

鉄道システムにおける安全性向上への取り組み ～ 運転支援システムと事故対応に関する考察～

5 班 松田誠一 今村翔 横尾博和

アドバイザー 古川宏

概要

事故の教訓を通じて運転支援システムの改善がなされてきた過程を調査し、実際に鉄道事業者が自動運転システムの導入時にどのようなリスク評価を行ったのか取材を実施した。さらに、鉄道事故報告書に基づき、現状における事故の発生状況について分析を行い、最後に、鉄道システムにおける安全性向上について得た知見を述べる。

1 序論

1.1 背景

2005年4月25日、JR西日本福知山線において、107名が死亡、500名を超える乗客が負傷する列車脱線事故が発生した。主な原因として制限速度の超過や保安装置として旧型ATSのみの設置などが考えられており、現在、航空・事故調査委員会によって、詳細な事故原因について調査が進められている。

過去の鉄道事故を振り返ると、平成15年度までの運転事故件数及び運転事故による死傷者数の推移（図1）から、運転保安設備の整備等の対策を講じることにより、全体の事故件数が年々減少している。だが、その死傷者数は減少傾向の中にも幾分ばらつきがあり、重大事故の発生により、鉄道の大量輸送という性質から多くの乗客が被害を被ることが示されている。

重大事故としては列車同士の衝突や脱線などが挙げられ、その主たる事故原因の多くは信号見誤りなど、運転士のヒューマンエラーである。運転支援システムは運転士をバックアップする目的で開発され、事故を通して改良され続けている。

1.2 目的

では、鉄道事業者は安全対策としてどのようなことを行っているのだろうか。本研究では、運転支援システムの運用と鉄道事故の分析という2つの側面からのアプローチを通じて、取材結果及び鉄道事故報告書に基づき、鉄道システムにおける安全性向上への取り組みに関して考察する。

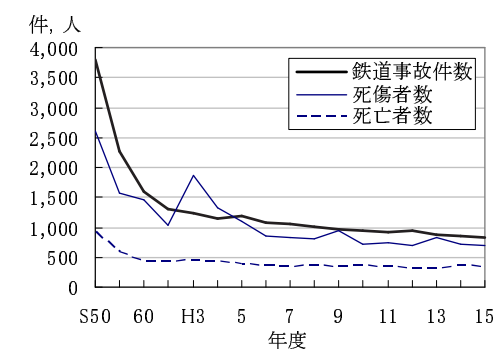


図1: 運転事故件数及び運転事故による死傷者数の推移

1.3 全体の流れ

第2章では、事故の教訓を生かして運転支援システムの改良が行われてきた過程を概観する。運転支援システムには異なる目的で作られたATS・ATCとATOが存

在しており、その両方を組み合わせた ATC/ATO システムは新交通システムや地下鉄の多くで導入されている。第 3 章では、いくつかの鉄道事業者に対して対面、電話、メールを通じて取材を行い、ATC/ATO 導入におけるリスク評価や現場で実際にどのように運用されているのか取材した結果を報告する。さらに、ATC/ATO システムを導入するための条件、リスクについて考察する。運転支援システムに関連する事故を調査していく上で、一般の事故に対する鉄道事業者の対応に関心を持ち、鉄道事故報告書や公表されている事故原因報告書を利用して、調査を行った。第 4 章では事故原因とその再発防止対策について考察する。第 5 章にて本研究によって得られた知見をまとめる。

2 運転支援システムの導入

本章では、運転支援システムにおいて、必要となる閉そく区間の概念を説明し、現在、用いられている運転支援システムがどのようにして導入され、どのような機能を持つかを述べる。

2.1 閉そく区間の概念

閉そくとは、線路をいくつかの区間に区切り、その一区間に 1 本の列車しか入れないようにする仕組みである。閉そく区間を確保するために、区間の入り口には、信号機を設置し、列車がその閉そく区間内を運行している場合には、信号機が赤になる。さらに、その列車が閉そく区間を出た後、その閉そく区間の入り口の信号は、注意を促す意味の黄色信号となる。(図 2)

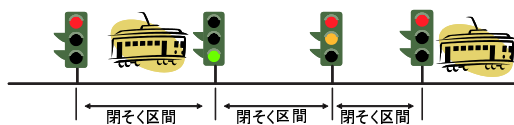


図 2: 閉そく区間

閉そく区間は、後続の列車が先行する列車に追突することを防ぐために導入された概念であり、運転士が信号を遵守すれば、基本的には安全を確保することが出来る。しかし、後述する三河島事故など、運転士が信号を見誤る事により重大事故が発生することがあった。そのために、運転士のミスをバックアップする運転支援

システムが必要となった。

2.2 自動列車停止装置 (ATS:Automatic Train Stop) の導入

ATS は、過去に起きた事故を教訓をもとに、改善されてきて、今や、在来線のほとんどの導入されている。しかし、コストの問題もあり、事故時の福知山線のように、旧型の ATS を導入している鉄道も存在する。本節では、ATS がどのような事故の教訓をもとに改善してきたかを具体的に述べる。

2.2.1 ATS-S(ATC-Signal) の導入

きっかけとなった事故 1962 年、常磐線三河島駅構内で貨物線から下り本線に進入しようとした田端操車場発水戸行きの下り貨物列車が脱線。直後に下り本線を進行してきた上野発取手行きの下り電車と衝突し、上り本線の妨げになった。更にその現場に上野行きの上り電車が突入した。一部の車両は転落して粉砕するなど、死者 160 人を出す大惨事となった。

事故の原因 田端操車場発水戸駅行きの下り貨物列車の運転士が信号を見間違えて、停車場内に進行したことによる。

システムの機能 停止信号の手前に地上子を設置し、列車が地上子を通過すると、警報が発せられ、5 秒以内に運転士が確認ボタンを押さない場合、非常ブレーキが作動する。しかし、運転士が確認ボタンを押すと、機能は解除され、その後は運転士任せになる。そのため、運転士が確認ボタンを押した後に、ブレーキをかけ忘れてしまった時に、事故につながる危険性がある。

2.2.2 ATS-Sx(改良型 ATS) の導入

きっかけとなった事故 1989 年、飯田線北殿駅において、停車中の天竜峡発長野行き下り列車に上諏訪発天竜峡行き上り列車が正面衝突。

事故の原因 上り列車が停車場内への進入の可否を指示する場内信号機の赤信号を無視して進行したこと。

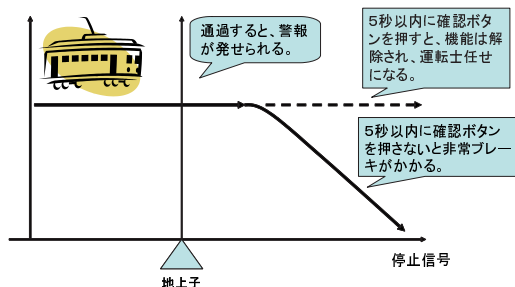


図 3: ATS-S の機能

システムの機能 ATS-Sに場内信号機や停車場から列車が出発することの可否を指示する出発信号機などの絶対に逆らえない絶対信号機の直下での非常停止機能を追加し、地上子を通ると警報が発せられ、運転士の意思に関わらず、直ちに非常ブレーキがかかる。しかし、ATS-Sに絶対信号機直下で非常ブレーキがかかるように改良されただけであり、通常の赤信号では運転士が確認扱いをすると、機能が解除される問題は解決されなかった。

福知山線において、事故時に導入されていたのは、このタイプのATSである。

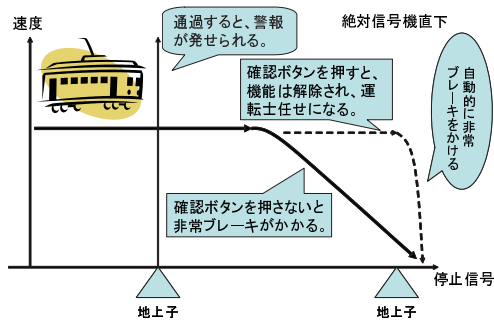


図 4: ATS-Sx の機能

2.2.3 ATS-P(ATS-Pattern)の導入

きっかけとなった事故 1988年、中央線東中野駅において停車中の下り電車に後続車が追突。

事故の原因 「ATS-S」が作動し、確認扱いをした後、列車の遅れを取り戻そうとした運転士が列車を進行させたこと。運転士が一度、確認扱いをしたためATSの機能は停止してしまっていた。

システムの機能 地上子から電気信号を受信し、停止・減速させるパターンを記憶・作成し、パターン速

度を超過すると、常用最大ブレーキをかけて減速または停止させる。情報伝達は、従来の地上 車上の一方方向だけでなく、車上 地上の伝達により、閉そく区間での信号表示がスムーズになり、運転間隔を短縮することが可能になった。

ATS-Pが導入されたのは、ATS-Sxよりも早い時期だったが、機能はATS-Pの方が良い。しかし、導入するには、莫大なコストがかかるため、列車本数の多い路線にしか用いられなかった。

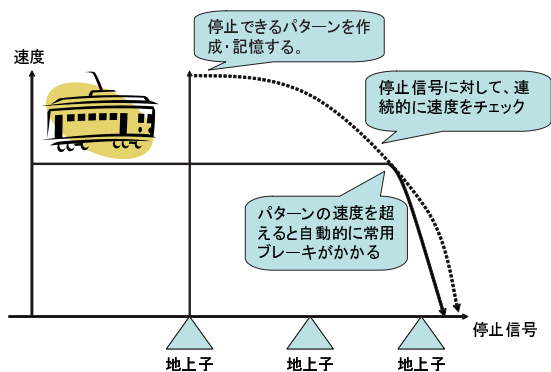


図 5: ATS-P の機能

ATS-Pと互換性があり、コストを低減するために、必要外のATS-Pの車上 地上への情報伝達機能を省略したATS-P2がある。事故後、福知山線でもこのATS-P2が導入されることになった。

ただし、ATS-Pを導入することで点制御から点を基準にした連続制御に変わり、安全確保のための無駄は軽減されるが、地上子の適切な設置など正しい運用がされない限りは、いずれにしても安全とは言い難い。逆に古いシステムであっても運用によっては十分な性能が得られ、はるかに安価であることから、優れたシステムであるという考え方もある。

2.3 自動列車制御装置 (ATC:Automatic Train Control) の導入

ATCは、1964年に東海道新幹線で初めて導入された。新幹線のような高速運転では、運転士が異常事態に気付いて非常ブレーキをかけても完全に停止するまでに数kmの距離を要する。そのため、異常事態が発生してから動作するという運転支援システムでは、高速走行かつ安全な運行を行うには不十分とされており、導入さ

れた方式である。信号機が車両の運転席速度計周辺にある車内信号方式によって速度信号を示し、運転士が信号より速い速度で運転した場合、自動的に減速させるものである。

主に、アナログ ATC とデジタル ATC がある。アナログ ATC は、1つの閉そく区間で列車は指示速度以下になるように減速し、次の閉そく区間までその速度を保つようにする。一方、デジタル ATC は、地上から送られる信号をもとに最適なブレーキとその開始位置をコンピュータが計算し、それに基づいて列車を制御する。

2.4 自動列車運転装置 (ATO:Automatic Train Operation) の導入

ATS、ATC は減速のみを行うが、これに加えて、加速を行う ATO がある。ATO は、運転士の負担を軽減することや人員削減のために、導入された。出発ボタンを押すと ATC 信号の制限速度内で路線に最適な運行パターンを発生させ、加速し、速度を保ち、駅が近づくと減速する、という動作を自動的に行う。

次章では、ATO がどのように運用されているかについて述べる。

3 ATC/ATO の運用

本章では、ATS-P より高度な機能を有する ATC と ATS・ATC とは異なる目的で開発された ATO を組み合わせることで、ワンマン運転化、完全無人自動運転化を実現した地下鉄、新交通システムの2つの鉄道システムに焦点を当てる。新交通システムとして、ゆりかもめ、地下鉄では東京地下鉄、福岡交通局、東京都交通局、京都市交通局、また、現在最も新しい路線であるつくばエクスプレスに取材に協力していただき、ATO/ATC を導入する際にどのようなリスク評価が行われ、実際に現場でどのように運用されているのかの調査を実施した。

3.1 ATC/ATO 導入の目的とその条件

はじめに、ATC/ATO システムについて概説する。通常は ATO のプログラム制御により運行を行うが、プログラムのエラーや制限速度以上で閉そく区間内に入

った場合は、ATC による速度制御が働いて自動的にブレーキが作動しその閉そく区間内の定められた速度まで減速するようになっている。ATC/ATO システムの運転曲線を図 6 に示す。

ATO を導入する目的はいくつか存在するが、一番の目的はコスト削減である。地下鉄では、ワンマン化による運転士の業務肥大化防止、すなわち運転士の負担軽減の目的により導入された。一方、ゆりかもめなど新交通システムでは、ATO のプログラム制御による完全自動無人化の目的で導入されている。他の目的として、停止精度の向上や多段ギア加速・減速による乗り心地の向上などがある。また、新交通システムでは、無人化を実現できていることから、需要変動に対応して柔軟にダイヤを編成することも可能である。プログラムによりブレーキ制御を行うことで車両の停止精度が格段に向上し、ホームドアを設置することが可能となった。図 7 に平成 15 年度の運転事故発生状況を示すが、人身障害のうち 102 件はホームからの転落・ホーム上での接触であり、ホームドアを設置することは人身事故対策に直結する。

地下鉄・新交通システムに共通する鉄道システムの特徴は、“他交通機関と分離されていること”である。図 7 から分かるように、鉄道事故の約半数は踏切部分で発生しており、その多くは車両の踏切内への進入によるものである。他交通機関を交差する部分は鉄道システムにおいて最も大きなリスク要因と考えられるが、地下鉄・新交通システムともそのリスク要因が存在しない。

専用高架軌道上を運行する新交通システムにおいては、軌道上に人・障害物が進入する可能性がほとんどなく、不確実なリスク要因が排除された状態である。そのような状態を作り上げることが出来たことが、ATC/ATO システムによる自動化運転が実現できた一番の要因で

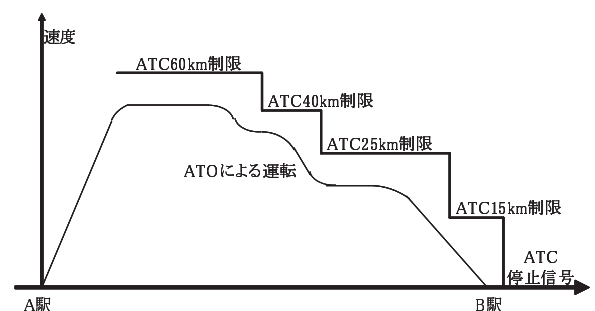


図 6: ATC/ATO システムの運転曲線

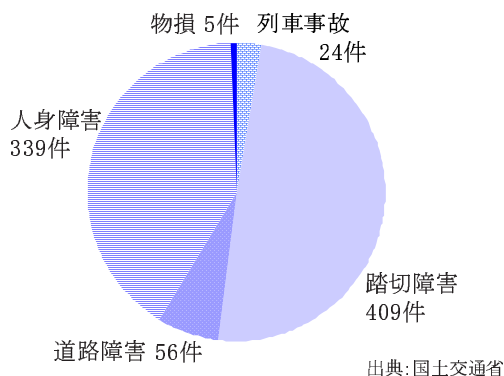


図 7: 平成 15 年度 鉄道運転事故の発生状況

あると言える。車両を無人化して最も考慮しなければならないことは、非常時における対応であると考えられるが、新交通システムでは特殊な環境要因により柔軟に対応を取ることが出来ている。

地下鉄も外界から遮断され、新交通システムと同等の無人化運転可能な環境にある。実際にフランスのパリ・メテオロール線では巡回員付ドライバーレス運転が実現しているが、日本では国土交通省により地下鉄における完全無人化運転は認められていない。なぜなら、2003年に発生した韓国地下鉄火災のように非常事態が発生した場合に地下鉄の閉鎖的環境等の要因により、乗客が周囲の状況を正確に把握できずにパニックに陥る可能性が考えられるからである。福岡地下鉄の方によると、地下鉄のトンネル内のすべてに監視カメラを取り付け、乗客に適切に誘導指示を出せるような環境ができれば、無人化を実現することは理論上可能であるが、現実問題として無理な話であり、地下鉄における無人化は現時点では全く考えられないということだった。

3.2 ATC/ATO 導入時のリスク評価

取材に協力していただいた鉄道事業者に対し、ATO 導入時にどのようなリスク評価を行っているか伺った。

ゆりかもめは 1995 年に開業した新交通システムであり、それ以前に運行システムを採用している新交通システムとして大阪市交通局のニュートラムや神戸新交通のポートライナーがある。ゆりかもめはその前例を参考にして、ATO の導入を行っている。福岡市交通局は、1982 年に地下鉄として初めて ATO を導入したが、リ

スク評価は行っていない。東京都交通局、東京地下鉄、京都市交通局からも同様の回答を得た。つくばエクスプレスによれば、ATO は開発されて 30 年以上が経過しており、既に安全性が確立しているシステムとして導入しており、ATO 自体に問題があると考えていないということだった。つくばエクスプレスは、新交通システム (40km/h) や地下鉄 (60~80km/h) と比較して最高速度が 130km/h と高速であるが、その速度域で ATC/ATO を導入したのは全国で初めてのことである。

いずれの鉄道事業者も試運転を行う段階で、考えられるケースの中でも最悪のケースに対して、適切に対応できるか数多く試験を実施、また、重要な車両設備に対して冗長系を採用することにより、システムの安全性・信頼性を向上させているということである。さらに、ATO は ATC 完備の下に導入されており、ATC による非常ブレーキの作動により、想定以上のスピードが出ることを防止している。ここで、ATC の信頼性もさることながら、非常ブレーキが正常に働くかどうかはそのシステムが破綻しないための“最後の砦”であり、通常ブレーキも含めてブレーキ制御は鉄道においての最重要事項と言える。一般にブレーキ制御は、フェイルセーフの概念で設計されており、その上で、3 重系にしたり、通常と非常ブレーキを独立の電流感知の回路で構成し、どちらか一方は必ず動作するような仕組みにするなど様々な対策が取られている。

現時点では、実際の現場で用いることができるようになりリスク評価手法はなく、事故発生後にシステムに修正を加える手法が一般的である。過去の事故の経験が蓄積されシステムの信頼性を向上させる経験工学が鉄道システムにおいて最も利用されている手法であるが、リスク評価のための理論的な手法を取り入れた ETA (Event tree analysis) や FTA (Fault tree analysis) による確率的安全性評価 [2] やシステム工学的手法を利用してリスクマネジメントのための指標を作成する [1] など、理論的な手法とうまく融合させて活用していくことで、より効率的なシステムのリスク管理が可能になると考えられる。

3.3 ATC/ATO に関する事故とその対応

1993年10月、ATC/ATOシステムを採用し完全自動無人運転である大阪市交通局のニュートラムが終着駅で止まれずに車止めに衝突し、乗客215人が負傷する事故が発生した。同年11月の事故調査報告書によれば、事故原因の一つに考えられるのが保安回路のリレー接点溶着であり、ATCからもATOからもブレーキ指令が出力されないという事態に陥っていた。同システムを採用するゆりかもめは、事故が発生した同時期に監督庁に対して説明を行っていたが、ニュートラム事故の原因と再発防止対策が明らかになるまでは、開業が延期されることとなった。そこで、ゆりかもめは車上装置に対して、ATOとATCのブレーキ指令を並列回路で構成する、ブレーキ指令の不足を検知する装置を設置するなど、ATC、ATOそれぞれのブレーキ制御を強化し、地上装置に対してはATC信号のほかに速度照査付の過走防護装置を設置する対策を行い、翌年5月に許認可を取得した。

オーバーランはブレーキ指令が出力されているが、ブレーキ制御がうまく働かないことが原因で発生するものである。ゆりかもめでは、開業当初、先頭車両に乗客が集中し中間車両に設置されていた応荷重装置が車両重量に見合っただけのブレーキ特性を発揮していなかったことから、オーバーランが発生している。これを受けて、ブレーキの制御パターンを変更し、より段階的に減速していくパターンとした。それ以降、ゆりかもめではオーバーランが発生していない。

2005年8月に開業したつくばエクスプレスでも、オーバーランが発生しているが、その原因として雨天のために車輪が滑走しやすい状況であったことと車両毎にブレーキ性能に若干の差があったことの2点が挙げられる。対策として、個々の車両性能を修正し、ブレーキパターンの調整を行っている。昨年の11月から試運転を何度も行っていたが、例えば、雨が降り出した直後と本降りではブレーキのかかり具合が異なり、事前にすべての状況に対応するようにプログラムを調整しておくことは困難とされている。やはり、問題が発生した後に適宜対応していく方法しかないだろうとのことであった。

ブレーキが適切に動作すれば、原則的にATOはATC完備を前提として導入されているため、ATOのプログラムエラーが発生しても、ATCにより想定以上のスピー

ドが出たとしても、非常ブレーキが作動し、スピード超過による脱線を防止する。むしろ、ATOを導入することによる本質的な問題は、運転士の技術レベルの低下や無人化したことによる非常時への対応である。

4 鉄道事故と事故対応

ATC/ATOシステムを採用した路線では、運行に関しては人が関与する部分はほとんどなく、ヒューマンエラーが原因となる通常運転時の事故は減少し、ATC/ATOシステムを含めて車両の信頼性の向上がそのまま鉄道システム全体の安全性に直結する。そこで、本章では、公表されている鉄道事故報告書に基づき、現状での在来線を含めた鉄道事故の発生状況を分析し、その事故原因について考察する。はじめに鉄道事故報告書について概説する。

4.1 鉄道事故報告書と鉄道事故調査報告書

鉄道事業者は、鉄道事業法に基づき国交省管轄の各地方運輸局に対して鉄道事故運転事故および輸送障害(旅客列車において30分以上遅延を生じたもの)の報告を行う義務があり、各地方運輸局は毎年その地域で営業を行う鉄道事業者に関する事故データをとりまとめる。

今回、関東運輸局が所蔵する中では最も新しい“平成15年度 鉄道運転事故等報告書(関東運輸局管内の重大事故)”及び“平成15年度 鉄道運転事故等報告書(関東運輸局管内の重大事故以外)”の2つの行政文書に対し、情報公開請求を行い、重大事故7件、重大事故以外12件に関する事故報告書を入手した。また、事故・鉄道調査委員会[6]により公開されている2001年から2005年までの重大インシデントに関する鉄道事故調査報告書も参考にした。

4.2 事故原因の分類

通常運転時と保守・点検、臨時作業時の2つの状況において発生した鉄道事故について、その原因を4つに分類し、それぞれの鉄道事故がどのエリアに該当するか調査した。その結果を表1に示す。

この表より、通常運行時において、人的要因による事故はなく、事故の大部分は車両の整備不良及び踏切におけ

表 1: 鉄道事故原因の分類

	通常運行	保守・点検時
人的要因		保守係員の錯誤 (3件), 運転技術の不足 (1件), *工事違反 (1件), *情報伝達ミス (1件)
機械的要因	踏切障害物検知装置の異常 (1件), ベビーカーの戸挟み (1件), 車両設備の異常 (6件)	
外的要因	車両の踏切内への進入 (7件)	

る事故である。また、保守・点検時においては人的な要因による事故が多い。

踏み切りにおける事故の多くが、踏切道において自動車もしくは2輪車が遮断桿を突破し軌道内へ進入、運転士が非常ブレーキをかけるが間に合わずに衝突というケースである。各鉄道事業者は総じて緊急対策として、全国交通安全等における踏切事故防止の啓蒙活動の推進、恒久対策として、踏み切り動全般における視認性の向上に努める、踏切道の改良、などの措置をとっている。さらに、現在の鉄道システムにおいて最も事故が発生する要因は鉄道が他交通機関と接触することであることから、将来的には、踏切部を立体化することが望ましいと考えられる。

国土交通省 [7] の公表による踏切箇所および踏切事故件数の推移 (図 8) から、そのような鉄道事業者の安全対策が講じて、平成 15 年度における事故件数は昭和時代の事故件数より大きく減少している。しかし、全踏切数に占める第 4 種の踏み切りの割合が減少するにつれ、近年の踏切事故は漸近的にしか減少していないと捉えることができ、現水準からの劇的な事故件数の減少は難しいと考えられる。踏切事故において過失は自動車側にあることが多く、鉄道事業者は長期的に十分な対策を施してきていることから、自動車側からのアプローチも必要ではないだろうか。例えば、踏切部に近づいた

ことを自動車自身が検知し、自動車の運転手に警告を促すシステムなどが考えられる。図 8 における踏切種別は以下の通りである。

第 1 種: 自動踏切遮断機を設置するか又は踏切保安係を配置して、遮断機を閉じ道路を遮断するもの

第 2 種: 1 日のうち一定の時間だけ踏切保安係が遮断機を操作しているもの

第 3 種: 踏切遮断機は設置されていないが、踏切警報機は設置されているもの

第 4 種: 踏切遮断機も踏切警報機も設置されていないもの (第 1 種 ~ 第 3 種以外の踏切道)

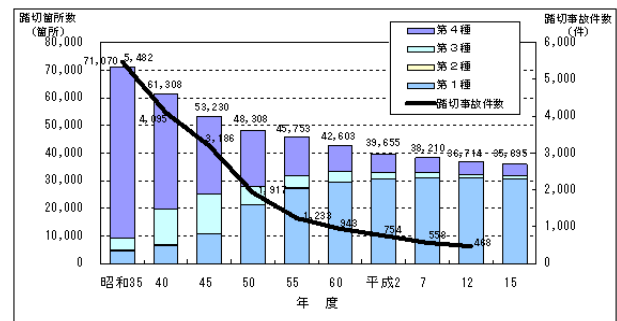


図 8: 踏切箇所および踏切事故件数の推移

保守・点検時における人的要因の詳細を以下に示す。

- ・作業区間内にポケットを置き忘れ、後の確認を怠った
- ・連動装置の不具合の原因を判明できず列車を運休した
- ・協力会社社員が電源線を誤ってショートさせた
- ・回送列車の運転士の漫然運転により、留置車両に衝突
- ・作業区間内に列車が走行、作業車と衝突¹

保守点検時の人的ミスは重大インシデント調査報告書でも多く見られ、なんらかの対策が望まれる。どのようなシステムにおいても、保守点検時における事故の軽減は難しい課題として残るものであるが、保守点検時を含めたトータルでの運行管理などのシステムの構築を試行錯誤しながらも行っていくべきである。

¹ 鉄道重大インシデント調査報告

5 結論

5.1 まとめ

事故の教訓を通じて運転支援システムの改善がなされてきた過程を調査した上で、実際に鉄道事業者はATO/ATCシステムをどのように運用しているのかについて取材を実施した。現在の鉄道システムにおいては、冗長系とフェールセーフの概念が信頼性の高いシステム設計を行うための不可欠な要素となっており、事故やトラブルなどの経験工学による改善が安全性向上の基盤となっていることを示した。運転支援システムの導入により運転士のヒューマンエラーによる事故が減少していることを踏まえ、鉄道事故報告書に基づき、現状における事故の発生状況について分析を行い、事故原因について考察を行った。鉄道システムにおける踏切部の重要性が明らかとなり、踏切事故への抜本的な対策が望まれており、現水準よりもさらに事故件数を減らすために自動車側からアプローチなども必要であると考えられる。

謝辞

取材に御協力下さったゆりかもめ株式会社、福岡市交通局、東京都交通局、東京地下鉄、京都市交通局、首都圏新都市鉄道株式会社（つくばエクスプレス）の皆様から感謝いたします。また、グループワークを進めていくにあたり適切な御助言を下された古川宏助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 福田久治. 鉄道交通におけるリスクマネジメント手法の研究 鉄道総研報告 vol. 17, No.1 , 2003.1
- [2] 藤原浩史, 柴田徹. 確率的な安全評価におけるヒューマンファクター 鉄道総研報告 vol. 19, No.1, 2005.1
- [3] 航空・鉄道事故調査委員会. 西日本旅客鉄道株式会社福知山線列車脱線事故(経過報告) 平成 17 年 9 月 6 日
- [4] 航空・鉄道事故調査委員会. 西日本旅客鉄道株式会社福知山線列車脱線事故に係る建議について 平成 17 年 9 月 6 日
- [5] 鉄道総合技術研究所.
<http://www.rtri.or.jp/> (2005.9.30 現在)
- [6] 航空・鉄道事故調査委員会.
<http://www.mlit.go.jp/araic/> (2005.9.30 現在)
- [7] 国土交通省.
<http://www.mlit.go.jp/> (2005.9.30 現在)
- [8] 地下鉄における運転方式の課題と対応策に関する検討委員会報告書 平成 17 年 3 月
- [9] 日本地下鉄協会. 世界の地下鉄, 山海堂 2000 .
- [10] 日本地下鉄協会. 次世代地下鉄システム研究委員会報告書(要約) 平成 14 年 6 月