

講演

「JR東日本における防災に関する研究開発の取組み」 ～進化する観測、評価、対策技術～

東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター 防災研究所長
島村 誠

1. はじめに

JR東日本の鉄道防災に関する研究開発の具体的な取組みについてご紹介いたします。今後、地球温暖化に起因して懸念される気象現象の苛烈化に対して鉄道システムがどのように適応していくかという観点から、「進化する観測、評価、対策技術」という副題をつけました。

はじめに、防災設備あるいは機構の開発成果、いわゆる対策技術について、特に新幹線の地震時の脱線対策に関する技術開発成果についてご紹介します。続いて、鉄道における気象、地象現象についての観測および観測データに基づく判断、評価の技術と、その応用である災害時列車運転規制方法の近年の改良事例についてご紹介します。最後に、将来の実用化に向けて現在進行中の取組みの事例として、最新の観測情報技術の鉄道防災への利活用に向けた研究開発についてご紹介したいと思います。

2. 新幹線の地震時脱線対策技術の開発

2004年10月23日の新潟県中越地震によって、上越新幹線で新幹線の営業史上初めての脱線事故が発生しました。これはそれ自体非常にショッキングな、かつ大きな被害をもたらした事故ではありましたが、長期的な技術発展の促進という副次的な効果の面から見ると、この災害のおかげで新幹線の安全性向上技術にとって非常に多くのヒントを得ることができたということが指摘できると思います。



上の写真にありますように、全体の編成が、最後尾車両をのぞいて、約1.6キロメートルにわたって、時速200kmを超える初速度から、この軌道の範囲を逸脱せず、いわゆるソフトランディングと言われる状態で停止しました。その要因のひとつとして、脱線現場付近の高架橋の耐震補強がきちんと完了しており、高架橋に損傷が生じなかったということがあります。また、走っていた線路がスラブ軌道であったということも挙げられます。さらに、先頭10号車が脱線した際、車輪と排障器座金がレールを挟み込むような形になったことで、車体が軌道から大きく逸脱することなくレールに沿ってずっとガイドされる形で停止に至りました。脱線した車輪が走った後の線路は激しく踏みつけられてレール締結装置も破断しましたが、このようなガイドという現象があったために大事に至らずに済んだという状況があります。

かみ合わせ継手を用いた鋼板巻立補強工法

従来工法：溶接で鋼板を接合
【問題点】
品質の確保
・溶接工の技量
・溶接時の施工環境（風・雨）
・堅固な足場が必要

増合せ継手の採用
【有利な点】
①接合部の品質管理が大幅に低減
②施工効率が大幅に向上

【施工状況】



2004年10月23日 中越地震による上越新幹線脱線



1号車の返水水路への落下状況



脱線現場付近高架橋の耐震補強状況



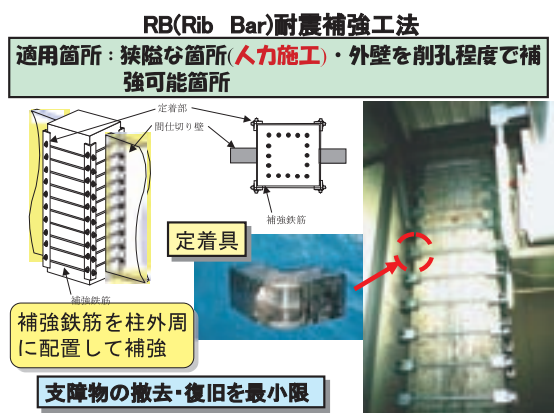
10号車4軸右車輪と排障器



破断した右レール

高架橋の補強については、この事故以前から営々と取り組んでいましたが、この災害の後、それまで以上に高架橋の耐震補強の重要性は認識されましたし、緊急性やコストダウンの意識も生まれました。

耐震補強工事は、高架橋の条件によっては非常に施工の難しいところがあるのですが、鉄板を溶接によって接合して巻き立てる従来の方法に替わるいろいろな補強方法が開発されています。ひとつは、かみ合わせ継手を用いた巻立工法で、溶接を行わないので施工環境による影響を受けず、効率も上がりコストダウンにもつながり、さらに非常に高品質な施工が可能となりました。



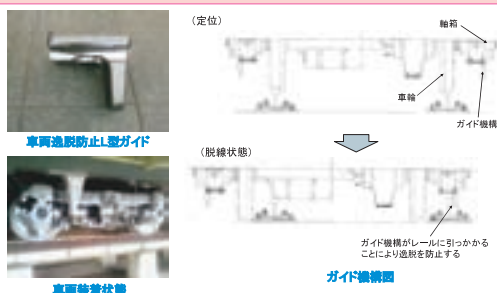
次にリブ・バー (Rib Bar) 耐震補強工法ですが、これは鉄板の代わりに、リブ・バーと呼ばれる補強鉄筋と定着部によって高架橋の柱を挟み込むものです。これによって施工の際に支障するスペースが最小限で済みます。

また、これに似たリブ・プレート耐震補強工法も開発されました。こちらは補強鉄筋の代わりにかみ合わせのついた補強鋼板を柱の外周に配置しますが、部材が小さく人力で簡単に施工でき、狹隘な場所でも施工が可能という長所があります。

それから高架橋の柱の前後が既に建物などで囲われてしまっているような場合に、柱の一面さえ露出していれば、建物に一切触らずに施工が可能な一面耐震補強工法や、薄く、かつ強度の強い多層巻きの耐震補強といった工法も開発されています。

車両逸脱防止L型ガイド機構

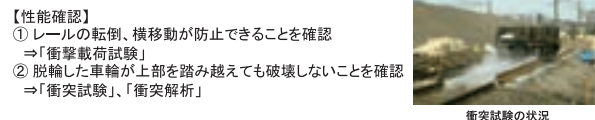
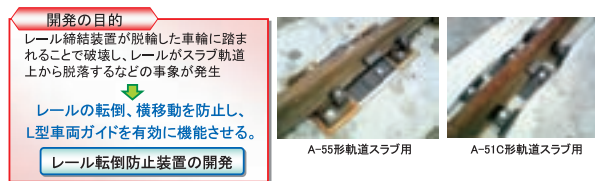
◇ 目的
中越地震による脱線事故において、先頭車両の排障器にレールが挟まり車両をガイド
⇒ 万が一脱線しても積極的にガイドする脱線防止機構を開発



それから初めに述べたように、脱線した車輪と排障器座金がレールを挟み込んで列車の車体が線路にガイドされることで、脱線はしたけれども軌道からは逸脱しないで済んだのですが、このようなことが起こり得るということは、今回の事故ではじめて明らかになったことであり、車体の設計時に意図したことでないのはもちろん、事前にその可能性を予測した人もおりませんでした。

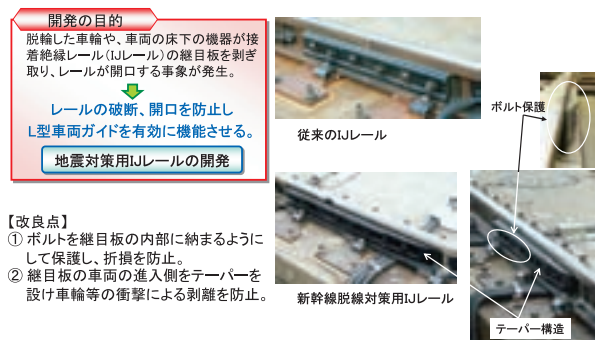
そこで、この事故の教訓を活かすべく、あらかじめそのような機構を車体に装備することを考え、車両の逸脱防止L型ガイド機構というものを開発しています。上図のように脱線をして、L型ガイドがレールに引っかかるようにして車体がそこから外へ逸脱していかないようにするものです。開発にあたっては、FEM解析、静的あるいは動的な荷重による載荷試験を行い、そして実際の車両に取り付けて高速走行に問題がないことも確認しています。

新幹線地震対策用レール転倒防止装置



また、L型ガイドを装備した車両が脱線すると、車輪はレール締結装置を踏みつけながら走行することになります。今回の事故ではさいわい大事に至りませんでしたが、締結装置の破壊によってレールが転倒したり、大きく変位した軌道上を脱線した車両が走行するのは危険です。そこで、レール転倒防止装置というものを軌道側の対策として開発しています。開発にあたっては、衝撃載荷試験や衝突試験を行っており、有効性を確認しています。

新幹線地震対策用接着絶縁レール

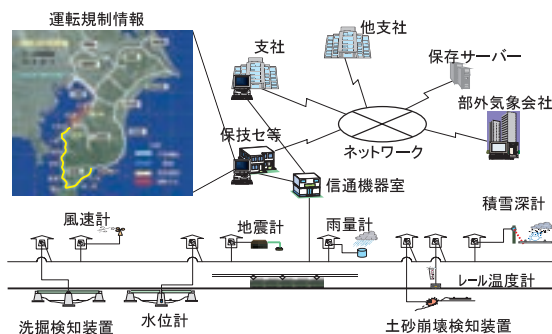


同様にL形ガイドによってレールのすぐそばを車輪が脱線したまま走りますと、接着絶縁レールの継目板を剥ぎ取ってしまい、レールが開口してしまうことが分かりましたので、継目板にテーパをつけるとともに、ボルト類を継目板の内側におさめることで破断を防ぐ新幹線地震対策用の接着絶縁レールを開発しました。

3. 災害時列車運転規制ルールの改良

鉄道には災害時の列車運転規制ルールというものがあります。気象、地象のいろいろな観測データを列車運行の決定に結びつけるための判断基準ですが、これらについていままで開発、改良を行ってきたことについてご紹介します。

防災情報システム(プレダス)

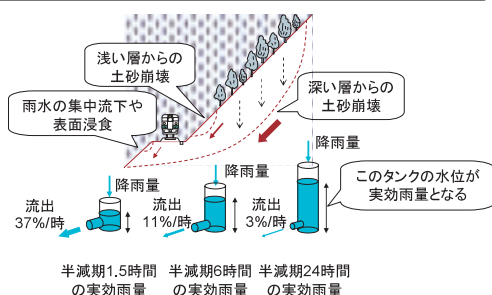


現在、JR東日本ではプレダスと呼ばれる防災情報システムが稼動しています。運転規制をする単位区間ごとに地震計、雨量計、風速計などを設置しており、それによって得られた観測データに基づく危険指標に対して決定しきい値を設けて、列車の運転中止や速度規制の判断を行います。その際、雨量や地震、風速などを正しく判断して列車の安全を確保するのみならず、不必要な運転規制によって列車ダイヤの乱れを生じさせないことが求められます。

自然事象に対する列車運転規制基準

降 雨：実効雨量

定義式 $R_m = r_m + \alpha R_{m-1}$ ただし、 $\alpha = 0.5 \frac{\Delta t}{T}$



降雨量の指標としては、時間当たりの雨量や連続雨量といった慣用的な指標を以前から用いていましたが、最近、降雨災害の発生危険度をより合理的に評価できる実効雨量という指標を導入しました。雨によって起こる災害には、線路の冠水や浅い層の浸食に起因するものや、深い層までしみ込んだ水によって起きる災害など、さまざまなものがあります。実効雨量は、上図のように、上部で降雨を受けながら貯まった水を底部の開口部から排出するタンクの中の水の量を模擬する数学モデルですが、貯まった水が排出される減少率、つまり底部の孔の大きさをいろいろ変えることによってさまざまな降雨災害に対する発生の危険性を評価できるというものです。タンクの水が半分になるまでの時間、つまり半減期でこの減少量を表していますが、半減期1.5時間、6時間、24時間の3つの指標で降雨時の運転規制をするルールを導入しています。

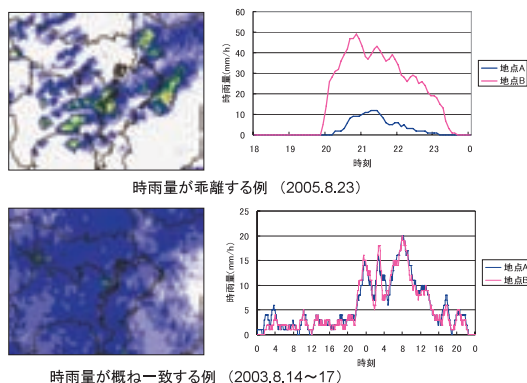
地震に関する指標は、かつては地表の最大加速度を表現する尺度であるガル値を使用していたのですが、最近、より構造物被害との相関の高いSI値に変えることによって、地震時運転規制の改良を図っています。

強風については、瞬間風速の観測値に基づいて運転規制を行っていますが、瞬間風速は、短時間にしばしば非常に大きく変動する量であるため、強風の吹きやみをどのようにして判断するかが運転規制ルールの重要なポイントになります。従来、規制値を超過する風速を最後に観測してから30分間経過した時点吹きやみと判断して運転規制を解除するルールが採用されていましたが、この方法では、往々にして大きなダイヤ乱れの原因となることが指摘されていました。そこで、より進んだ方法として、現在吹いている風速だけではなく過去数時間の風速の時系列データから、数分間ないし数十分間先までの将来の上限風速を統計的な手法によって予測し、この予測値に基づいて運転規制を発令・解除する強風警報システムを新たに導入しています。

これらの危険指標に関しては、SI値については東京ガスなどでは、地震時の都市ガスの供給遮断判断のルールに早くから導入されて効果を上げておられますが、実効雨量と予測に基づく強風に対する運転規制のルールは、少なくとも鉄道事業者としては初めて導入された先進的な取組みであると自負しています。

現在、運転規制について勉強していることのひとつに、雨量計の配置間隔はどのくらいが適正か、ということがあります。例えば相互に5キロぐらいしか離れていない2地点において、地域全体に均一に降るような雨であれば、時間当たりの雨量はほとんど一致しますが、最近にわか

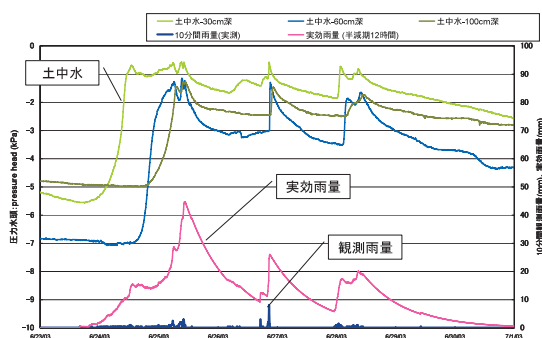
雨量計の配置間隔と雨量推定精度の関係



した雲のエコーが不均一にある箇所だけ非常に強いというような気象条件であれば、5キロも離れてしまうと雨量が全然違ってしまふことがあります。現在JR東日本では平均10キロに1カ所ぐらいの雨量計を配置しており、これは鉄道としてはかなり密度の高い配置間隔ですが、雨量計をどのぐらいの配置間隔にすればよいのか、あるいは将来は雨量計ではなく、連続的なレーダの情報などによって雨を観測し、列車運転規制の判断ができないか、というようなことを勉強しています。

先ほど実効雨量の話をしました、これは人間が考えた数学モデルであり、実際にそれが土砂災害などの発生メカニズムに対応しているということを物理的に確かめたものではありませんので、実際の降雨の浸透現象の観測データを積み重ねることにより、さらにより危険指標に改良できるのではないかと考えています。現在、信越本線の廃線になった横川－軽井沢間の旧熊ノ平駅構内のかつて大きな土砂崩壊があった斜面、武蔵野線の人工盛土の斜面、それから豪雪地で雪解け水がしみ込むということが問題になる只見線の大白川、といった場所で土中水の観測を行っています。

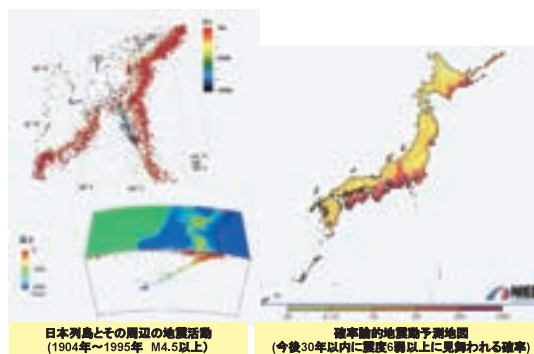
実測データの特徴



降雨の浸透による土中の水分量と実効雨量がどのぐらい対応するかという事例を示しますと、観測雨量と半減

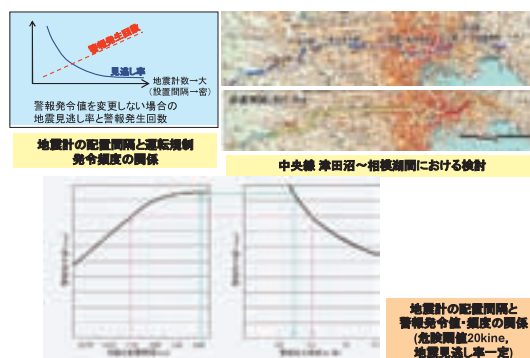
期12時間の実効雨量の関係は上図のようになっています。また、ひとつの斜面の幾つかの深さで土中水分を計測していますが、これらのうち例えば青い線、深さが60センチのところの土中水分量と実効雨量を見ますと、計3回の降雨イベントのそれぞれに対するグラフの上がり下がりやピークの位置といった応答パターンはよく一致しているということがいえます。しかしグラフ全体をマクロに見ると、実効雨量はゼロから始まってゼロへ戻る一方で、土中水は完全に乾いたところから雨が降りやんだ後も元のレベルに戻っていない。つまり、部分的に見ると合っているが、全体的に見るとあまり合っていないということがわかります。このような問題をいろいろと研究することで、より正しい雨に対する危険度指標というものがあるのではないかと考えています。

確率論的地震動予測地図の利用



地震については、現在、独立行政法人防災科学技術研究所が確率論的地震動予測地図を公開しています。これはこれまでの地震の観測データに基づいて日本全国の各地点を地震の起きやすさに応じて色分けしたもので、これにより、任意の地点について、ある大きさ以上の震度の地震に見舞われる頻度の期待値や一定期間先までにそのような地震に見舞われる確率の推定値を知ることができます。

地震計の配置間隔と運転規制発令頻度の関係



運転規制に用いる地震計についても、先ほど紹介した雨量計と同様に、なるべく細かい空間間隔で配置したほ

うが、場所の違いによる地震動の評価の精度が上がります。この性質と確率論的地震動地図の情報を利用すると、地震計を現在より高い配置間隔で設置した場合、現在実現されている安全水準を保ちながら運転規制発令の頻度をどの程度減らすことができるかについて検討することができます。たとえば中央線では、現在の地震計の配置間隔はおおむね7~8kmくらいですが、これを1kmくらいにすると、規制発令の頻度を3割程度減らすことができると推定できます。

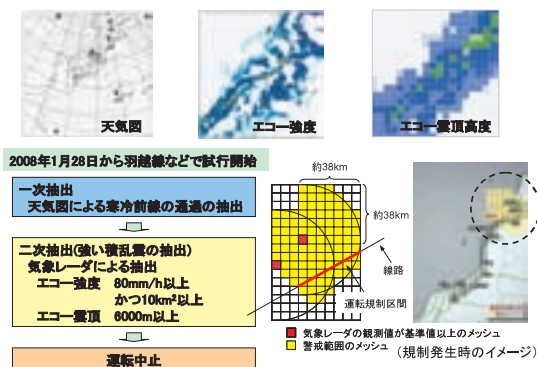
地震計に関しては、近年はいろいろな機関で観測が行われていますので、将来それぞれの機関が連携して使うことができる体制を構築することにより、お互いに高密度観測のメリットが享受できるのではないかと考えています。

4. 最新の観測、情報技術の鉄道防災への利活用

最新の観測、情報技術をこれから鉄道防災へどうやって取り入れていくか、といういまだあまりやっていなかった部分の取組みをご紹介します。

最近特にクローズアップされている災害の形態として、突風、特に竜巻やダウンバーストといったような非常にエリアが狭くて時間的にも短い局地的な気象擾乱に起因する突風による災害が増えているように思います。そのような突風は、地上にまばらな間隔で配置された風速計で捉えることはできませんし、仮にできたとしても、その時には運転規制の判断をするにはすでに手遅れということになりかねません。

気象情報による突風運転規制ルール



現在JR東日本では、羽越線の一部区間を対象として、気象庁から配信される天気図やレーダエコーの情報を活用した突風に対する列車運転規制方法を試行しています。具体的には、突風をもたらす竜巻が発生する可能性が高いと考えられるような気象の状況、すなわち積乱雲のエコーの強度と雲の高さ、それから寒冷前線の通過というイベントを組み合わせ、竜巻が起こりやすい状況にあ

るということを判断した場合に、対象エリア内の線路区間に対して警報を発して、列車の運転を規制することとしています。

ドップラーレーダーによる突風探知システムの基礎的研究

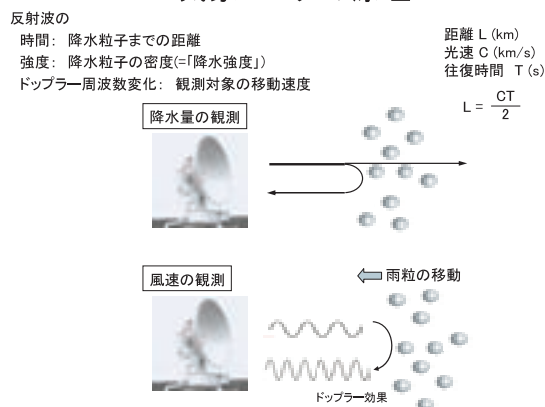


ただし、現在稼働している気象庁レーダは、本来、半径数百kmの監視エリアを対象としたマクロな気象観測を目的としたもので、竜巻やダウンバーストのようなミクロな気象現象を直接捉えることができないため、これを用いた突風警報は、警報の効率性、すなわち不必要な警報を極力出さないという要求に対して、どうしても技術的限界があります。

一方、近年では、現在の気象庁レーダより短いXバンドの波長域を用いることでより小さな監視エリア内を詳細に観測できるドップラーレーダや、さらにそれを高度化したマルチパラメータ (MP) レーダなどを用いた気象観測技術がめざましく発達してきました。

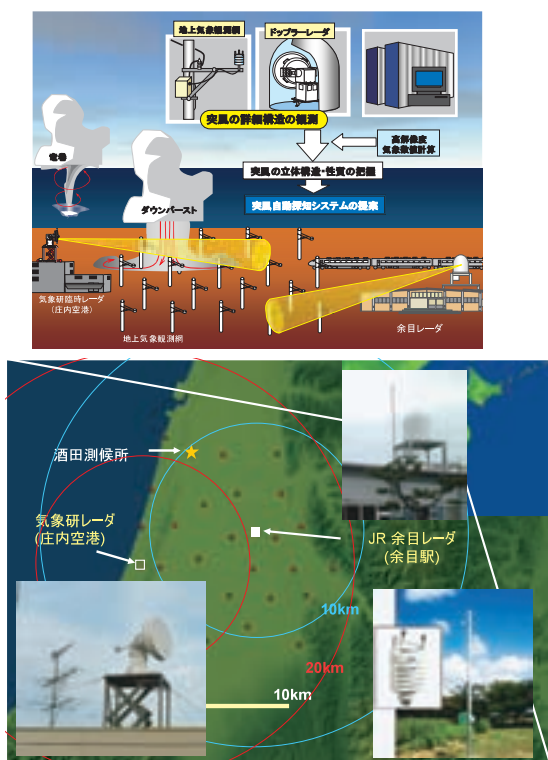
気象レーダは、アンテナから発射した電波が雲にぶつかって戻ってくる反射波の強さや戻ってくるまでの時間から雲を構成する雨粒の厚さや位置を観測しますが、ドップラーレーダでは、これに加えて、遠ざかる粒子と近づいてくる粒子で反射波の波長が変わるというドップラー効果を利用して雨粒の移動速度、つまり雨粒を移動させている雲の中の風向と風速がわかります。

気象レーダの原理



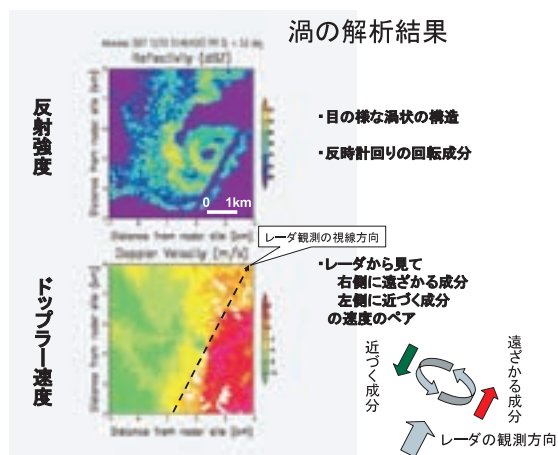
「小型ドップラー気象レーダーによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究」

独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構
気象研究所、鉄道総合技術研究所、東日本旅客鉄道、京都大学



現在JR東日本では、羽越本線余目駅にドップラーレーダーを設置し、独立行政法人鉄道・運輸施設整備支援機構の支援を受けて、気象庁気象研究所、鉄道総研、京都大学防災研究所と共同でドップラーレーダーによる突風感知システムの基礎研究を行っています。

この共同研究プロジェクトでは、JR東日本の余目駅のレーダーに加えて、気象研究所が庄内空港に設置した同じタイプのドップラーレーダー、そしてレーダーで観測した情報が地上の気象状況にどのように対応しているかを検証するために半径約10kmのエリア内に設置した26箇所の地上の観測ポイント、さらに気象研究所の気象ゾンデなどによって観測データの収集および分析を行っています。

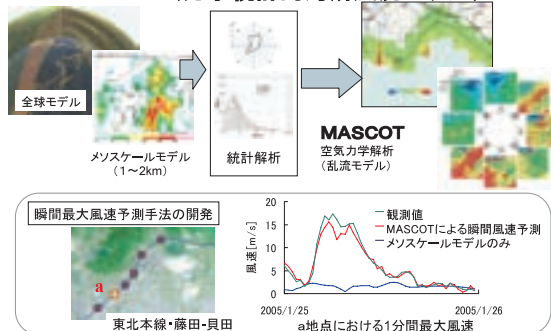


この図は、JR東日本の余目ドップラーレーダーで観測した積乱雲の運動データを解析した画像の一例です。雲の中で巻いている風の特徴である目のような渦巻き状の構造、それから半時計回りの回転成分というようなものが観測されることが確認できました。平成19年から21年度までの3カ年計画で、突風探知システムのプロトタイプ構築と実用化に向けた評価にこぎつきたいと考えています。

現在鉄道で一般的に使われている風速計や雨量計は、厳密に言うと設置された地点の気象状況しか観測できないのに対し、鉄道輸送は連続的な線路上で行われますので、本質的に連続的に観測できる計測器に対するニーズが存在します。レーダーによる気象観測技術は急速に進展しており、現在もっとも先進的な気象レーダーとされるMPレーダーでは、降雨量、とりわけゲリラ豪雨と呼ばれるような狭い雨域の雨量も正確に測定できるそうですから、風および雨に起因する災害に対してはそう遠くない将来に、従来の点観測情報に代わってレーダーによる連続観測情報に基づく列車運転規制が実現することが期待されています。

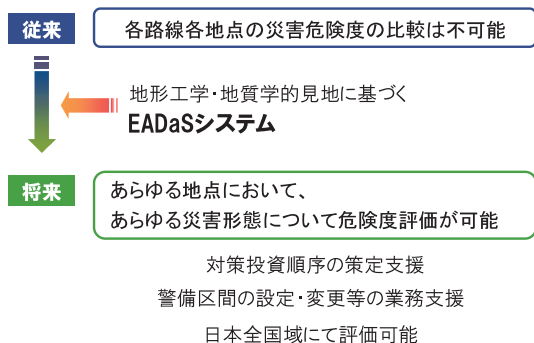
数値予測モデルの活用

・MASCOT(力学統計的局所風況モデル)



防風柵や風速計の設置箇所を決定する場合、強風の吹きやすい場所や範囲を見極めることが重要ですが、都合よくそれを判断するための風速のデータがないという場合が往々にしてあります。そのような判断を観測データなしに行うための数値予測モデルの利活用方法や有効性の検討を行っています。図は、局地的な強風が吹くことで有名な東北本線藤田・貝田間での風速観測データに基づいて東京大学で開発された、気流シミュレーションモデルMASCOTによる地点の風速時系列の推定精度を評価した結果です。このモデルは、もともと風力発電の風車の設置位置を検討するために開発されたものですが、このモデルを用いることにより、従来の一般的なメソスケールモデルと比較して線路沿線の風況の推定精度を飛躍的に高めることが可能であることが確認できました。

EADaSシステムのコンセプト



地象の観測では、刻々の観測以外に地形データをいかに活用するかということが非常に重要なテーマであり、線路のあらゆる場所において、各種の災害がどのぐらい起きやすいのかということのを定量評価する手法の開発に取り組んでいます。もともとは地形学のプロが個人的な暗黙知としてもっている専門知識を、採点方式の評価方法で客観的にだれにでも利用できる手法に翻訳することをめざしたもので、環境のE (Environment)、災害営力のA (Agent)、災害のタイプのD (Disaster)、そして (and)、鉄道の施設のS (Structure)の頭文字をとってEADaSシステムと名付けています。

評価結果①



一例を示すと、新潟県中越地震の時に上越線の榎峠トンネルで岩盤崩落が起きましたが、これを事前の情報に基づいてEADaSシステムで評価したところ、総合的な危険度評価点は14,727点でした。危険度の内訳は、岩盤崩落2,300点、地滑り2,100点、土砂崩壊2,000点であり、実際に起きたのは岩盤崩落でした。

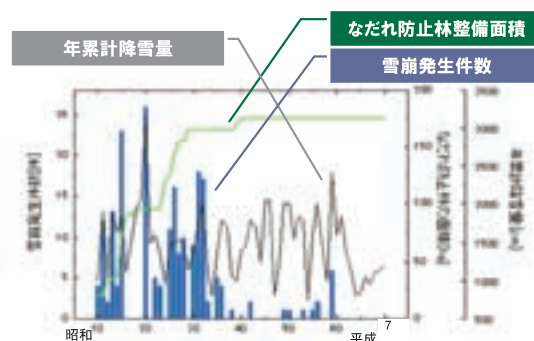
評価対照例として、JR東日本本社ビルの評価結果は247点でした。これまで、いろいろな場所のEADaSでの評価結果とその場所の災害履歴を比較することでシステムの信頼性を確認してきましたが、一般的傾向として、総合危険度評価点が3,000点以上のところで災害は発生していること、またその災害は上位3位までに含まれる災害営力に起因しているというような結果が得られています。

雪崩危険度評価



鉄道にとって厄介な災害のひとつに積雪線区沿線の斜面やのり面からの雪崩や落雪があります。2004年にも田沢湖線で列車が落雪で埋まってしまうということがありました。冬期には現場の社員はパトロールなどを行って危険な前兆の把握に努めているのですが、これはきわめて困難な業務です。防災研究所ではレーザープロファイラの技術を使って、雪の積もる前の状態と積もった後の差分データから雪崩の発生危険度を定量的に評価する研究を行っています。

雪崩発生回数となだれ防止林整備面積



一方で鉄道は雪崩に対して誇るべき防災設備を持っています。雪崩防止林がよく機能していることで、最近あまり雪崩の被害がないのだろうと考えています。例えば上越線が昭和の初めに開通したときは、特に新潟県内

なだれ防止林がなかったら…

