

安全に関する研究開発の 取組みについて

JR東日本研究開発センター 安全研究所 所長
河野 浩一



今年度から当社の新たな安全の指針である「安全計画2008」がスタートしました。これを受けて、研究のアプローチについて3つの柱を立て取組むこととしました。安全性や輸送の安定性評価にお客さまの価値観を反映した、経営判断等に資する評価としていくことや、ヒューマンファクター研究において、異常時における人間特性の探求など研究のアプローチに関する主な特徴を紹介します。次いで、それぞれの分野における主な研究テーマの概要や課題について紹介するとともに、企業における研究開発で最も大切であると考えられる成果の業務への適用に関して、いくつかの具体事例をあげて説明します。

1 はじめに

会社発足以来これまで着実に高めてきた安全性を、更に向上していくために、会社の安全に関する新たな5ヶ年計画である安全計画2008においては、

- ・安全設備重点整備計画
- ・安全のレベルアップ
- ・安全マネジメントの変革
- ・安全文化の創造

の4つを柱として定め、社員一人ひとりが考え行動するうえでの指針としています。これらを確実に達成していくために、研究開発が果たす役割には大きいものがあり、したがって安全に関する研究のアプローチを、

- (1)安全安定輸送確保に向けた評価手法の構築
- (2)鉄道に関わる事故防止
- (3)ヒューマンファクター

と定め、今年度の研究開発をスタートしています。(図1)

それぞれの「ねらい」について述べると、まず(1)については、安全性やリスクあるいは輸送の安定性の評価にお客さまの価値観を反映することで、お客さまの感覚に合致し、経営判断に資する評価を導出することをねらいとしています。(2)については、列車衝突防止など主に部内原因に起因する重大な事故の防止に加え、災害起因の事故防止や、ホームでのお客さまの安全、協力会社社員の安全など、研究領域の拡大と深度化を図ります。さらに(3)については、これまでのチームやグループの安全能力向上の研究から、異常時における空白現象の解明やリスクモニタリングなど、人間特性そのものの探求ならびに事

故防止能力の向上手法などに焦点を当てた研究を始めています。

2 主な研究テーマと課題

安全計画2008達成に向け、先ほど記したアプローチに従って現在実施している主な研究テーマについて、そのねらいや課題等について以下に示します。

2.1 安全安定輸送確保に向けた評価手法の確立

2.1.1 鉄道システム全体の戦略的信頼性評価手法

鉄道システム全体の信頼性を安全性、輸送安定性を含め総合的に評価する手法の開発を目的としています。最終的には、各種施策決定の支援が可能な信頼性評価手法の確立を目指しています。

2002年度までの研究において、事故の発生頻度や影響規模の大きさを、過去の実績に基づいた平均値を用いて定量化し、それらの結果を結合し信頼性指標とする信頼性評価基礎モデルを構築しましたが、2003年度以降は、この基礎モデルに、発生頻度や影響規模を含めて不確実性等を反映させるなど、より実用的な信頼性評価モデルの構築を目指し研究を進めています。

現在の基礎モデルでは、平均値を用いて評価を行っているため、評価すべき値よりも低く見積もってしまう可能性があります。例えば、大地震のように100年に1度100人が死亡するような大規模災害と、毎年1人が死亡するような事故は、同じ評価値が算出されてしまいます。そのため、発生頻度や影響規模の不確実性に対し確率分布を用いた検討が必要であると考えています。

2.1.2 列車防護における次世代基本システムの構築

乗務員が列車の脱線、転覆又は線路の故障等のため、関係列車を急ぎ停止させる必要が生じた場合、防護無線により緊急停止信号を発報し、関係列車を停止させる仕組みを用い



図1：安全の研究のアプローチ

て安全性を確保しています。一方、現在では線路内に公衆の立入を認めた場合など、旅客の保護のためにも用いられるようになり、当初の想定を上回る使い方がされています。その結果、防護無線の発報件数は年々増加傾向にあります。また、防護無線電波は直接的に関係のない線区・列車に対しても緊急停止信号を発するため、支障のない線区の列車までもが停止しており、高密度で列車が運転されている首都圏エリアでは、防護無線による輸送影響は決して少なくありません。

本研究では、支障のない線区の列車に影響を及ぼさない新たな列車防護システムを構築し、列車防護時の安全と輸送影響軽減の両立を目指しています。

2.2 鉄道に関わる事故防止

2.2.1 のり面防護工の耐雨性評価システムの開発

降雨時の列車運行の安全性を確保するうえで、盛土・のり面等の土構造物及び沿線自然斜面の耐雨性、特に降雨に起因する崩壊に対する安定性の時系列変化やその特性を把握することは極めて重要となります。そこで、本研究では、降雨による雨水が土構造物内に浸透し、土中水としてどのような挙動をとることで、その当該土構造物が不安定化するのかといったプロセスに着目し、自然斜面（熊ノ平観測地）及び鉄道盛土（武蔵野線）にて実測データをベースとした研究開発を行っています。具体的には、実際の降雨に対する土中水応答の実測データの蓄積を進め、多様化に富む自然現象のデータベース化を狙いながら、数種類の数値解析手法を組み合わせた解析システムの開発を行い、「崩壊」に至るまでの不安定化の状況時系列変化の把握に努めています。

これらの成果は、のり面防護工の耐雨性評価を可能にし、のり面工施工等による防災投資の評価基準を示すことが可能です。また、同様の評価基軸を降雨時の運転規制に反映することも可能となります。例えば、現在導入が検討されている新しい雨量指標（実効雨量）に続く、次世代の評価基準のベースとなることが考えられます。

2.2.2 シミュレーションによる走行安全性評価手法

車両の走行安全性は現車試験結果を主体にしていますが、現車試験実施には多大な労力等がかかり、また厳しい条件は現車試験では再現することは困難でその条件も限定されます。そのためコンピュータシミュレーションを活用して、車両運動を再現することにより走行安全性を評価する手法の確立に取組み、現車試験の削減、車両・軌道の管理値へ反映することを目的としています。

シミュレーションの精度向上のためには、現車試験との差を検証することが重要ですが、現車試験では脱線に至るデータは限られているため、台車試験装置による脱線を模擬したデータを検証に使用することにより、現車試験と同等の信頼性のある車両走行安全性評価ができるようにすることが課題となります。

2.3 ヒューマンファクター

2.3.1 異常時の空白現象への対応策の研究

人は、トラブルや事故等の予期しないこと（異常時）に直面すると、頭が空白になる（空白現象と呼ぶ）など、通常時とは大幅に異なる心理状態が生じ、発生するヒューマンエラーのタイプも変化します。

本テーマでは、当社において安全上の重要度が高まっている非定常時・異常時に着目し、その状況における人間特性を明らかにし、作業者のパフォーマンスを確保するための方策を提言します。具体的には、過去の注意を要する事象や輸送障害事例の分析を行うとともに、異常時パフォーマンスを確保するための他産業等での効果的な取り組みなどを整理します。これをもとに、鉄道の異常時の具体的な場면을模擬したシミュレーター実験等を行い、状況や場面に応じた人間の特性やパフォーマンスの変化、発生しやすいエラーのタイプなどを明らかにします。

上記により得られた結果から、異常時における作業者のパフォーマンスを確保するため、人・もの・環境・管理等の面から具体策を検討し提言を行います。

2.3.2 リスクモニタリング訓練手法に関する研究

熟練の運転士は注意を要する信号機には特に注意を向けるなど、時期や場所に応じて、注意力をコントロールしながらメリハリのある運転をしています。また、人身事故が発生した場合などを想定し、準備しておかなくてはならない事柄を予測的に考えています。

一方、熟練検修社員は、車両機器の特徴や作業環境を考慮しながら、故障につながりやすい作業や危険な作業に対して敏感に注意力を向けるなど、作業内容、環境に応じて注意力をコントロールしながら事故防止をはかっています。

そこで、熟練運転士や熟練検修社員が習得していると考えられるエラー防止のスキルを抽出・整理し共有化を図るため、熟練運転士・熟練検修社員等のヒアリング調査を行い、そのノウハウを分析するとともに、航空界で行われているスレット（脅威）・マネジメントなどの手法も応用しながら、リスクに対してモニ

タリングを働かせるなど、事故を未然に防ぐ能力を向上させる手法の開発に取り組んでいます。特にリスクモニタリング能力の構成要素と考えられる「リスクの検出能力」、「注意のコントロール能力」、「ペース配分のうまさ」などと事故防止との関係进行分析することにより、リスクモニタリング能力訓練手法の提案を行うこととしています。

3 研究成果の適用

企業の研究開発においては、研究開発成果の業務への早期適用が経営基盤を強固なものにし、仕事の仕組みやシステムを変革していくうえで極めて重要です。この観点から、ここ数年の研究開発で業務への適用が済んでいる、あるいは準備を進めている主なテーマに関して、その概要と効果等について述べます。

3.1 輸送安定度指標の高度化に関する研究

(1) 概要

現在、輸送障害が発生した場合、運休本数や遅延本数、遅延時分などの指標を用いて、その影響を表現しています。しかし、この指標では、輸送障害の規模がわかりにくい、運転再開以降ダイヤ平復までの影響が含まれていない、といった問題があります。本研究では、この問題を解消すべく、「人・分評価」の概念を確立し、輸送安定度指標として用いることとしました。本指標では、

- ① 影響を受けたお客さまの人数(人)
- ② お客さまが影響を受け、通常より長く待った時間(分)

を考慮し、輸送障害におけるお客さまへの影響を定量的に表現します。

$$\begin{aligned} &\text{輸送安定度指標 (人・分)} \\ &= \sum (\text{影響を受けたお客さまの人数 (人)} \\ &\quad \times \text{影響を受けた時間 (分)}) \end{aligned}$$

例えば、30分遅れたお客さまが100人、20分遅れたお客さまが200人の場合、下記ようになります。

$$30(\text{分}) \times 100(\text{人}) + 20(\text{分}) \times 200(\text{人}) = 7000[\text{人・分}]$$

(2) 効果

この指標を用いて輸送障害の一例を表現すると右表のとおりとなります。

この指標を用いることで、輸送障害の規模を単一の指標で一意的に表現することができ、線区の輸送障害の規模を比較することもできます。お客さまの影響を考慮し、輸送障害の大小

を比較するには最適な指標であると考えられます。また、発生場所や発生時刻、再開時刻などを入力することで自動的に指標を算出するシステムを作成しました。

発生場所	発生時刻	現在の指標	新しい指標
都心部	8時頃	抑止 48 分 運休 80 本 遅延 29 本 (44 分～4 分)	2,360 万 [人・分]
郊外	11 時頃	抑止 83 分 運休 71 本 遅延 9 本 (94 分～3 分)	204 万 [人・分]
線区の 末端	21 時頃	抑止 23 分 運休 6 本 遅延 10 分 (23 分～5 分)	35 万 [人・分]

(3) 今後の展開

指標の深度化を図るため、お客さまの評価を定量化し、輸送安定度指標に組み込む研究を進めています。また、運転整理システム構築への活用についても検討しています。

3.2 SI値による地震時運転規制

(1) 概要

地震大国である日本を走る鉄道にとって、地震発生時に列車の安全を確保することは大変重要な課題です。当社では線路沿線に設置した地震計により地震動を観測しています。地震が発生した場合、観測した地震動が予め定めた基準値以上となると列車の徐行や運転を中止する運転規制を発令することで列車の安全を確保しています。以前は地震動指標としてgal値を用いていましたが、平成15年度より新しい指標として全在来線にSI値を導入しました。

SI値は地震による構造物の揺れの程度を表す地震動指標です。減衰定数0.2に対する速度応答スペクトルの周期0.1秒から25秒の区間の平均値として定義され、単位はkine(カイン)で1kine=1cm/secです。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{25} Sv(T, h = 0.20) dT$$

Sv : 最大速度応答 T : 周期 h : 減衰定数

(2) 効果

事前の検討により、これまでの安全のレベルを下げることなく、無駄な運転規制の発令回数を削減できると推定できましたが、導入後、実際に発生した地震を例にあげると、2003年5月26日に発生した三陸南沖地震では、図2に示すようにそれまで使用されていたgal値によるものとはほぼ同じ区間で運転規制が発令され、災害発生箇所を全て捕捉しており、従来指標と同等な列車の安全性を確保することが確認されました。一方、昨年8月

に発生した茨城県北部を震源とする地震のように構造物に被害が生じなかった地震では、図3に示すように unnecessaryな規制発令が減少することが確認されています。

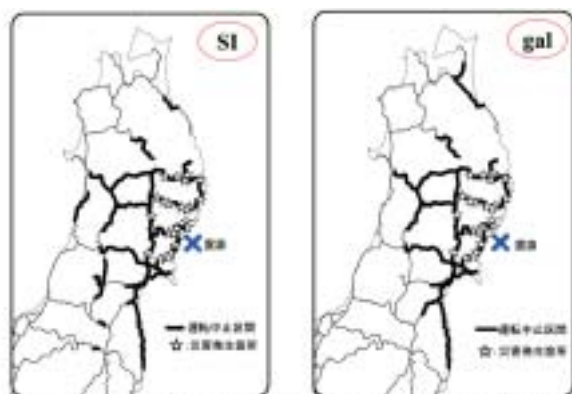


図2：被害地震の運転中止区間（左図：SI値、右図：gal 値）



図3：無被害地震の運転規制状況（左図：SI値、右図：gal 値）

3.3 強風予測警報システム

(1) 概要

強風時の運転規制は沿線の風の実況観測に基づいて行われていますが、このルールでは強風が観測されてから運転規制が発令される点や強風が観測されなくなっても一律に30分間運転規制が継続される点など、必ずしも合理的とは言えない面があります。そこで、現在時刻までの風速データから短時間先の風速の上限値を予測し、それに基づいて運転規制を発令する強風警報システムを開発しました。

当システムでは、現在風速と上限風速のいずれかが規制値に達した時点で規制を発令し、両方が下回った時点で規制を解除します。

運転規制区分（運転中止、速度規制、無規制）の決定指示は、次に示す手順を、各時間、ステップ毎に順次繰り返すプログラムにより、自動的に行われます。

- ① 観測風速から予測風速を定める。
- ② 予測風速と、観測風速の実現値とを比較することにより、予測誤差の分布（バラツキ）を推定。
- ③ 上記の分布をもとに上限風速を求める。

(2) 効果

個々の強風事例でバラツキがありますが、線路沿線24箇所およびJR東日本域内気象官署25箇所において観測した強風約300事例について調査し、現行ルール

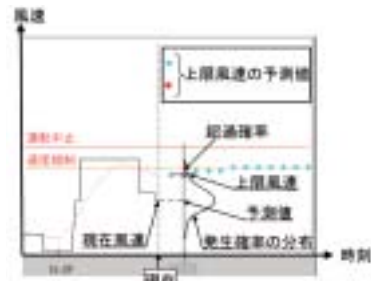


図4：強風予測システムの画像

安全性を保ちながら、運転規制発令時間が平均的に3割程度減少する効果が得られることが確認されました。

(3) 今後の展開

2002年度までに開発を完了し、平成15年度に社外識者による委員会「強風時の運転規制方法に関する技術検討会」にて承認されました。現在、越後線白山新湯間信濃川橋りょうに試作機が設置されているほか、京葉線新木場葛西臨海公園間荒川放水路橋りょうにも設置予定です。今後、防災情報システムの改修など、必要な導入環境の整備をまって、全社的に展開する予定です。

3.4 実効雨量による運転規制

(1) 概要

現在、降雨時の列車運転規制は、沿線に配置された雨量計の観測値から算出される「時雨量」と「連続雨量」の2つの組み合わせで行われていますが、12時間無降雨状態が継続した場合に連続雨量がリセットされること、逆に12時間連続して雨

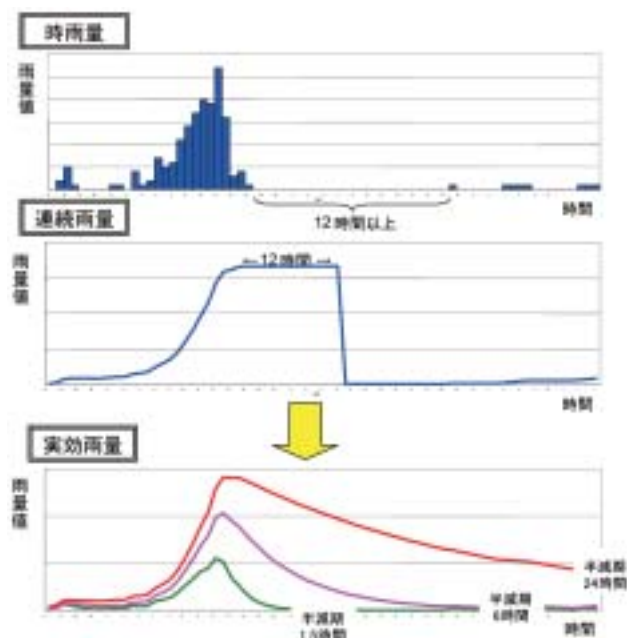


図5：時雨量・連続雨量と実効雨量の時系列推移

が降り止まない限りは少量の降雨でも規制発令が多発する場合が生じることなど、合理的でない面があります。

そこで、過去に降った雨の影響を考慮し、雨量が時間の経過とともに地表から流出したり土中へ浸透して減少していく状態を簡易な数学的モデルで表現した「実効雨量」指標を運転規制に用いることの有効性について研究を行ってきました。

(2) 効果

降雨と土砂崩壊の関係を、より正確に表現でき、合理的な運転規制が可能となります。

(3) 今後の展開

実効雨量指標では、規制区間のさまざまな降雨パターンを反映した適切な半減期を設定しました。今後は鉄道沿線のさまざまな降雨災害の要因の多様性を反映するために1.5時間、6時間、24時間の3つの半減期を組合せて規制基準値を設定することとし、早期導入に向けて有識者による技術検討会を開催しています。

3.5 線路閉鎖手続支援システム

(1) 概要

「線路閉鎖」は、作業箇所に関係する信号機に赤信号を表示させ、その区間に列車を進入させないことにより安全を確保する方法です。従来その申込み手続きや確認作業は電話連絡を中心としたものでした。

そこで、保守作業時のヒューマンエラーを防止するため、列車ダイヤ等との整合性がとれた作業計画の作成や、現地での運行状況の確認および作業着手・終了をモバイル端末で行う「線路閉鎖手続支援システム」を開発しました。



図6：システムの概要

(2) 効果

ヒューマンエラーの低減による事故防止が期待できるとともに列車通過後、直ちに着手できることにより約5分程度の作業時間増が見込めるほか着手終了手続きについて現行15分が3分程度に短縮できる効果があります。

(3) 今後の展開

2001年6月からの試行結果を踏まえた改修を実施し、新たに開発した保守用車進路構成システム機能を追加することについて篠ノ井線に適用する準備を進めています。

3.6 ホーム検知システム

(1) 概要

列車の最前部と最後部の左右に超音波センサを取り付け、センサがホームを検知していない場合には、開扉操作を行ってもドアが開かない仕組みとするものです。システムは、編成の両先頭車両にそれぞれ設置した超音波センサ、制御装置および報知ユニットの各機器で構成されており、制御装置間は情報伝送用の引通し線で接続されています。

軌道からホームまでの離れと高さは定められていますので、送受信兼用の超音波センサを使用して、定められた範囲に構造物があるかないかを送信から受信までの時間で測定します。この時間から物体までの距離を算出し、ホームの有無を判定します。編成全部がホームにかかっていることを判断し、車掌スイッチで開扉操作を行った場合に、ドア開扉ができるようにします。一方、出区点検や車両整備など、ホームがない場所でドアを開扉する必要がある場合には、強制的に開扉できる機能をあわせて持っています。

また、編成の一部がホームから外れて停車した場合やホームのない場所で開扉操作を行った場合は、警報表示灯と警報ブザーにより警報を発します。

(2) 効果

列車の一部がホームから外れて停車した場合やホームのない場所でドアが開かないように、乗務員のドア扱いをバックアップして安全性の向上に寄与できます。

(3) 今後の展開

2004年度中に京浜東北線209系83編成に対して導入予定であり、2005年度以降も他線区への展開を検討しています。

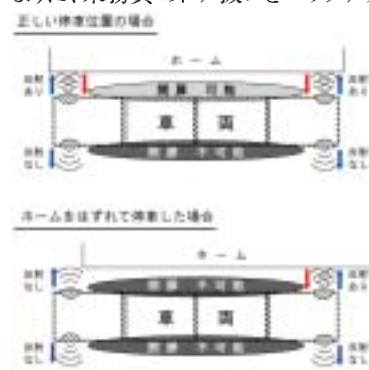


図7：停車位置と開扉条件

3.7 画像処理式転落検知システム

(1) 概要

当社では、首都圏の主要駅やカーブにより駅ホームと列車乗降口が離れているような駅を対象に、非常停止ボタンやホームステップ、転落検知マット等を順次整備し、ホームでのお客様の安全確保に努めています。これらの対策に加えて、線路面全域を自動的に監視することを目的としてステレオ画像処理技術を用い、自動的に転落者を検知し駅係員及び列車運転士に「転落者有り」を知らせるシステムを開発しました。図8に示すように、ステレオカメラをホーム上屋に設置し、1ステレオカメラあたり40m範囲、1ホームでは6台程度のステレオカメラを用い監視を行います。

(2) 効果

転落検知情報は列車の非常停止に用いられるとともにホーム上に設置した「立番表示器」及び駅事務室に設置した「遠隔制御装置」に表示されます。遠隔制御装置には、転落画面及び転落位置が表示されるので、駅係員はすぐに状況を確認することができます。

(3) 今後の展開

2004年7月12日より新宿駅12番線で運用開始しています。今後は、首都圏の駅ホームを中心に導入拡大を検討していきます。



図8：転落検知の一例

3.8 4M4E分析手法

(1) 概要

当社にとっての「事故の“芽”」である「注意を要する事象」は、その大部分がヒューマンエラーに起因して発生しているため、事故を防止するためには、ヒューマンファクターの視点から「事象」をしっかりと分析することが必要不可欠です。

ヒューマンエラーを誘発した要因について、多面的に分析を行い、的確な対策を立てるための手法に「4M4E分析」があります。しかし、「エラー誘発要因の分析に不慣れ」「対策の具

体化が不十分であることが多い」といった問題があり、この問題を解消するために、既存の4M4E分析に対して、新たな手順（①時系列分析 ②4Mなぜなぜ分析 ③4Eだからどうする分析）および解析シート（①時系列分析シート ②構造分析シート ③問題別詳細分析シート）を含む手法を開発しました（図9参照）。

(2) 効果

ヒューマンファクターに関する知識や考え方を吸収しながら、エラーが起こったプロセスを正しく捉え、エラーを誘発した本質的な要因を抽出し、実質的にエラーをなくせる、あるいは事故を防げる対策を策定できると考えています。



図9：4M4E分析手順

(3) 適用状況

2004年度は4M4E分析の「注意を要する事象」への適用を当社の全支社へ拡大し、4M4E分析を当社の「注意を要する事象」の分析手法として定着させ、事故の再発、未然防止につなげていきたいと考えています。

4 おわりに

安全計画2008で示される新たな安全の指針に対して、安全に関する研究開発のアプローチや具体的な研究概要などについて述べて参りましたが、研究成果を早期に業務に適用することで、仕事の仕組みやシステムの変革をはかり経営基盤を強固なものにしていくことが安全計画2008の達成に向けて重要だと考えます。業務への適用を効率的かつスムーズに実現していくためには、お客さまと現場に基軸を置いた研究に取り組んでいきたいと考えています。