの保全時間を表すのに度々用いられる (市田 (1979))。脱線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、こうした知見と整合する。この対数正規分布の確率密度関数は次の通りである。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp \left[-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

本分布のパラメータの推計値と MTTR の値を表 5 に示す。パラメータの大きさに応じて MTTR が増加することが分かる。

以上のデータを用いて、支障時間が 72 時間超／件の事故を除いて算出した MTTR の年度推移を図 8 に示す。近年での変化は大きくなく、約 20 時間／件で推移している。

b) 可用性

以上で得られた MTBF と MTTR を組み合わせることで、アベイラビリティを推計でき

表5 保安全性に関するパラメータの推計値

対数正規分布		μ	σ	MTTR (時間)
全体 (≤ 72 時間/件)		3.35	1.58	99.36
		2.78	0.68	20.40

図8 列車脱線事故の MTTR の推移

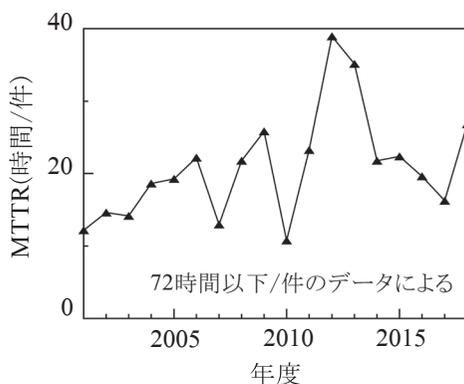
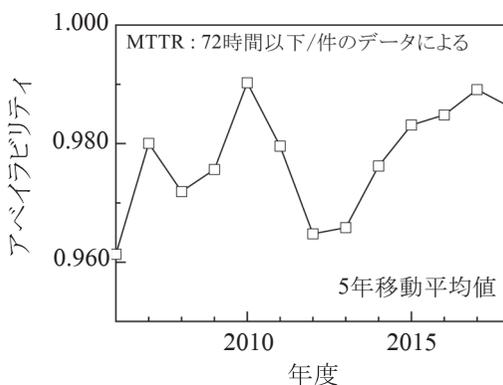


図9 列車脱線事故のアベイラビリティ推移



る。算出したアベイラビリティの年度推移を図9に示す。アベイラビリティは2013年以降、増加の傾向にあり、これは図5に示したMTBFの増加傾向の効果と考えられる。また、全期間でのアベイラビリティの値を表6に示す。運転支障時間が72時間超/件の事故での値を含めない場合、全ての原因を対象とすると0.975、鉄道外原因の事故を除外すると0.992である。

最大遅延時間と総運休本数を把握できた事故データを用い、各事故における最大遅延時間

表 6 可用性に関するパラメータの推計値

		アベイラビリティ
全体	(≤72 時間/件)	0.890
		0.975
踏切等原因除外 (≤72 時間/件)		0.992

図 10 列車脱線事故の最大遅延時間

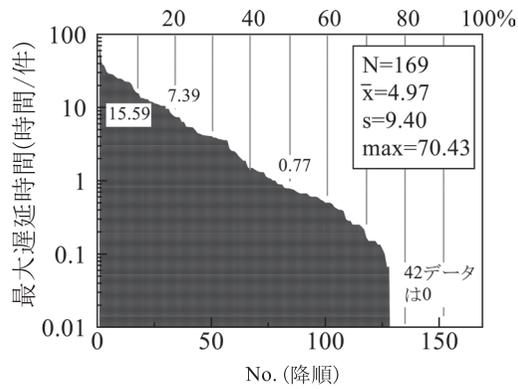
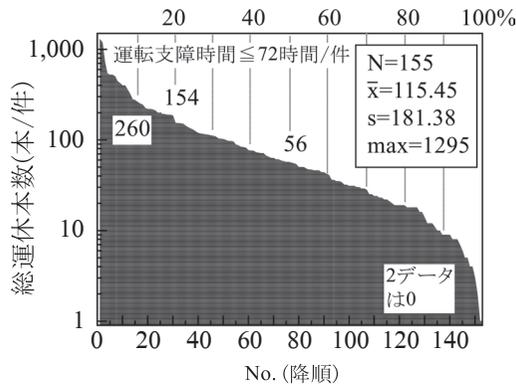


図 11 列車脱線事故の総運休本数



と総運休本数を降順で整理した結果を図 10, 11 に各々示す。最大遅延時間については、平均は約 5 時間/件、半分以上の事故では 1 時間以内/件であるが、12 時間/件を超える事故が約 14% あり、殆どは JR での事故である。JR では運転距離が長い列車が存在することが影響していると考えられる。総運休本数 (運転支障時間が 72 時間以内/件のデータによる) については、約半分の事故で 50 本以下である。

図 12 事故種類別死傷者数

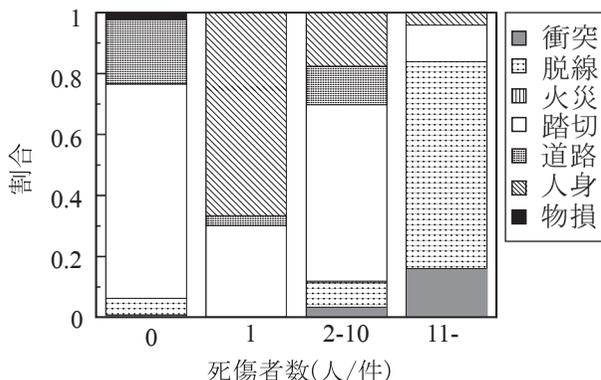
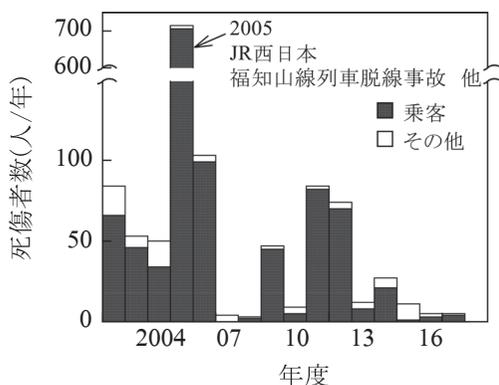


図 13 列車脱線事故の死傷者数推移



c) 死傷者数

列車脱線事故を含む事故種類別の死傷者数の割合を図 12 に示す。踏切障害事故，道路障害事故，鉄道人身事故は殆どの事故で 10 人以下／件である。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，これらの事故では大規模化する可能性が高い。即ち，列車脱線事故防止の重要性を本図からも読み取ることができる。

貨物列車を除く列車脱線事故の各年度での死傷者数について，乗客と他を区別して図 13 に示す。図から，乗客が占める割合が非常に高いことが分かる。分析期間中の総死傷者数は 1,295 人であり，このうち死者数は約 10% の 135 人であるが，乗客に限定すると 111 人である。図 2 で考察したように，1 年あたりの発生件数は 2010 年以降では減少傾向が明確でないが，1 年あたりの死傷者数は減少しつつあることから，安全性は向上する傾向にあるといえる。

各脱線事故における死傷者数の分布を重量物（鉄道車両，建築物，大型自動車，普通貨物

図 14 列車脱線事故の死傷者数

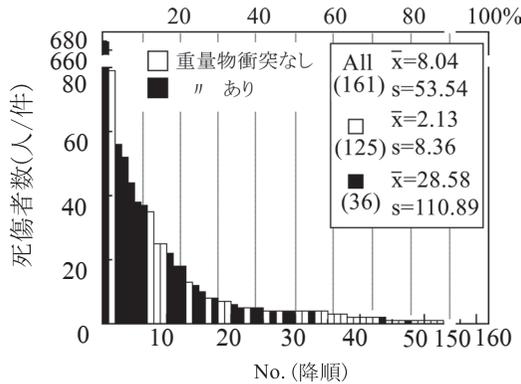


表 7 死傷者データの分布適合度評価

		1	2	3
重量物 衝突あり	分布名	Exp	Norm	Pois
	χ^2 値	35.94	98.94	115.6
重量物 衝突なし	分布名	Pois	Gam	Exp
	χ^2 値	110.4	580.3	585.1

自動車, 1 m 以上の岩, 車止め【砂利を敷き詰めたタイプの車止めを除く】, 多くの土砂や雪崩, 丸太や大木) への衝突の有無で分けて図 14 に示す。重量物への衝突の有無を考慮して, 本分布の一般的な確率分布への適合度について検討した結果を表 7 に示す。いずれの分布に対しても適合度は低いため, 適当な確率分布を設定するのは難しい。半分以上の事故で死傷者数は 0 人/件である一方, 最大で 669 人/件の死傷者数が発生する等, 特異な分布形状の影響が考えられる。脱線事故における死傷者数への影響要因については, 筆者らの先行研究(三和, 大山(2010))において重量物等への衝突, 車両の転覆, 転落, シートタイプ, 列車速度を挙げており, 被害拡大防止等の検討では, これらの考慮が有効である。

4 列車脱線事故に関する性能向上方策と実施効果

列車脱線事故に関する性能の向上を目的とし, 事故発生や被害拡大の防止のための方策を幾つか提案して効果を推計することで, 方策の有効性を検証する。効果の推計においては, RAMS の各性能に対応して MTBF, アベイラビリティ, MTTR, 1 年あたりの死傷者数を評価指標に用いる。

4.1 性能向上方策の検討の方向性

列車脱線事故は、図3に示したようにJR、大手民鉄、中小民鉄で各々災害、踏切、施設を原因とするものが多い傾向にあった。そこで、各原因に対応する性能向上策を検討する。検討における方向性は以下の通りである。

(1) 災害

JRでは災害による脱線事故が多かったことから、これを防止する方策を考える。災害を原因とする脱線事故（全69件）を分析すると、雪によるものが24件、土砂災害が19件、落石が10件、地震・津波が9件、強風が2件、倒木が3件、洪水が2件であった。雪による脱線は、踏切上の圧雪に乗り上げて発生した他、雪崩や雪による倒木に列車が衝突して発生した。土砂災害、落石による脱線は、全件が土砂流入区間、または落石箇所に入線して発生した。従って、土砂、落石による災害発生区間、或いは災害の発生が予想される区間への列車進入防止策の検討が有効と考えられる。

(2) 踏切

踏切での脱線事故は大手民鉄で発生が多い。また、踏切を原因とする脱線事故（全49件）を分析すると、自動車等の直前横断によるものが29件、踏切内停滞によるものが18件、列車側面への衝突が2件であり、直前横断と停滞の割合が高い。遮断機のある踏切においては、障害物検知装置（障検）や非常ボタンの設置が進められているが、これらの設備は自動車が踏切に進入後、列車が衝突するまでに時間がある場合に有効である。即ち、停滞による事故防止効果は高いが、直前横断及び側面衝突のように時間が短い場合には効果を期待できない。

列車が踏切付近で衝突した対象は、普通自動車等（軽自動車、小型自動車、普通自動車）が43件、大型自動車が5件、その他（自動2輪車）が1件であり、普通自動車等の割合が高い。一方、30人以上の死傷者が発生した事故は、多くが大型自動車との衝突事故であることから、人的被害軽減の観点では、大型自動車との衝突対策や大型自動車通行禁止等の交通規制の実効性向上策の検討が有効と考えられる。

原因としての割合が高い直前横断と停滞に着目すると、直前横断については列車接近中の踏切内に自動車を進入させないことが必要であるが、踏切手前で自動車を自動停止させるようなシステムの自動車への短期間での導入は難しい。一方、停滞については、障検設置箇所での停滞による事故には、特殊信号発光機（障害物検知時に明滅して停止信号を現示する装置）の停止信号現示に対して列車の運転士のブレーキ操作が遅れた事例が幾つか見られることから、上記現示時に列車を素早く停止させるシステムの構築が有効と考えられる。

ところで、脱線した車両が隣接線を支障して対向列車と衝突する、或いは線路周辺の建築物等と衝突すると事故が大規模化する可能性がある。踏切前方の線路にガードレールが設置

されていたため、脱線した車両が橋梁から転落することを防止できた例（運輸安全委員会（2013））もあることから、被害軽減のためには脱線後の車両の逸脱防止も有効と考えられる。

(3) 施設

中小民鉄で多い施設状態の不良による脱線については、近年では木まくらぎの状態の不良を原因とする軌間内脱線が毎年発生していることから、木まくらぎの劣化の防止や腐朽しない材料を用いたまくらぎへの交換が有効と考えられる。

4.2 性能向上方策と効果推計法

(1) 災害原因脱線防止策

土砂、落石による災害の発生を検知し、当該区間への列車の進入を抑止するシステムは既に幾つか存在する（例えば、熊澤（2009））ことから、その導入・展開が性能向上策として挙げられる（方策①【実施範囲：JR】）。なお、本方策は対策箇所数、延長に応じた費用が必要であるため、システムの低コスト化と設置箇所の効果的な選択が課題である。

(2) 踏切原因脱線防止策

直前横断に対しては、1) 遮断機のない踏切への遮断機の設置、2) 動作中の踏切への自動車の進入防止が方策として考えられる。1) については、これまでも遮断機のない3、4種踏切への遮断機の設置（1種化）が推進されている（方策②【全線】）。2) については、動作中の踏切へ進入しそうな自動車を制御して列車との衝突を防止するシステムの導入は難しいが、踏切を通行しない経路へ自動車を誘導し、事故発生の可能性を低減することは可能である。特に人的被害が拡大しやすい大型自動車を対象に、交通規制や大型自動車用カーナビ等を活用し、事故時に被害の大規模化が懸念される踏切の通行を制限して立体交差点や高規格の踏切（事故防止のための設備やシステムが設置されている安全性が高い踏切）に誘導する方策が考えられる（方策③【全線】）。本方策は、停滞による事故の防止にも有効である。

停滞については、障検等と列車が連携し、異常検知時には列車のブレーキを自動的に動作させるシステム（例えば、JR西日本（2023））の導入が考えられる（方策④【大手民鉄】）。また、車両の脱線後の逸走による事故の大規模化を防止するために、踏切の列車進行方向側に脱線防止ガードや安全レールを設置する方策も考えられるが、本方策については実施効果を事故の実績データから推計することは難しいため、ここでは方策の提案だけとする。

(3) 軌道原因脱線防止策

軌間内脱線を防止するために、曲線部において木まくらぎをPCまくらぎに交換し、劣化によるレール締結力の低下を防止することで、軌間保持機能を維持する方策が考えられる

(方策⑤【中小民鉄】)。なお、本方策は曲線半径に応じて何本かに1本の割合でまくらぎを交換する部分PCまくらぎ化でもよい

各方策の実施効果の推計では、脱線事故の全実績データに基づいて推計して得られた各性能を「現状」と定義した上で評価する。推計においては、方策の実施により発生を防止できると考えられる事故は発生しなかったものとする。

4.3 効果推計結果

(1) 各方策による性能向上効果

以上に示した各方策の実施効果の推計結果を表8に示す。また、推計したアベイラビリティと死傷者数(乗客)の関係を図15に示す。

災害による脱線事故防止を目的とした①の方策により、軌道上に流入・落下していた土砂、岩石に衝突して脱線した24件の事故を防止できる結果、MTBFの延伸、MTTRの短縮の効果によりアベイラビリティは向上し、これらは全ての方策の中で最も良い結果となった。

踏切での脱線事故防止を目的とした②～④の方策については、②では防止できる事故件数が多いため、MTBFが延伸され、アベイラビリティは向上する。③では大型自動車との衝突事故を防止できる効果により、死傷者数の減少が他の方策より大きい。④では、大手民鉄では停滞による踏切での事故は2件しかなかったため、現状との差異は小さい結果となった。

軌間内脱線事故防止を目的とした⑤の方策により、12件の事故を防止できる結果、死傷者数を除いて、いずれの指標も良化する。軌間内脱線は乗客が少ない線区における低速での事故が多いため、死傷者数が発生したデータはなく、件数が減っても死傷者数の減少には至らなかったと考えられる。

(2) MTBF, MTTRの不確実性を考慮したアベイラビリティの推計

3章では、列車脱線事故の事故発生間隔と保全時間は各々指数分布、対数正規分布に従うとしてモデル化できることを示し、これらの分布のパラメータを推計した。そこで、事故発生間隔と保全時間が上記の各確率分布に従う確率変数として発生させた乱数を用いた確率シミュレーションを行い、各方策におけるアベイラビリティの分布を推計し、考察する。

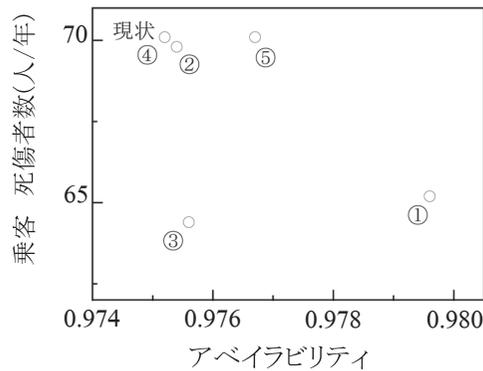
各方策に対応して確率分布のパラメータを設定し、事故発生間隔と保全時間のデータを各々1000個作成してMTBFとMTTRを算出した。そして、この操作を更に1000回繰り返してMTBF, MTTRの分布を作成し、アベイラビリティを確率分布として推計した。

表8に示したアベイラビリティ(算定値)とシミュレーションにより得られた推計値(アベイラビリティの分布における平均と標準偏差分の増減範囲)との関係を図16に示す。推計値の分布の平均と算定値はよく一致しており、効果の大小についても両値とで整合してい

表 8 列車脱線事故のための各方策の実施効果

				方策					
				現状	①	②	③	④	⑤
内容				土砂災害検知	踏切1種化	大型車誘導	障害物検知	PCまくらぎ化	
対象				JR	全線	全線	大手民鉄	中小民鉄	
該当件数				24	8	5	2	12	
信頼性	MTBF	(日)	全期	33.5	38.6	34.7	34.4	33.8	35.7
保全性	MTTR	(h/件)	運転支障時間 72時間以内/件 データによる	20.40	19.26	20.99	20.59	20.61	20.47
可用性	アベイラビリティ			0.9752	0.9796	0.9754	0.9756	0.9752	0.9767
	最大遅延時間	(h/年)	年平均	53.6	47.9	53.6	52.5	53.5	52.5
	運休本数	(本/年)		1236	1154	1220	1211	1231	1191
安全性	死傷者数 (全体)	(人/年)	年平均	75.6	69.6	74.8	69.4	75.6	75.6
	(乗客)	(人/年)		70.1	65.2	69.8	64.4	70.1	70.1

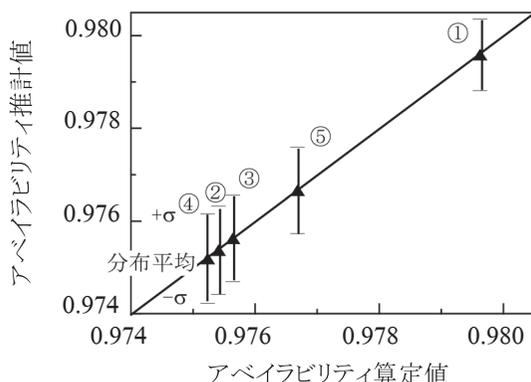
図 15 アベイラビリティと死傷者数



る。また、標準偏差 σ によりアベイラビリティが概ねどの範囲で変動するかを把握でき、いずれの方策においても0.001程度である。これにより、図中に示したように平均と標準偏差を用いてアベイラビリティの存在範囲を推計することができる。

以上のように、事故データにより構築した事故発生間隔、保全時間を確率変数としたモデルに基づくシミュレーションを行うことで、MTBFやMTTRの不確実性を考慮してアベイラビリティの存在範囲を推計できる。

図 16 アベイラビリティの算定値とシミュレーション結果



5 おわりに

本稿では、我が国の列車脱線事故の実績データを分析し、鉄道システムの安全性等の性能を表す各種指標値を推計して評価した。そして、各種性能への影響要因を考慮して性能向上策を提案し、実施効果を検証した。性能評価により得られた知見は以下の通りである。

(1) 列車脱線事故の発生件数は、長期的には減少の傾向にあり、また MTBF は増加の傾向にある。以前は踏切事故に伴う脱線事故の件数が多かったが、近年では少ない。

(2) 脱線事故の発生はポアソン過程に従うと考えられ、年あたりの発生件数はポアソン分布により、また発生間隔は指数分布によりモデル化できる。

(3) JR、大手民鉄、中小民鉄では各々災害、踏切、施設・軌道を原因とする脱線事故が多い。

(4) 脱線事故 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る。MTTR は 20 時間程度／件であり、近年では大きな変化はない。

(5) MTBF と MTTR により算出されたアベイラビリティは、MTBF の長期的な増加傾向の効果により、上昇する傾向にある。

(6) 脱線事故による死傷者数は多くを乗客が占め、長期的には減少の傾向にある。死傷者数については、適当な確率分布でのモデル化は難しかった。

列車脱線事故データの分析結果に基づいて、性能向上策を提案し、その実施効果を現状と比較する形で評価して得られた知見は以下の通りである。

(1) 土砂災害等区間への列車進入防止策（方策①）の実施により、MTBF の延伸、MTTR の短縮が実現することでアベイラビリティは向上し、これらは全ての方策の中で最も良かった。

(2) 踏切での脱線事故防止を目的として提案した 3 つの方策のうち、踏切を通らない経路

に大型自動車を誘導すること（方策③）により、MTBFの延伸とアベイラビリティの向上が期待されるだけでなく、死傷者数は他の方策に比べて大きく減少する。

(3) 中小民鉄において木まくらぎをPCまくらぎに交換すること（方策⑤）により、死傷者数を除いて、いずれの性能評価指標も良化する。

列車脱線事故には幾つかの原因があるため、各原因に対応した方策が必要である。災害を原因とする事故については、環境条件の変化により警戒すべき区間、箇所が変化し得るため、その対応が必要になる。また、踏切を原因とする事故では、直前横断による事故に対する有効な方策の検討が課題である。更に、中小鉄道事業者向けの方策は可能な限り低コストであることが望ましい等、様々な課題が存在する。本研究のような分析により、より高い効果を得られる対策の内容や範囲を明確化し、効率的な方策を検討することが、今後の課題である。

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.
- An, M. and Lupton, J. (2002) "Safety Assessment in Railway - The current Status and Future Aspects", Railway Engineering 2002, London.
- 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.
- 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, Vol. 69, No. 8.
- Huang, S. (2002) "Safety Management in the UK railway Network", Railway Engineering 2002, London.
- 市田嵩 (1979) 「保全性工学入門」日科技連.
- 市田嵩, 鈴木和幸 (1984) 「信頼性の分布と統計」日科技連.
- INNOTRACK (2011) "Guideline for LCC and RAMS Analysis".
- IRIS (2016) "International Railway Industry Standard Guideline 4 RAMS/LCC".
- JR 西日本 (2023) 「踏切安全対策の取り組みについて」News Release.
- 国土交通省鉄道局監修 (2022) 「鉄道六法」第一法規.
- 国土交通省鉄道局監修 (1990~2022) 「数字でみる鉄道 '90~2020」(財) 運輸政策研究機構.

列車脱線事故データの統計的特徴と安全性等向上策

- 国土交通省鉄道局監修（1987～2020）「鉄道統計年報」政府資料等普及調査会。
- 熊澤毅（2009）「JR 東日本における災害検知装置の取組み」新線路，第 63 巻，第 4 号。
- 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.
- 松本雅行（2013）「鉄道の RAMS を変える～日本からの提案～」JR EAST Technical Review, Vol. 43.
- 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，1 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，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」土木学会論文集 D，第 64 巻，1 号。
- Richard, H.（2002）“Accidents Raise Fears about Britain’s Fragmented Railway”, Japan Railway & Transport Review, Vol. 33.
- 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，Vol. 53, No. 2.
- 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.
- 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）」。
- 運輸安全委員会（2013）「鉄道事故調査報告書 富山地方鉄道株式会社 上滝線 小杉駅～上堀駅間 列車脱線事故」RA2013-6.
- 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。
- 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。

付記 本稿は，東京経済大学 2022 年度個人研究助成費（受給番号 22-24）による研究成果の一部である。