レーダー雨量の列車運転規制 への活用に関する研究

鈴木 博人¹・中北 英一²・高橋 日出男³

¹正会員 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
(〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479)

E-mail: h-suzuki@jreast.co.jp

²正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒606-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: nakakita@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

³首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: thideo@tmu.ac.jp

多くの鉄道では、降雨時の列車運行の安全を確保するために、約 10km 間隔で設置された雨量計で大雨を検知した場合に、運転中止や速度規制といった列車運転規制を行っている。これらの雨量計は、線路沿線の任意の地点で発生する大雨を概ね検知できている一方で、局地的大雨は大雨として検知されない場合がある。そこで、レーダー雨量を活用することで、雨量計では検知できない場合がある局地的大雨にも対応可能な列車運転規制方法の開発を進めてきた。本研究では、このような列車運転規制方法として、国土交通省解析雨量、鉄道の雨量計の観測値および降雨災害事例を用いて、列車運行の安全性と安定性の両面から評価することで、現行の雨量計による列車運転規制を継続した上で、解析雨量を補完的に用いる方法を開発した。

Key Words: : railway, train operation control, localized heavy rainfall, rain gauge, radar precipitation

1. はじめに

鉄道では、降雨に起因した土砂災害など（以下、災害とする）から列車運行の安全を確保するために、災害を発生させる恐れのある大雨が雨量計で観測された場合に、運転中止や速度規制を実施する列車運転規制を行っている^{1), 2), 3)}。列車運転規制に用いる雨量計は、多くの鉄道において積乱雲の水平方向の広がりが 10km 程度という定性的な理由から、10km 程度を標準^{1), 2), 3)}として設置されている。鉄道では、このような降雨時の列車運転規制（ソフト対策）を、防災設備による耐降雨性能の向上（ハード対策）と併せて行うことで、降雨に起因した列車脱線事故を大幅に減少させてきた⁴⁾。

鈴木・大島⁵⁾は、雨量計の設置間隔が約 10km の鉄道について、国土交通省（以下、国交省とする）解析雨量を用いて雨量計地点と災害発生地点における降雨量の差異を調べた。これによると、多くの災害事例において両者の降雨量に大きな差がみられない。これから、鉄道の雨量計は線路沿線の任意地点にお

ける災害を発生させるような大雨を概ね検知できていると考えられる。一方で、事例数は少ないものの、隣接する雨量計と雨量計の間に大雨域が収まるような場合には、災害を発生させるような大雨であったとしても、雨量計では大雨として観測されないことがある。つまり、事例数は少ないものの、雨量計と大雨域の位置関係によっては、雨量計で災害を発生させるような大雨を検知できない場合がある。

2008 年 7 月の兵庫県の都賀川や同年 8 月の東京都の雑司ヶ谷で発生した水難事故は、局地的大雨、いわゆるゲリラ豪雨によってもたらされたものである。中北ほか⁶⁾は、ゲリラ豪雨のスケールを、空間スケールで 10km 以下、時間スケールで 1 時間以内としている。このような空間スケールのゲリラ豪雨は、約 10km 間隔で設置された鉄道の雨量計では検知されない可能性のある大雨の典型例といえる。台風などによる大雨も含んでいるが、近年、日本では 1 時間雨量が 50mm や 80mm を超える大雨が増加傾向にある⁷⁾。今後も、このような大雨が増加するといわれており⁸⁾、局地的大雨が増加すれば、鉄道の雨量

図-1 雨量計の配置とその受持ち区間の模式図

計では検知されない大雨が増加する恐れがある。東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本とする）の路線では、現在までのところ、局地的大雨による重大な事故は発生していない。しかし、今後、局地的大雨が増加するならば、局地的大雨に対する対策を講じておくことが重要と考えている。

一方で、降雨量の観測に目を向けると、近年、レーダー雨量の整備が進んでいる。国交省解析雨量では、日本全国の約 1km メッシュの降水量を 2006 年から配信している。また、国交省 XRAIN では、2011 年から地域が限定されるものの X バンド MP レーダーによる 250m メッシュの降水量が配信されている。さらに、2016 年 7 月から C バンド MP レーダーも利用することで日本全国の 250m メッシュの降水量が配信されるようになった。これらのレーダー雨量は、雨量計が離散的な降雨量の情報であるのに対して、面的な降水量の情報である。そのため、レーダー雨量は、ゲリラ豪雨などの局地的大雨を検知するのに有効である。

本研究の目的は、降雨時の列車運行の安全をより向上するために、鉄道の雨量計では検知できない場合がある局地的大雨にも対応可能な列車運転規制方法を開発することである。このような目的のためには、面的な降水量の情報であるレーダー雨量を活用するのが有効と考えられる。そこで、本研究では日本全国の約 1km メッシュの降水量を得ることのできる国交省解析雨量、JR 東日本の雨量計の観測値と降雨災害事例を用いて、上記の目的に合致した降雨時の列車運転規制方法について解析を行った。その上で、鉄道の雨量計では検知できない場合がある局地的大雨にも対応可能な降雨時の列車運転規制方法を提案する。

2. 資料

(1) 降雨量データ

降雨量データは、国交省解析雨量と JR 東日本の雨量計の観測値を用いた。解析雨量は、国交省と気象庁が全国に設置している気象レーダーの観測値を国

交省、気象庁、および都道府県などの雨量計の観測値で校正した降水量の推定値で、2006 年以降、日本全国の約 1km メッシュの 1 時間降水量を得ることができる。解析雨量は毎正時 0 分と 30 分の前 1 時間降水量が配信されているが、本研究では正時の値を用いた。これは、30 分の解析雨量は正時の解析雨量に比べて、気象レーダーの観測値の校正に利用できる地方自治体等の雨量計の数が少ないために降水量の推定精度が低く、両者の精度に差があるためである。なお、解析雨量は解析雨量 CD-ROM/DVD から入手した。また、JR 東日本の雨量計は、1 回の転倒が 0.5mm の転倒ます型雨量計である。雨量計の観測値は、1991 年から 5 分ごと⁹⁾、2008 年から 1 分ごとに 1mm 単位の 1 時間雨量などが保存されている。雨量計の観測値は、解析雨量と同様に、正時の 1 時間雨量を用いた。なお、解析の対象期間は、両者の降雨量データがそろそろ 2006 年から 2013 年とした。

(2) 降雨災害データ

降雨災害データは、JR 東日本の在来線で、3 (2) 節に示す運転中止のある区間および速度規制までの区間において、2006 年から 2013 年に降雨に起因して発生し、かつ列車運行に影響を及ぼした 292 件の災害事例のデータを用いた。ここで、降雨に起因した災害とは、災害発生時に災害発生地点を受持つ雨量計において 1mm 以上の降雨がみられた災害とした。このように定義したのは、降雨量が小さい事例については降雨との因果関係がはっきりしないものも含まれるが、雨量計地点では降雨量が小さいが災害発生地点では降雨量が大きい事例がある可能性があるためである。

3. 列車運転規制方法と課題

(1) 雨量計の設置間隔と受持ち区間

鉄道では、雨量計で観測される降雨量が運転規制基準値以上になった場合に、その雨量計の受持ち区間に対して列車運転規制が実施される。多くの鉄道において、雨量計は駅などに設置され、その設置間隔は 10km 程度を標準としている^{1), 2), 3)}。雨量計の受持ち区間は、図-1 のように、駅を区切りとしている場合がほとんどで、数駅間を受持っている場合が多い。また、雨量計の受持ち区間は、雨量計の設置地点（駅など）の両側の場合が多いが、片側の場合や重複している場合がある。JR 東日本の在来線において、2014 年 1 月 1 日時点で、受持ち区間が隣接する雨量計の設置間隔の平均値は 9.1km、標準偏差は

図-2 運転規制区分の例

図-3 2006年から2013年に発生した災害の災害種別ごとの件数。図中の数字は、それぞれの発生件数

2.6kmである⁵⁾。また、雨量計の受持ち区間の平均値は5.0km、標準偏差は1.9kmである⁵⁾。

(2) 運転規制区分

JR 東日本における降雨時の列車運転規制は、線路設備の防災強度に応じて、運転中止のある区間、速度規制までの区間、列車運転規制を行わない区間に分けられる。列車運転規制を行わない区間は、高架橋、トンネル、および平地部の素地路盤などの降雨による土砂崩壊の恐れがほとんどない構造からなる区間である。速度規制までの区間は、過去の災害歴や防災設備の整備状況などから、大規模な崩壊の恐れがない区間である。運転中止のある区間は、前述の区間を除く全ての区間である¹⁾。

運転規制区分の例を図-2に示す。例えば、小海線などの地方交通線の全線とほとんどの地方幹線は運転中止のある区間である。また、山形新幹線(奥羽本線)や秋田新幹線(田沢湖線・奥羽本線)などの一部の地方幹線では、運転中止のある区間、速度規制までの区間、列車運転規制を行わない区間が混在する。山手線などの首都圏の路線は、ほとんどが素地路盤や高架橋で構成されている。そのため、一部の盛土や切取が存在する箇所では速度規制が行われているが、ほとんどが列車運転規制を行わない区間である。なお、2015年4月1日時点におけるJR 東日本

表-1 2006年から2013年に発生した災害の運転規制区分ごとの件数

	運転中止中	速度規制中	警戒中	平常運転中	合計
運転中止のある区間	230	25	20	14	289
速度規制までの区間	—	2	0	1	3

の在来線の営業キロは6,263.1kmで、そのうち運転中止のある区間が74%、速度規制までの区間が11%、列車運転規制を行わない区間が15%である。

降雨時の列車運転規制は、雨量計で観測される降雨量が多くなるのに従って、平常運転から、警戒、速度規制、運転中止となる。運転中止は列車の運行停止、速度規制は旅客列車が35km/h、貨物列車が25km/hの徐行運転、警戒では列車運転規制は実施しないが保守係員が線路設備の点検を実施する¹⁾。

(3) 列車運転規制の雨量指標

JR 東日本の降雨時の列車運転規制では、雨量指標に半減期1.5, 6, 24時間実効雨量が用いられている¹⁰⁾。運転中止、速度規制、および警戒といった運転規制基準値は、雨量計の受持ち区間ごと、つまり運転規制区間ごとに定められており、これらの値は区間ごとに異なっている。JR 東日本における運転中止基準値の平均値は、2015年1月1日時点の値で、半減期1.5, 6, 24時間実効雨量がそれぞれ40.9, 80.8, 146.2mm、速度規制基準値が34.3, 69.9, 131.3mmである。

実効雨量は、指数関数を用いて降雨の浸透・貯留過程を表現しようとする雨量指標で、1つの流出孔をもつ1段のタンクモデルともいえる。実効雨量は、降雨の効果が降雨後の時間の経過とともに減少し、各時の効果の総和が、その時点の降雨の影響(=危険度)を示すとしている。 T 時における実効雨量値 $D(T)$ は、1時間前の実効雨量値を $D(T-1)$ 、 T 時における1時間雨量を $R(T)$ 、半減期を M 、減少係数を α とすると、

$$D(T) = D(T-1)e^{\alpha} + R(T)e^{\frac{\alpha}{2}} \quad (1a)$$

$$M = \frac{\ln 0.5}{\alpha} \quad (1b)$$

で推定される¹¹⁾。

また、1時間雨量が欠測の場合については、寺田・中谷¹²⁾において、実効雨量では減少係数 α の累乗が約0.004未満になると実効雨量値へ影響が少ないことが多いとしており、これから本研究ではこのよう

図-4 災害発生時における雨量計地点と災害発生地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値の関係（鈴木・大島⁵⁾より）。図中の記号は災害発生時の運転規制区分、実線は両者の実効雨量値が1対1になる値、点線は運転中止基準値の平均値。

になる時間までの実効雨量値を欠測とした。この時間は、半減期 1.5, 6, 24 時間実効雨量で、それぞれ 12, 48, 192 時間である。

(4) 列車運転規制の発令と解除

列車運転規制は、半減期 1.5, 6, 24 時間実効雨量のいずれかの値が運転規制基準値以上になった場合に発令される。運転中止が発令された場合には、全ての実効雨量値が運転中止基準値を下回った後に、運転中止になった全区間に対して保守係員が徒歩などによる線路設備の点検を実施して、異常のないことが確認できた場合に解除される。また、速度規制が発令された場合は、全ての実効雨量値が速度規制基準値を下回った後に、速度規制となった全区間において列車の通過などによって異常がないことが確認できた場合に解除される¹⁾。

(5) 降雨災害の内訳

災害事例は、JR 東日本の在来線において、2006 年から 2013 年に運転中止のある区間で発生した 289 件と、速度規制までの区間で発生した 3 件の合計 292 件を用いた。これらは、災害発生時の雨量値を災害の発生地点を受持つ区間の運転規制基準値と照らし合せて、運転中止、速度規制、および警戒発令中と、平常運転中に発生した災害に 4 分類して表-1 に示した。なお、運転規制基準値は、実効雨量による 2015 年 1 月 1 日時点の基準値を用いた。

災害発生時の雨量値は、鈴木・大島⁵⁾と同様に以下のように求めた。災害発生時刻は分からないのが一般的で、記録に残るのはほとんどの場合が災害発見時刻である。運転中止発令中に発生した災害は、雨量計で観測される雨量値が運転中止基準値を下回っ

た後に、運転中止となった区間に対して実施する線路設備の点検で保守係員が発見するのが一般的である。そのため、運転中止が発令されてから点検で発見されるまでの期間に発生したと考えられる。そこで、運転中止発令中に発生した災害は、その期間における最大雨量値を災害発生時の雨量値とした。また、運転中止発令前に発生した災害については、雨の降り始めから災害の発見時刻までの最大雨量値を災害発生時の雨量値とした。

図-3 には、2006 年から 2013 年に運転中止のある区間で発生した 289 件の災害と、速度規制までの区間で発生した 3 件の災害について、その災害種別を示した。図-3 によると、運転中止のある区間で発生した災害は、52% が切取・自然斜面崩壊、30% が盛土崩壊で、8 割以上が土砂災害である。一方で、速度規制までの区間で発生した災害は、全てが線路冠水である。さらに、図-3 には運転中止発令前に発生した 59 件の災害について、その災害種別を示した。図-3 によると、運転中止発令前に発生した災害は、運転中止のある区間で発生した全ての災害の場合に比べて、土砂災害の割合が減少して、道床流出や線路冠水の割合が増加する。

(6) 雨量計による降雨量観測の課題

鈴木・大島⁵⁾は、雨量計の設置間隔が約 10km の鉄道について、JR 東日本の運転中止のある区間において 2006 年から 2013 年に発生した 289 件の災害事例と解析雨量を用いて、雨量計地点と災害発生地点の実効雨量値の差異を調べた。図-4 には、災害発生時における雨量計地点と災害発生地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値の関係を示した。なお、図-4 では災害発生時の運転規制区分を運転中止、

図-5 隣接する雨量計と雨量計の間で発生した大雨による災害発生時の解析雨量（1時間雨量）（鈴木・大島⁵⁾より）。左図は2006年4月12日の内房線富浦・那古船形間における切取崩壊発生時（前線による線状の大雨）、右図は2013年6月25日の磐越西線郡山・喜久田間における線路冠水発生時（雷雨による局地的大雨）の解析雨量。

図-6 解析雨量のメッシュと雨量計、災害発生地点、線路との関係の模式図

速度規制、および警戒発令中と、平常運転中に区分して示した。図-4によると、災害発生時における両者の実効雨量値の関係を表す点は1対1の直線の近くに分布する場合が多くみられ、多くの災害事例において両者の実効雨量値に大きな差がみられない。これから、鉄道の雨量計は線路沿線の任意の地点における災害を発生させるような大雨を概ね検知できていると考えられる。一方で、事例数は少ないものの、災害発生地点の実効雨量値が雨量計地点に比べて数倍大きくなる場合がある。このような事例は、鈴木・大島⁵⁾によると、図-5のように隣接する雨量計と雨量計の間に線状の大雨域や局地的な大雨域が収まるような場合である。このような場合には、災害を発生させるような大雨であったとしても、雨量計では大雨として観測されないことがある。つまり、事例数は少ないものの、雨量計と大雨域の位置関係によっては、雨量計では災害を発生させるような大雨を検知できない場合がある。

そのため、降雨時の列車運行の安全をより向上させるためには、設置間隔が約10kmの鉄道の雨量計では検知できない場合がある局地的大雨にも対応可

能な降雨時の列車運転規制方法を開発することが課題の一つである。

4. 解析雨量を活用した列車運転規制方法

鉄道の雨量計では検知できない場合がある局地的大雨にも対応可能な降雨時の列車運転規制方法として、解析雨量を活用した方法について検討する。この方法は、降雨時の列車運転規制に、図-6に網掛けと塗りつぶして示したような線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量を用いる方法である。

(1) 解析対象区間と運転規制区分

解析は、運転中止のある区間および速度規制までの区間を対象にした。なお、図-2に示した山手線のような駅間の一部の箇所のみで速度規制を実施する区間は対象としない。

解析は、図-2に示した小海線のように線路延長の短い路線は、全区間を1区間として行った。このような路線には、例えば飯山線、米坂線、花輪線などの地方交通線が該当する。線路延長が長く、直通運転がほとんどない羽越本線、上越線、および磐越西線などの地方幹線や地方交通線などの路線は、区間運転の区間で分割することとした。例えば、図-2に示した羽越本線では、新津・新発田間、新潟・村上間（新潟・新発田間は白新線であるが新潟・村上間を直通する列車が多いことから1区間とした）、村上・酒田間、および酒田・秋田間をそれぞれ1区間とした。また、図-2に示した奥羽本線の山形新幹線区間のように運転規制区分の異なる区間が混在する場合は、区間運転の区間で分割した上で、運転中止のある区間と速度規制のある区間をそれぞれ1区間とした。山形新幹線区間では、区間運転の区間として福島・米沢間、米沢・山形間、および山形・新庄間に区分し

表-2 降雨時の列車運転規制方法の内容

列車運転規制方法	列車運転規制方法の内容
雨量計による列車運転規制	約 10km 間隔で設置された雨量計による実効雨量値が運転規制基準値以上になった場合に、その雨量計の受持ち区間に対して列車運転規制を実施。
解析雨量による列車運転規制	線路を含む約 1km メッシュの解析雨量による実効雨量値が現行の雨量計による運転規制基準値以上になった場合に、そのメッシュの両側の駅までの区間に対して列車運転規制を実施。
解析雨量を補完的に用いる列車運転規制	雨量計による列車運転規制に追加して、雨量計による列車運転規制が実施されていないときに、線路を含む約 1km メッシュの解析雨量による 1 時間雨量が運転規制基準値以上になった場合に、そのメッシュの両側の駅までの区間に対して列車運転規制を実施。

た上で、運転中止のある区間は庭坂・関根間、赤湯・かみのやま温泉間、および芦沢・新庄間に区分した。また、速度規制のある区間は庭坂・米沢間、米沢・山形間、および山形・新庄間に区分した。このようにして区分した区間数は、運転中止のある区間が 73 区間、速度規制のある区間が 82 区間である。

解析は、運転中止の場合と速度規制以上の場合に区分して行った。運転中止の場合は、運転中止のある区間を対象に、運転中止基準値を基に解析した。速度規制以上の場合とは、運転中止または速度規制の場合で、運転中止のある区間と速度規制までの区間を対象に、速度規制基準値を基に解析した。

(2) 評価方法

鉄道において自然災害に対する列車運転規制を行う際の基本は、自然外力により被る危険を十分に回避（安全の確保）した上で、列車の正常な運行を可能な限り確保（安定性の確保）することである¹³⁾。そこで、雨量計による列車運転規制方法と解析雨量を活用した列車運転規制方法について、列車運行の安全性と安定性の両面から評価することにした。

安全性は、列車運転規制方法と運転規制基準値を定めた場合に、災害発生時における雨量値が運転規制基準値以上になる災害件数で評価する。これを災害捕捉数とする。雨量計による列車運転規制では、災害発生時に、災害発生地点を受持つ雨量計の雨量値が運転規制基準値以上の場合に、災害を捕捉したとする。解析雨量を活用した列車運転規制では、以下の場合に災害を捕捉したとする。降雨時の列車運転規制は、3 (1) 節で述べたように一般的に駅間で実施される。このため、ある駅間における線路を含むいずれかのメッシュの雨量値が運転規制基準値以上であれば、その駅間において列車運転規制が実施されることになる。これから、災害発生時に、災害発生地点から両側の駅までの区間（災害発生区間）における線路を含むメッシュの最大雨量値が運転規制基準値以上であれば、災害を捕捉したとする。ここで、運転規制基準値を運転中止基準値とした場合が

運転中止の場合の災害捕捉数、速度規制基準値とした場合が速度規制以上の場合の災害捕捉数である。

安定性は、列車運転規制方法と運転規制基準値を定めた場合に、雨量値が運転規制基準値以上になる時間数で評価する。これを運転規制時間とする。鉄道では、区間内のどこかで列車運転規制が発令されると、その区間全体の列車運行に影響を及ぼすのが一般的である。そこで、運転規制時間は、区間内のいずれかの雨量計または線路を含むメッシュの解析雨量による雨量値が運転規制基準値以上になる時間数とする。ただし、実際の運転規制時間は、3 (4) 節で述べたように、本研究で定義する時間数に、線路設備に異常のないことを確認するのに要する時間を加えた時間数である。ここで、運転規制基準値を運転中止基準値とした場合が運転中止時間、速度規制基準値とした場合が速度規制以上時間である。

(3) 列車運転規制方法と評価手順

雨量計による列車運転規制は、現行の降雨時の列車運転規制方法で、現行の約 10km 間隔で設置された雨量計による実効雨量値と現行の雨量計による運転規制基準値を用いる方法である。解析雨量による列車運転規制は、列車運転規制に用いる雨量値を雨量計の観測値から解析雨量に置き換えた方法で、線路を含む全ての約 1km メッシュの解析雨量による実効雨量値と現行の雨量計による運転規制基準値を用いる方法である。また、解析雨量を補完的に用いる列車運転規制は、現行の雨量計による列車運転規制を継続した上で、解析雨量による 1 時間雨量に基準値を設けて列車運転規制を実施する方法である。これらの列車運転規制方法は、表-2 にまとめて示した。なお、現行の雨量計による運転規制基準値とは、実効雨量による 2015 年 1 月 1 日時点の基準値とする。

列車運転規制方法の評価は、最初に雨量計による方法と解析雨量による方法とについて、安全性の指標である災害捕捉数と安定性の指標である運転規制時間で比較する。次に、雨量計による方法と解析雨量を補完的に用いる方法とについて比較する。

表-3 運転中止と速度規制以上の場合の雨量計による観測値と解析雨量を用いた場合の災害捕捉数。解析雨量による災害捕捉数は、雨量計地点を含むメッシュ、災害発生地点を含むメッシュ、災害発生地点から両側の駅までの区間（災害発生区間）における全てのメッシュを用いた場合を示した。また、解析雨量による災害捕捉数には、雨量計による列車運転規制における運転規制区分の内訳を示した。

利用する雨量値		運転中止の場合の災害捕捉数					速度規制以上の場合の災害捕捉数			
		合計	雨量計による列車運転規制での運転規制区分				合計	雨量計による列車運転規制での運転規制区分		
			運転中止	速度規制	警戒	平常運転		速度規制以上	警戒	平常運転
雨量計		230	230	—	—	—	257	257	—	—
解析雨量	雨量計地点	217	214	3	0	0	251	246	5	0
	災害発生地点	222	209	7	3	3	257	244	9	4
	災害発生区間	232	214	8	6	4	264	247	12	5

(4) 雨量計による列車運転規制

現行の雨量計による列車運転規制方法について、最初に評価する。雨量計による列車運転規制は、図-6に示したような約10km間隔で離散的に配置された雨量計による実効雨量値と現行の雨量計による運転規制基準値を用いる方法である。

a) 安全性の評価

安全性の評価には、JR東日本において2006年から2013年に運転中止のある区間および速度規制までの区間で発生した292件の災害事例を用いた。

雨量計による列車運転規制の災害捕捉数は、災害発生時に災害発生地点を受持つ雨量計の実効雨量値が運転規制基準値以上の災害件数である。運転中止の場合の災害捕捉数は、表-1から230件である。また、速度規制以上の場合の災害捕捉数は、運転中止のある区間において運転中止または速度規制発令中に発生した255件と、速度規制までの区間において速度規制発令中に発生した2件の合計257件である。雨量計による列車運転規制の災害捕捉数は、表-3の雨量計の欄に運転中止と速度規制以上の場合に区分して示した。

b) 安定性の評価

安定性の評価には、2008年を除く2006年から2013年の降雨量データを用いた。これは、2008年にJR東日本の気象観測・警報システム⁹⁾の改修が行われたために、雨量計の観測値が保存されていない期間が他の年に比べて多いためである。なお、雨量計による列車運転規制の運転規制時間を算出するにあたって、雨量計の観測値が欠測の場合には、雨量計地点を含むメッシュの解析雨量を用いて算出した。また、運転中止の場合が73区間、速度規制以上の場合が82区間が対象である。

雨量計による列車運転規制の運転規制時間は、対象区間において、それぞれの区間内のいずれかの雨量計による実効雨量値が運転規制基準値以上の1年あたりの時間数である。対象区間における1年あた

りの運転中止時間と速度規制以上時間の平均値は、それぞれ9.4時間/年と18.0時間/年であった。

(5) 解析雨量による列車運転規制

解析雨量による列車運転規制は、局地的大雨にも対応できるように図-6に網掛けと塗りつぶしで示したような線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量による実効雨量値を用いる方法である。この場合の運転規制基準値は、雨量計による列車運転規制の運転規制区間（雨量計の受持ち区間）ごとに、現行の雨量計による運転規制基準値を用いる。

a) 安全性の評価

安全性の評価には、4(4)a)項と同様に、JR東日本において2006年から2013年に運転中止のある区間および速度規制までの区間で発生した292件の災害事例を用いた。

解析雨量による列車運転規制の災害捕捉数は、災害発生時に災害発生地点から両側の駅までの区間（災害発生区間）における線路を含むメッシュの最大実効雨量値が運転規制基準値以上の災害件数である。災害捕捉数は、列車運転規制に雨量計地点を含むメッシュの解析雨量を用いた場合、災害発生地点を含むメッシュの解析雨量を用いた場合、最後に線路を含む全てのメッシュの解析雨量を用いた場合の順序で調べた。

最初に、列車運転規制に雨量計地点を含むメッシュ（図-6の雨量計地点を含む塗りつぶしのメッシュ）の解析雨量を用いた場合の災害捕捉数を求めた。これは、災害発生時に、雨量計地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値が運転規制基準値以上の災害件数である。図-7には、図-4と同様に災害発生時における雨量計の観測値と雨量計地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値の関係を示した。図-7によると、災害発生時における両者の実効雨量値の関係を表す点は、ばらつきがみられるものの1対1の直線の近くに分布する。

図-7 災害発生時における雨量計の観測値と雨量計地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値の関係。図中の記号は災害発生時の運転規制区分、実線は両者の実効雨量値が1対1になる値、点線は運転中止基準値の平均値。

図-8 災害発生時における雨量計の観測値と災害発生地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値の関係。図中の記号は災害発生時の運転規制区分、実線は両者の実効雨量値が1対1になる値、点線は運転中止基準値の平均値。

この場合の災害捕捉数は、運転中止の場合が217件、速度規制以上の場合が251件である。このように、雨量計地点を含むメッシュの解析雨量を用いた場合は、雨量計による列車運転規制に比べて災害捕捉数が減少する。表-3の解析雨量（雨量計地点）の欄には、運転中止と速度規制以上の場合に区分して、この場合の災害捕捉数を示した。また、雨量計による列車運転規制での運転規制区分を内訳として示した。雨量計地点を含むメッシュの解析雨量を用いると、運転中止の場合には、雨量計による列車運転規制では運転中止発令前に発生した災害のうち3件（全て速度規制発令中）が、運転中止発令中に発生することになる。一方で、雨量計による列車運転規制では運転中止発令中に発生した災害のうち16件が、運転中止発令前に発生することになる。また、速度規制以上の場合には、雨量計による列車運転規制では速度規制発令前に発生した災害のうち5件（全て

警戒発令中）が、速度規制以上の発令中に発生することになる。一方で、雨量計による列車運転規制では速度規制以上の発令中に発生した11件が、速度規制発令前に発生することになる。

次に、列車運転規制に災害発生地点を含むメッシュ（図-6の災害発生地点を含む濃い網掛けのメッシュ）の解析雨量を用いた場合の災害捕捉数を求めた。これは、災害発生時に、災害発生地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値が運転規制基準値以上の災害件数である。図-8には、図-4と同様に災害発生時における雨量計の観測値と災害発生地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値の関係を示した。図-8によると、両者の関係を表す点はばらつきがみられるものの1対1の直線の近くに分布するケースが多くみられる。一方で、運転中止発令前に発生した災害には災害発生地点の実効雨量値が雨量計に比べて数倍大きいケースがみられる。これらは、

図-9 災害発生時における雨量計の観測値による実効雨量値と災害発生地点から両側の駅までの区間（災害発生区間）における線路を含むメッシュの解析雨量による最大実効雨量値との関係。図中の記号は災害発生時の運転規制区分、実線は両者の実効雨量値が1対1になる値、点線は運転中止基準値の平均値。

列車運転規制に災害発生地点を含むメッシュの解析雨量を用いると、災害を捕捉できるようになる典型的な例である。

この場合の災害捕捉数は、運転中止の場合が222件、速度規制以上の場合が257件である。このように、災害捕捉数は、雨量計地点を含むメッシュの解析雨量を用いた場合に比べて増加するが、雨量計による場合と同等または以下である。表-3の解析雨量（災害発生地点）の欄には、この場合の災害捕捉数を示すとともに、雨量計による列車運転規制での運転規制区分を内訳として示した。災害発生地点を含むメッシュの解析雨量を用いると、運転中止の場合には、雨量計による列車運転規制では運転中止発令前に発生した災害のうち13件（速度規制発令中が7件、警戒発令中が3件、平常運転中が3件）が、運転中止発令中に発生することになる。一方で、雨量計による列車運転規制では運転中止発令中に発生した災害のうち21件が、運転中止発令前に発生することになる。また、速度規制以上の場合には、雨量計による列車運転規制では速度規制発令前に発生した災害のうち13件（警戒発令中が9件、平常運転中が4件）が、速度規制以上の発令中に発生することになる。一方で、雨量計による列車運転規制では速度規制以上の発令中に発生した13件が、速度規制発令前に発生することになる。

最後に、列車運転規制に線路を含む全てのメッシュ（図-6の網掛けと塗りつぶしの全てのメッシュ）の解析雨量を用いた場合、つまり解析雨量による列車運転規制の災害捕捉数を求めた。災害捕捉数は、災害発生時に、災害発生地点から両側の駅までの区間（災害発生区間）における線路を含むメッシュの

解析雨量による最大実効雨量値が運転規制基準値以上の災害件数である。図-9には、図-4と同様に災害発生時における雨量計の観測値による実効雨量値と災害発生地点から両側の駅までの区間（災害発生区間）における線路を含むメッシュの解析雨量による最大実効雨量値との関係を示した。図-9は、図-8と同様の傾向にあるが、災害発生地点の解析雨量のみを用いる場合に比べて解析雨量のメッシュ数が増加するために、実効雨量値が同値以上の値を示す。

この場合の災害捕捉数は、運転中止の場合が232件、速度規制の場合が264件である。このように、災害捕捉数は、雨量計地点や災害発生地点を含むメッシュの解析雨量を用いた場合に比べて増加する。しかし、雨量計による列車運転規制に比べて、災害捕捉数は運転中止の場合が2件の増加で、増加数はわずかである。表-3の解析雨量（災害発生区間）の欄には、この場合の災害捕捉数を示すとともに、雨量計による列車運転規制での運転規制区分を内訳として示した。線路を含む全てのメッシュの解析雨量を用いると、運転中止の場合には、雨量計による列車運転規制では運転中止発令前に発生した災害のうち18件（速度規制発令中が8件、警戒発令中が6件、平常運転中が4件）が、運転中止発令中に発生することになる。一方で、雨量計による列車運転規制では運転中止発令中に発生した災害のうち16件が、運転中止発令前に発生することになる。また、速度規制以上の場合には、雨量計による列車運転規制では速度規制発令前に発生した災害のうち17件（警戒発令中が12件、平常運転中が5件）が、速度規制以上の発令中に発生することになる。一方で、雨量計による列車運転規制では

図-10 雨量計と解析雨量による列車運転規制の運転中止時間（左）および速度規制以上時間（右）の区間ごとの関係

表-4 雨量計および解析雨量による列車運転規制、解析雨量を補完的に用いる列車運転規制の基準値ごとの災害捕捉数、列車運転規制時間（時間/年）、およびそれらの比。網掛けは、雨量計による列車運転規制の比より大きい場合。

		現在の運転規制基準値の場合		雨量計による運転規制を継続した上で、下記を基準値とする解析雨量による1時間雨量を補完的に用いる運転規制の場合							
		雨量計	解析雨量	30mm	40mm	50mm	60mm	70mm	80mm	90mm	100mm
運転中止	災害捕捉数(件) (B)	230	232	252	241	235	234	234	234	231	231
	追加災害捕捉数(件)	—	—	22(17)	11(7)	5(5)	4(4)	4(4)	4(3)	1(1)	1(0)
	運転中止時間(時間/年) (C)	9.411	13.886	14.411	10.840	9.832	9.534	9.448	9.434	9.417	9.415
	追加運転中止時間(時間/年)	—	—	5.000	1.429	0.421	0.123	0.037	0.023	0.006	0.004
	B/C	24.440	16.707	17.487	22.233	23.902	24.543	24.767	24.803	24.531	24.536
速度規制	災害捕捉数(件) (B)	257	264	269	264	262	261	261	261	258	258
	追加災害捕捉数(件)	—	—	12(8)	7(5)	5(5)	4(4)	4(4)	4(3)	1(1)	1(0)
	速度規制以上時間(時間/年) (C)	17.970	26.676	22.148	19.044	18.295	18.067	17.996	17.987	17.976	17.974
	追加速度規制以上時間(時間/年)	—	—	4.178	1.073	0.325	0.097	0.025	0.016	0.005	0.004
	B/C	14.301	9.897	12.146	13.863	14.321	14.446	14.503	14.511	14.353	14.354

速度規制以上の発令中に発生した10件が、速度規制発令前に発生することになる。

b) 安定性の評価

安定性の評価には、4(4)b)項と同様に、2008年を除く2006年から2013年の降雨量データを用いた。また、運転中止の場合が73区間、速度規制以上の場合が82区間が対象である。

解析雨量による列車運転規制の運転規制時間は、対象区間内の線路を含むメッシュのいずれかにおいて、解析雨量による実効雨量値が運転規制基準値以上の1年あたりの時間数である。図-10には、雨量計と解析雨量による列車運転規制における区間ごとの1年あたりの運転中止時間および速度規制以上時間の関係を示した。図-10によると、運転規制時間は区間によって異なるが直線の近くに分布する。また、運転中止時間と速度規制以上時間の対象区間における1年あたりの平均値は、それぞれ13.9時間/年と26.7時間/年である。このように、解析雨量による列車運転規制の運転規制時間は、雨量計による場合の約1.5倍になる。なお、運転規制時間が区間によって異なるのは、運転規制基準値とその区間に

おける降雨量の関係や、区間の延長によって雨量計の設置数や解析雨量のメッシュ数が異なることなどによると考えられる。

c) 総合評価

表-4には、雨量計および解析雨量による列車運転規制について、運転中止と速度規制以上の場合における災害捕捉数と運転規制時間の1年あたりの平均値を示した。ここで、安全性の指標である災害捕捉数(B)を便益、安定性の指標である運転規制時間(C)を費用と考えると、運転規制時間に対する災害捕捉数の比(B/C)が大きいほど効率的な列車運転規制方法といえる。災害捕捉数は2006年から2013年の合計、運転規制時間は2008年を除く2006年から2013年の1年あたりの平均値である。そのため、この比は運転規制時間あたりの災害捕捉数とはならないが、これと同様のことを表す指標と考えられる。

この比は、運転中止および速度規制以上の場合ともに、雨量計による列車運転規制が解析雨量による列車運転規制の約1.5倍である。これから、雨量計による列車運転規制は、解析雨量による列車運転規制に比べて効率的である。これは、解析雨量による

図-11 災害発生時における雨量計による1時間雨量と災害発生地点を含むメッシュの解析雨量による1時間雨量との関係(左), および災害発生地点から両側の駅までの区間(災害発生区間)における線路を含むメッシュの解析雨量による最大1時間雨量との関係(右). 図中の記号は災害発生時の運転規制区分, 実線は両者の実効雨量値が1対1になる値.

列車運転規制が雨量計による列車運転規制に比べて, 災害捕捉数がわずかしかな増加しない一方で, 運転規制時間が約1.5倍に増加するためである.

局地的大雨にも対応可能な列車運転方法として, 線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量による実効雨量値と現行の雨量計による運転規制基準値を用いる方法について検討した. 列車運行の安全性と安定性の両面から評価すると, この方法に比べて, 現行の約10km間隔で設置された雨量計による実効雨量値と現行の雨量計による運転規制基準値を用いる方法は効率的である.

(6) 解析雨量を補完的に用いる列車運転規制

現行の雨量計による列車運転規制方法は, 列車運行の安全性と安定性の両面から評価すると, 解析雨量による列車運転規制方法に比べて効率的であった. さらに, 約10km間隔で設置された雨量計は, 線路沿線の任意の地点における災害を発生させるような大雨を概ね検知できていると考えられる. これから, 現行の雨量計による列車運転規制は良い方法と考えられる. そこで, 雨量計では検知できない場合がある局地的大雨の検知に特化して解析雨量を活用することを考える.

その方法として, 現行の雨量計による列車運転規制を継続して実施した上で, 解析雨量による1時間雨量に基準値を設けて列車運転規制を実施する解析雨量を補完的に用いる列車運転規制方法について検討する. この方法では, 雨量計の観測値と図-6に網掛けと塗りつぶしで示したような線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量を利用する. 解析雨量による1時間雨量の基準値は, 気象庁が激しい雨の基

準にしている30mmから100mmまでの10mm刻みで設定して, これらの基準値について評価する.

a) 安全性の評価

安全性の評価には, 4(4)a)項と同様に, JR東日本において2006年から2013年に運転中止のある区間および速度規制までの区間で発生した292件の災害事例を用いた.

雨量計による列車運転規制を継続した上で, 解析雨量による1時間雨量も用いた場合に, 雨量計による列車運転規制に追加して捕捉される災害件数(以下, 追加災害捕捉数とする)を求めた. これは, 雨量計による列車運転規制において運転中止または速度規制発令前に発生した災害の中で, 災害発生時に災害発生地点から両側の駅までの区間(災害発生区間)における線路を含むメッシュの解析雨量による最大1時間雨量が前述の基準値以上になる災害件数である. 追加災害捕捉数は, 列車運転規制に災害発生地点を含むメッシュの解析雨量を用いた場合, 次に線路を含む全てのメッシュの解析雨量を用いた場合の順序で調べた.

最初に, 列車運転規制に災害発生地点を含むメッシュ(図-6の災害発生地点を含む濃い網掛けのメッシュ)の解析雨量による1時間雨量を用いた場合の追加災害捕捉数を求めた. 図-11左には図-4と同様に, 災害発生時における雨量計による1時間雨量と災害発生地点を含むメッシュの解析雨量による1時間雨量との関係を示した. 図-11左によると, 運転中止発令前に発生した災害には災害発生地点の1時間雨量が雨量計に比べて数倍大きい場合がみられる. これらは, 列車運転規制に災害発生地点を含むメッシュの解析雨量を用いると災害を捕捉できるよ

図-12 雨量計による列車運転規制の運転規制時間と解析雨量を補完的に用いる列車運転規制の追加運転規制時間との区間ごとの関係。解析雨量による1時間雨量の基準値を30, 50, 70, 90mmとした場合で、上段が運転中止の場合、下段が速度規制以上の場合。

うになる典型的な例である。運転中止と速度規制以上の場合の追加災害捕捉数は、表-4の追加災害捕捉数の括弧内に、1時間雨量の基準値ごとに示した。

次に、列車運転規制に線路を含む全てのメッシュ(図-6の網掛けと塗りつぶしの全てのメッシュ)の解析雨量を用いた場合の追加災害捕捉数を求めた。図-11右には図-4と同様に、災害発生時における雨量計による1時間雨量と災害発生地点から両側の駅までの区間(災害発生区間)における線路を含むメッシュの解析雨量による最大1時間雨量との関係を示した。図-11右は、図-11左と同様の傾向にあるが、災害発生地点の解析雨量のみを用いる場合に比べて解析雨量のメッシュ数が増加するために、1時間雨量が同値以上の値を示す。このため、追加災害捕捉数は、災害発生地点を含むメッシュの解析雨量を用いた場合に比べて増加する。運転中止と速度規制以上の場合の追加災害捕捉数は、表-4の追加災害捕捉数の欄に、1時間雨量の基準値ごとに示した。これらの件数に、雨量計による列車運転規制で運転中止および速度規制以上の発令中に発生した災害件数を加えた件数が、雨量計による列車運転規制を継続した上で、解析雨量による1時間雨量を補完的に用いる列車運転規制方法の災害捕捉数となる。表-4の災害捕捉数の欄には、この件数を示した。

b) 安定性の評価

安定性の評価には、4(4)b)項と同様に、2008年を除く2006年から2013年の降雨量データを用い

た。また、運転中止の場合が73区間、速度規制以上の場合が82区間を対象にして解析を行った。

雨量計による列車運転規制を継続した上で、解析雨量による1時間雨量も用いた場合に、雨量計による列車運転規制に追加される運転規制時間(以下、追加運転規制時間とする)を求めた。これは、雨量計による列車運転規制において運転中止または速度規制が発令されていないときに、対象区間内の線路を含むメッシュのいずれかにおいて、解析雨量による1時間雨量が前述の基準値以上であった時間数である。図-12には、雨量計による運転規制時間と、解析雨量による1時間雨量の基準値を30, 50, 70, 90mmにした場合の追加運転規制時間との関係を区間ごとに示した。図-12の上段が運転中止の場合、下段が速度規制以上の場合で、1年あたりの時間数である。図-12から、雨量計による運転規制時間と追加運転規制時間との間の相関は低い。

表-4の追加運転規制時間の欄には、解析雨量による1時間雨量の基準値を30mmから100mmまでの10mm刻みに設定した場合の追加運転中止時間と追加速度規制以上時間を示した。これらの時間数は、対象区間における1年あたりの平均値である。これらの時間数に、雨量計による運転規制時間の1年あたりの平均値を加えた時間数が、雨量計による列車運転規制を継続した上で、解析雨量による1時間雨量を補完的に用いた場合の1年あたりの運転規制時間の平均値となる。表-4の運転規制時間の欄には、

この時間数を示した。

c) 総合評価

表-4には、解析雨量を補完的に用いる列車運転規制について、解析雨量による1時間雨量の基準値ごとに、災害捕捉数(B)、運転規制時間の1年あたりの平均値(C)、および運転規制時間に対する災害捕捉数の比(B/C)を示した。4(5)c)項で述べたように、この比が大きいほど効率的な列車運転規制方法といえる。

この比は、解析雨量による1時間雨量の基準値が高いほど大きくなる傾向にあり、運転中止の場合が60mm以上、速度規制以上の場合が50mm以上になると雨量計による列車運転規制と同等以上になる。つまり、列車運行の安全性と安定性の両面から評価すると、解析雨量による1時間雨量の基準値を50mm程度以上とした解析雨量を補完的に用いる列車運転規制方法が効率的である。

したがって、局地的大雨に対応可能な列車運転規制方法として、解析雨量による1時間雨量の基準値を50mm程度以上として、現行の約10km間隔で設置された雨量計による列車運転規制を継続した上で、線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量を補完的に用いる方法が適していると考えられる。

5. 考察と実用化にあたって

(1) 雨量計と解析雨量の災害捕捉数と運転規制時間

a) 雨量計と解析雨量による災害捕捉数

約10km間隔で設置された雨量計による列車運転規制方法と、線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量による列車運転規制方法で、災害捕捉数がほぼ同じであった理由について考察する。ここでは、雨量計地点を含むメッシュと災害発生地点を含むメッシュおよび線路を含む全てのメッシュの解析雨量を用いた場合とについて比較した上で、雨量計と解析雨量を用いた場合について比較する。

最初に、解析雨量による実効雨量値を用いた場合について、雨量計地点と災害発生地点を含むメッシュの値を用いた場合の災害捕捉数を比較する。表-3によると、災害捕捉数は、後者が前者に比べて、運転中止の場合が5件、速度規制以上の場合が6件増加するのみである。この理由として、図-4に示した雨量計地点と災害発生地点を含むメッシュの実効雨量値の関係にみられるように、多くの災害事例において両者に大きな差がみられないことが挙げられる。つまり、運転規制基準値を一定以上上回る大雨の場合は、雨量計地点と災害発生地点のどちらの値

を用いても災害を捕捉できる。同様に、運転規制基準値を一定以上下回る降雨の場合は、雨量計地点と災害発生地点のどちらの値を用いても災害を捕捉できない。雨量計地点の値を用いると捕捉できない災害のうち、災害発生地点の値を用いると捕捉できるのは次の2つの場合である。一つは、3(6)節で示したような隣接する雨量計と雨量計の間に大雨域が収まるような局地的大雨の場合で、災害発生地点の値が雨量計地点に比べて数倍大きいような場合である。もう一例は、雨量計地点の値が運転規制基準値を少し下回り、災害発生地点の値が運転規制基準値を少し上回る大雨の場合である。一方で、雨量計地点の値が運転規制基準値を少し上回り、災害発生地点の値が運転規制基準値を少し下回る場合がある。このような場合は、雨量計地点の値を用いると捕捉できる災害が、災害発生地点の値を用いると捕捉できなくなる。これらの差引から、災害発生地点の値を用いた場合に、雨量計地点の値を用いた場合に比べて増加する災害捕捉数は、前述のとおりとなる。

次に、同様に解析雨量による実効雨量値を用いた場合について、雨量計地点を含むメッシュの値を用いた場合と線路を含む全てのメッシュの値を用いた場合を用いた場合との災害捕捉数を比較する。表-3によると、災害捕捉数は、後者が前者に比べて、運転中止の場合が15件、速度規制以上の場合が13件増加する。このように、災害捕捉数は災害発生地点を含むメッシュの値を用いた場合に比べて増加する。これは、災害発生地点を含むメッシュの値に比べて、災害発生地点から両側の駅までの区間(災害発生区間)において値が大きいメッシュが存在するためである。この要因として、災害は必ずしも実効雨量値が最大となるメッシュで発生しないことと、5(2)節で述べるように解析雨量値は地上の位置とずれる場合があることが考えられる。

最後に、雨量計の観測値と雨量計地点を含むメッシュの解析雨量による実効雨量値を用いた場合の災害捕捉数を比較する。表-3によると、災害捕捉数は、後者が前者に比べて、運転中止の場合で13件、速度規制以上の場合で6件減少する。1kmメッシュ解析雨量の精度を検証した鈴木ほか¹⁴⁾によると、解析雨量は雨量計の観測値に比べて平均的には1時間雨量で1割程度小さい値を示し、24時間雨量では同程度の値を示す。鈴木ほか¹⁴⁾と同様の方法で、JR東日本の雨量計の観測値を真値と仮定して、雨量計の観測値と雨量計地点を含むメッシュの解析雨量による半減期1.5, 6, 24時間実効雨量値を比べると、それぞれ平均的に後者が前者の0.895, 0.954, 0.995倍であった。このように、解析雨量による実効雨量値は、

図-13 降雨に起因して発生した列車脱線事故(●)と、運転士が災害を発見して停止することで脱線しなかった事例(□)における列車速度と発見距離との関係(鈴木⁴⁾より)。

雨量計による実効雨量値に比べて小さい値を示す。このため、解析雨量による場合の災害捕捉数は、雨量計による場合に比べて減少すると考えられる。

災害捕捉数は、解析雨量を用いた場合と比較すると、線路を含む全てのメッシュを用いた場合が雨量計地点を含むメッシュのみを用いた場合に比べて増加する。これは、災害発生地点を含むメッシュなどの観測点が増えるためである。一方で、災害捕捉数は、雨量計地点で比較すると、解析雨量を用いた場合が雨量計による場合に比べて減少する。これは、解析雨量が雨量計の観測値に比べて小さい値を示すためである。これらの差引から、災害捕捉数は、線路を含む全ての約 1km メッシュの解析雨量を用いた場合が約 10km 間隔で設置された雨量計による場合に比べて、わずかしこ増加しないと考えられる。

b) 雨量計と解析雨量による運転規制時間

線路を含む全ての約 1km メッシュの解析雨量による列車運転規制方法では、約 10km 間隔で設置された雨量計による列車運転規制方法に比べて、運転規制時間が約 1.5 倍になる理由について考察する。

運転規制時間は、区間内のいずれかの雨量計または線路を含むいずれかのメッシュの解析雨量による実効雨量値が運転規制基準値以上になる時間数である。雨量計は約 10km 間隔で設置されており、解析雨量のメッシュの幅は約 1km である。運転中止のある 73 区間と速度規制のある 82 区間について、雨量計の設置数と線路を含む解析雨量のメッシュ数を調べると、後者が前者の 11.9 倍であった。このように、解析雨量を用いた場合が雨量計による場合に比べて、観測点が大幅に増加する。このため、区間内のいずれかの観測点で実効雨量値が運転規制基準値以上になることが多くなる。これから、運転規制時間は、線路を含む全ての約 1km メッシュの解析雨量を用いると、約 10km 間隔で設置された雨量計によ

る場合に比べて増加すると考えられる。

(2) 列車運転規制に利用するメッシュ

本研究では、降雨時の列車運転規制に、図-6 に網掛けと塗りつぶしで示したような線路を含む全てのメッシュの解析雨量を用いる方法を提案した。一方で、気象庁予報部予報課¹⁵⁾によると、解析雨量のメッシュの位置は地上の位置とずれる場合がある。

気象庁予報部予報課¹⁵⁾によると、気象レーダーは高度 2,000m 付近に分布する雨粒を観測していることから、雨粒は落下する過程で風による影響を受けて、真下でなく周辺のメッシュに落下することがある。特に、対流性の強雨の場合にこの影響が顕著に現れる。また、気象レーダーの観測値を 1km メッシュの標準地域メッシュ(基準地域メッシュ)に当てはめる際に、位置ずれを起こすことがある。これらの理由によって、解析雨量の値は地上の位置とずれる場合がある。

線路を含む解析雨量のメッシュは、線路は線であることから、図-6 に網掛けと塗りつぶしで示したメッシュのように線状に連なることになる。このため、解析雨量の位置ずれは、線路に沿った方向であれば考慮され、線路と直交する方向であれば考慮されないことになる。列車運転規制に用いる解析雨量のメッシュを線路と直交する方向に拡大すると、大雨の検知性能が向上すると考えられる一方で、運転規制時間が増加することになる。これから、列車運転規制に用いる解析雨量のメッシュの範囲を拡大する場合には、これらの関係性を評価した上で判断する必要がある。これについては今後の課題とし、解析雨量を活用した列車運転規制には、まずは線路を含む全てのメッシュを用いることを考える。

(3) 実用化にあたって

鉄道の雨量計では検知できない場合がある局地的大雨にも対応可能な列車運転規制方法として、現行の約 10km 間隔で設置された雨量計による列車運転規制を継続した上で、線路を含む全ての約 1km メッシュの解析雨量による 1 時間雨量を補完的に用いる方法を提案した。この方法の実用化にあたっては、解析雨量による列車運転規制の運転規制区分および運転規制基準値を決める必要がある。また、利用する解析雨量についても検討が必要である。

a) 運転規制区分

解析雨量による 1 時間雨量を用いた場合の列車運転規制区分について検討する。鈴木⁴⁾では、災害に起因した列車脱線事故と、運転士が災害を発見して停止することで脱線しなかった事例を対象に、運転

士が災害を発見したときの列車速度（以下、列車速度とする）と運転士が災害を発見した地点から災害の発生地点までの距離（以下、発見距離とする）との関係を調べた。その結果を図-13に示す。図-13によると、塗りつぶし記号で示した列車脱線事故における列車速度と発見距離との関係は右上がりの実線の右下側の領域にプロットされ、列車速度が低いほど発見距離の上限が短くなる。また、これらの関係は実線の左上の領域にはプロットされない。一方で、塗りつぶしなしの記号で示した脱線しなかった事例では、事例数が少ないが、列車速度と発見距離との関係が実線の近傍または左上の領域にプロットされる。このように、列車速度と発見距離との関係において、列車脱線事故が発生した領域と発生していない領域が図-13に示したような右上がりの実線で分けられると考えられる。これは線路を支障する災害が発生しても、列車速度が低ければ、運転士が災害を発見して災害地点の手前で停車できた、あるいは支障物に列車が衝撃しても脱線に至らないためと推定される。したがって、列車脱線事故の防止に、速度規制を実施することの効果は大きいと考えられる。よって、解析雨量による1時間雨量を用いた列車運転規制の運転規制区分として、速度規制からは始めることも一つの選択肢であると考えられる。

b) 列車運転規制の区間

雨量計による列車運転規制では、3(1)節で述べたように一つの雨量計の受持ち区間は数駅間である。解析雨量による列車運転規制は、メッシュ単位で行うことも考えられる。しかし、5(2)節で述べたように解析雨量の値は地上の位置とずれる場合がある。さらに、列車運転規制の対象区間は、その取扱いに誤りがないように分かり易くしておくことも必要である。このため、解析雨量による列車運転規制は、線路を含むあるメッシュの1時間雨量が運転規制基準値を超えた場合に、そのメッシュの両側の駅までの区間で実施することを考えている。

c) 運転規制基準値

解析雨量による1時間雨量の運転規制基準値は、災害捕捉数を安全性の指標、運転規制時間を安定性の指標として、列車運行の安全性と安定性の両面から評価すると、50mm程度以上が適しているとした。

一方で、鉄道の部外の排水設備などの整備状況を調べると、下水道は、例えば東京都や横浜市などが1時間雨量50mm、秋田市が51mmに対応できるように整備が進められている。また、河川では一般河川については、10年以下から50年確率雨量としている¹⁶⁾。このような排水設備の防災強度を大幅に超えるような大雨が発生すると、災害の発生が懸念され

る。このような観点からも、1時間雨量の基準値を50mm程度以上にするのは妥当と考えられる。

また、降雨時の列車運転規制区分は、線路設備の防災強度に応じて、運転中止のある区間、速度規制までの区間、列車運転規制を行わない区間に分けられる。これから、線路設備の防災強度に応じて、解析雨量の基準値を変えることも一つの選択肢であると考えられる。

解析雨量による1時間雨量の運転規制基準値は、これらを考慮したうえで、実務的な判断に基づいて決定する必要がある。

d) 列車運転規制に利用するレーダー雨量

列車運転規制に用いるレーダー雨量の条件として、降雨量の推定精度が高いことに加えて、リアルタイム性に優れていることと、全社的に利用できることが挙げられる。現在、列車運転規制に活用できる可能性のあるレーダー雨量には、国交省解析雨量と国交省XRAINがある。

国交省解析雨量は、降雨量の推定精度が高く¹⁴⁾、日本全国で利用できる。一方で、データの配信間隔が30分であることに加えて、配信までに約20分要する¹⁷⁾ことから即時性に乏しい。このため、現状では列車運転規制に利用することは難しい。そこで、気象庁から配信される気象レーダーの観測値（5分毎1kmメッシュ全国合成レーダーGPV）を気象庁やJR東日本の雨量計の観測値で較正して、データの配信間隔が10分で、配信に要する時間を数分以下とする鉄道独自の解析雨量を用いることを考えている。

国交省XRAINは、リアルタイム性が高く、XバンドMPレーダーでカバーされるエリアでは降雨量の推定精度が高いとされている¹⁸⁾。一方で、XバンドMPレーダーでカバーされるエリアは限られている。JR東日本のエリアでは、関東平野のほぼ全域がXバンドMPレーダーでカバーされている。そこで、関東平野の路線では、前述の解析雨量に加えて、XRAINも利用することを考えている。XRAINは、2016年7月からCバンドMPレーダーも利用することで、JR東日本のエリアがほぼカバーされるようになった。今後、CバンドMPレーダーだけでカバーされているエリアについて、降雨量の推定精度を検証することで、列車運転規制への利用の可否を見極めて行きたいと考えている。

6. まとめとおわりに

降雨時の列車運行の安全をより向上するために、鉄道の雨量計では検知できない場合がある局地的大

雨にも対応可能な降雨時の列車運転規制方法として、レーダー雨量を活用した方法を開発した。開発にあたっては、国交省解析雨量、JR 東日本の雨量計の観測値および降雨災害事例を用いて、列車運行の安全性と安定性の両面から評価した。その結果、解析雨量による1時間雨量の基準値を50mm程度以上として、現行の約10km間隔で設置された雨量計による列車運転規制を継続した上で、線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量を補完的に用いる列車運転規制方法が効果的であるとの結論を得た。

- 1) 局地的大雨にも対応するために、列車運転規制に用いる雨量値を雨量計の観測値から解析雨量に置き換えた場合について評価した。ここで、災害捕捉数を安全性の指標、運転規制時間を安定性の指標とすると、運転規制時間に対する災害捕捉数の比が大きいほど効率的である。この比は、雨量計による列車運転規制方法が、解析雨量による列車運転規制方法の約1.5倍になる。これから、雨量計による列車運転規制は解析雨量による列車運転規制に比べて効率的である。つまり、現行の約10km間隔で設置した雨量計と現行の雨量計による運転規制基準値を用いる列車運転規制方法が、線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量による実効雨量値と現行の雨量計による運転規制基準値を用いる列車運転規制方法に比べて効率的である。
- 2) 運転規制時間に対する災害捕捉数の比は、雨量計による列車運転規制が解析雨量による列車運転規制の約1.5倍になる。これは、解析雨量による場合が雨量計による場合に比べて、災害捕捉数がわずかしかな増加しない一方で、運転規制時間が約1.5倍に増加するためである。災害捕捉数は、解析雨量を用いた場合で比較すると、線路を含む全てのメッシュを用いた場合が雨量計地点を含むメッシュのみを用いた場合に比べて増加する。これは、災害発生地点を含むメッシュなどの観測点が増えるためである。一方で、災害捕捉数は、雨量計地点で比較すると、解析雨量を用いた場合が雨量計による場合に比べて減少する。これは、解析雨量が雨量計の観測値に比べて小さい値を示すためである。これらの差引から、災害捕捉数は、線路を含む全てのメッシュの解析雨量を用いた場合が雨量計の観測値を用いた場合に比べて、わずかしかな増加しないと考えられる。また、解析雨量を用いた場合が雨量計による場合に比べて、観測点が大幅に増加するために、対象区間内のいずれかの観測点で実効雨量値が運転規制基準値以上になることが多くなる。このため、運転規制時間は、解析雨量による場合が雨量計の観測値を用いた場合に比べて

増加すると考えられる。

- 3) 雨量計による列車運転規制は解析雨量による列車運転規制に比べて効率的であるとともに、鉄道の雨量計は線路沿線の大雨を概ね検知できていると考えられる。これから、現行の雨量計による列車運転規制方法は良い方法と考えられる。そこで、雨量計では検知できない場合がある局地的大雨の検知に特化して解析雨量を活用することを考えた。その方法として、現行の雨量計による列車運転規制を継続した上で、解析雨量による1時間雨量を補完的に用いる列車運転規制方法について評価した。その結果、解析雨量による1時間雨量の基準値を50mm程度以上にすると、運転規制時間に対する災害捕捉数の比が雨量計による列車運転規制と同等以上になる。これから、局地的大雨にも対応可能な列車運転規制方法として、解析雨量による1時間雨量の基準値を50mm程度以上として、現行の約10km間隔で設置された雨量計による列車運転規制を継続した上で、線路を含む全ての約1kmメッシュの解析雨量を補完的に用いる方法が適していると考えられる。

雨量計による列車運転規制を継続した上で、解析雨量による1時間雨量を補完的に用いる降雨時の列車運転規制方法を実用化するにあたっては、実務的な判断に基づいて、解析雨量による列車運転規制の運転規制区分と運転規制基準値を決める必要がある。その上で、気象観測・警報システムの改修を行い、可能な限り早期にJR 東日本の路線において実用化したいと考えている。なお、解析雨量による1時間雨量を用いた列車運転規制は、首都圏などの現行では列車運転規制を行わない区間においても単独で実施する予定である。

降雨時の列車運転規制に用いるレーダー雨量には、鉄道独自の解析雨量と、関東平野の路線では国交省XRAINを利用することを考えている。これは、国交省解析雨量については、データの配信間隔が30分であることに加えて、配信までに約20分要することから即時性に乏しいためである。

気象庁では2017年の出水期から、降水量の算出に利用する雨量計の数を制限することで算出処理の所要時間を短縮して配信間隔を10分にした速報版解析雨量の配信を予定している¹⁹⁾。今後、速報版解析雨量の精度検証を行った上で、列車運転規制への活用を検討して行きたいと考えている。さらに、気象庁から配信される降水ナウキャストや高解像度降水ナウキャストといった降水量の予測情報も充実してきた。これらの予測情報の精度が高ければ、降雨量が運転規制基準値に達する前に確実に列車の運行を

停止できるようになると考えられる。今後は、これらの降水量の予測情報の精度を検証した上で、これらの降雨時の列車運転規制への活用方法を研究して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 島村誠：降雨・河川増水に対する運転規制方法等の改正，日本鉄道施設協会誌，Vol. 35，pp. 437-440，1989.
- 2) 岩井美津雄：在来線防災情報収集システムの開発・導入，日本鉄道施設協会誌，Vol. 42，pp. 136-138，1996.
- 3) 森泰樹，泉並良二，深田隆弘：1km メッシュ解析雨量を利用した鉄道運転規制の検討，土木学会年次学術講演会，第 IV 部門，Vol. 64，pp. 387-388，2009.
- 4) 鈴木博人：降雨時の列車運行の安全性向上に向けた考察－降雨に起因した列車脱線事故の分析－，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol. 18，pp. 141-147，2014.
- 5) 鈴木博人，大島竜二：雨量計で観測される降雨量と災害の発生地点の降雨量の差異に関する考察，自然災害科学，Vol. 33，pp. 101-113，2014.
- 6) 中北英一，山口弘誠，山邊洋之：レーダー情報を用いた豪雨の卵の解析，京都大学防災研究所年報，Vol. 52B，pp. 547-562，2009.
- 7) 気象庁：気候変動監視レポート 2013，71p.，2014.
- 8) IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1535 p., 2013.
- 9) 加藤光：防災情報システムの導入，Japan Railway Engineers' Association, Vol. 32，pp. 18853-18856，1989.
- 10) 鈴木修，島村誠：実効雨量による降雨時列車運転規制基準の開発と導入，鉄道力学論文集，Vol. 13，pp. 200-203，2009.
- 11) 鈴木雅一，小橋澄治：がけ崩れ発生と降雨の関係について，新砂防，Vol. 121，pp. 16-25，1981.
- 12) 寺田秀樹，中谷洋明：土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，Vol. 5，58p.，2001.
- 13) 村石尚，杉山友康，香川清治：実効雨量による災害予測手法の検討，鉄道総研報告，Vol. 9，pp. 7-12，1995.
- 14) 鈴木博人，中北英一，高橋日出男：1km メッシュ解析雨量の精度検証－関東甲信越地方と東北地方における解析－，土木学会論文集，B1(水工学)，Vol. 73，pp. 13-18，2017.
- 15) 予報部予報課：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度，測候時報，Vol. 62，pp. 279-339，1995.
- 16) 日本河川協会：国土交通省河川砂防技術基準同解説計画編，技報堂出版，448p.，2005.
- 17) 高田望，佐藤悠，吉田翔，池淵周一：気象庁レーダーと国土交通省レーダー雨量計の精度比較，水文・水資源学会研究発表会要旨集，p. 100040，2014.
- 18) 土屋修一，山地秀幸，川崎将生：XRAIN 雨量観測の実用化技術に関する検討資料，国土技術政策総合研究所資料，Vol. 909，2016.
- 19) 気象庁予報部：配信資料に関する技術情報第 446 号～表面雨量指数，精緻化した流域雨量指数，大雨警報(浸水害)の危険度分布，洪水警報の危険度分布，大雨警報(浸水害)・洪水警報の危険度分布(統合版)，速報版解析雨量の提供について～，9p.，2016.

(2017. 1. 18 受付)

A STUDY ON THE UTILIZATION OF RADAR RAINFALL FOR THE TRAIN OPERATION CONTROL

Hiroto SUZUKI, Eiichi NAKAKITA and Hideo TAKAHASHI

Railway operators enforce train operation control such as speed reduction and suspension of operations based on precipitation observed by rain gauges to ensure safe train operation in the times of heavy rainfall. Many railway operators install rain gauges at intervals of approximately ten kilometers. These rain gauges can generally detect heavy rainfall occurring along rail lines, but cases are also encountered in which localized heavy rainfall goes undetected. Therefore, we developed a train operation control method utilizing radar precipitation that can detect localized heavy rainfall undetected by rain gauges. In this study, we evaluated the new method from the aspects of both safety and stability of train operation using Radar/ Rain-gauge analyzed precipitation data, rain gauge data observed by East Japan Railway Company (JR East), and rainfall disaster data occurred on the JR East lines. We propose that the current train operation control method using rain gauges be continued, to be supplemented by Radar/ Rain-gauge analyzed precipitation.