

鉄道における雨量計の設置間隔と列車運転規制基準値 の設定方法に関する考察

A STUDY ON DETERMINING METHOD OF RAIN GAUGE INSTALLATION INTERVAL AND TRAIN OPERATION CONTROL CRITERIA FOR RAILROAD

鈴木博人¹・中北英一²・高橋日出男³

Hiroto SUZUKI, Eiichi NAKAKITA, Hideo TAKAHASHI

¹正会員 理修 東日本旅客鉄道株式会社千葉支社設備部(〒260-0031 千葉県千葉市中央区新千葉 1-3-24)

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

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

Train operation is suspended to ensure safety when the precipitation observed by a rain gauge exceeds the train operation control criteria. This paper proposes a method to determine the rain gauge installation interval and the train operation control criteria suitable for hourly precipitation. Those are evaluated from the viewpoints of both safety and reliability of train operation, based on the spatial distribution of precipitation observed by rain gauges. This paper shows the combinations of the rain gauge installation interval and the train operation control criteria which can improve either safety or reliability when one is kept constant, or can improve both. For instance, in the case that the rain gauge installation interval is reduced from 10 km, which is the current standard interval adopted by many railway companies, to 5km, the train operation control criteria are raised by 17% and reliability can improve by 25% when safety is kept constant, and the train operation control criteria are raised by 8% and safety can improve by 19% when reliability is kept constant.

Key Words : rain gauge, installation interval, train operation control criteria, railroad, safety, reliability, spatial distribution

1. はじめに

著者らは、鉄道や気象庁などの複数の機関が設置した多数の雨量計で観測された降水量データを用いてメッシュスケールにおける降水量の空間分布を明らかにしてきた^{1,2,3)}。その上で、著者ほか³⁾では鉄道における雨量計の設置間隔について、列車運行の安全性と安定性の両面から評価する方法を提案した。本研究では、雨量計の設置間隔だけでなく、列車運転規制基準値を同時に設定する方法を提案する。

鉄道では、降雨に起因した土砂崩壊などの災害から列車運行の安全を確保するために、雨量計の観測値に基づいて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。多くの鉄道において、雨量計の設置間隔は 10km を標準としており^{4,5)}、個々の雨量計の受け持ち範囲は半径約 5km である。この範囲における降水量は一樣とみなされ、雨量計の地点の降水量で代表される。また、運転中止基準値は過去の災害発生時の降水量が可能な限りこの値以上になるように設定されている。このような方法で実施する降雨時の列車運転規制は、雨量計の観測値の

みに基づく単純な方法であるが、大雨時の列車運行の安全に大きな貢献を果たしてきた。

しかし、降水量に空間分布があることは周知の事実で、例えば仙台管区気象台調査課⁶⁾によると、ひと雨の降水量はほぼ同一地点とみなされる一辺 15m の正三角形内でも±6%のばらつきがあり、3km 四方の広さでは±14%のばらつきがある。雨量計の配置に関する研究として、村上ほか⁷⁾では神奈川県内における 5km メッシュのレーダーアメダス解析雨量を用いて、2 地点の 1 時間降水量の差異が 10%以内の範囲は 1km 程度、20%の範囲は 2km 程度とした。井良沢・田口⁸⁾では、雨量計の観測値が代表し得る範囲を 2 地点における 1 時間降水量の相関係数が 0.9 以上の範囲とし、新潟県山間部における雨量計の観測値から、その範囲を 3km 前後とした。また、建設省土木研究所⁹⁾では雨量計の設置箇所と災害発生地点の距離の検討から、災害発生箇所の降水量を把握するには概ね 5km 以内での観測が必要とした。

鉄道において降雨時の列車運転規制を行う際の基本は、降雨により被る危険を十分に回避（安全の確保）した上で、列車の運行を可能な限り確保（安定性の確保）

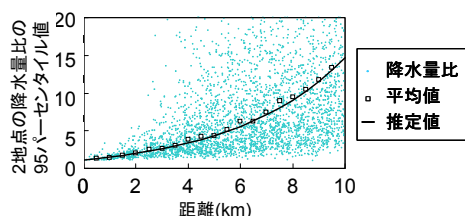


図-1 2地点の1時間降水量の降水量比に関する95パーセンタイル値と2地点間の距離との関係。雨量計の組合せごとの降水量比、その1km範囲ごとの平均値、および最小二乗法による推定値。

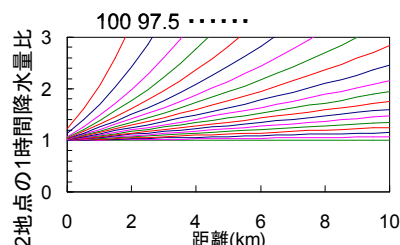


図-2 2地点の1時間降水量の降水量比と2地点間の距離との関係で、50から100パーセンタイル値までの2.5パーセンタイル値ごとの最小二乗法による推定値。

することである¹⁰⁾。そこで、著者ほか³⁾では東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本とする）における運転中止基準値と速度規制基準値の比が1.2程度であることから、2地点の降水量比が1.2以上の大雨に曝される確率と2地点の降水量比が1.2を超過した量を安全性の評価基準、列車の運行停止時間であるダウンタイムを安定性の評価基準として、関東平野に設置された雨量計による1時間降水量の観測値を用いて雨量計の設置間隔を評価した。その結果、雨量計の設置間隔を10kmから5km（雨量計の受け持ち範囲を半径5kmから2.5km）にすると、2地点の降水量比が1.2以上の大雨に曝される確率でみた安全性の向上率とダウンタイムでみた安定性の低下率が同等になることから、鉄道における雨量計の設置間隔の次の目標を5kmとした。しかし、列車運転規制基準値を一定として、雨量計の設置間隔を小さくしたことから、安全性が向上する一方で、安定性が低下した。そこで、本研究では安全性と安定性のどちらか一方を一定に保った上でもう一方を向上する、あるいは両方を向上するために、雨量計の設置間隔を小さくすると同時に、列車運転規制基準値を向上する方法を提案する。

2 1時間降水量の空間分布と解析方法

本章では、著者ほか^{12,3)}で策定した2地点の1時間降水量の降水量比および同時生起率と2地点間の距離との関係について概観するとともに、解析方法を示す。

(1) 降水量データ

対象地域は、降水量に与える地形の影響が小さいと考えられる関東平野の標高150m以下の地域である。解析に利用した雨量計は、著者ほか³⁾で用いたJR 東日本の110地点、気象庁の60地点、国土交通省の87地点、東京都の90地点の合計347地点である。対象期間は1991

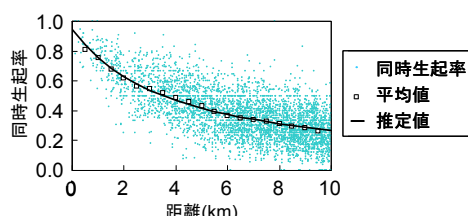


図-3 1時間降水量の同時生起率と2地点間の距離との関係。雨量計の組合せごとの降水量比、その1km範囲ごとの平均値、および最小二乗法による推定値。

年から2007年の17年間の暖候期（5月～10月）で、この期間における正時の1時間降水量を用いた。また、2地点間の距離が10km以下の組合せは2,175組である。

(b) 1時間降水量の降水量比

2地点の1時間降水量の降水量比と2地点間の距離との関係は、2地点の降水量比に関して、小さい方から $P\%$ のデータが含まれる P パーセンタイル値 $R(p, x)$ と2地点間の距離 x との関係として求めた。これらの関係は、 $p\%$ ごとに定まる $a(p)$ 、 $b(p)$ を係数とする次式で表した³⁾。ここで、2地点の1時間降水量の降水量比に関するパーセンタイル値は2地点間の距離が0kmのとき降水量の観測誤差のために1にならず、 $b(p)$ はそのための係数である。

$$R(p, x) = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}(1 - b(p)) \exp(-a(p) \times x)\right) \quad (1)$$

図-1は、2地点のうちの1地点以上で30mm以上の1時間降水量が観測された場合を対象に、2地点の1時間降水量の降水量比に関する95パーセンタイル値と2地点間の距離との関係を例示したもので、雨量計の組合せごとの降水量比、その1km範囲ごとの平均値、および最小二乗法で求めた式(1)の推定値を示した。また、図-2は図-1に示した最小二乗法による推定値を2地点の1時間降水量の降水量比に関する50から100パーセンタイル値まで2.5パーセンタイル値ごとに示したものである。

(3) 1時間降水量の同時生起率

降水の同時生起率¹¹⁾は、ある地点の降水量がある値以上の場合に、もう一方の地点の降水量が同時にその値以上になった割合である。1時間降水量の同時生起率 $S(x)$ と2地点間の距離 x との関係は、 a 、 b を係数とする次式で表した³⁾。ここで、1時間降水量の同時生起率は2地点間の距離が0kmのとき降水量の観測誤差のために1にならず、 b はそのための係数である。

$$S(x) = (1 - b) / (1 + a \times x) \quad (2)$$

図-3は、2地点のうちの1地点以上で30mm以上の1時間降水量が観測された場合を対象に、図-1と同様に1時間降水量の同時生起率を示したものである。

(4) 解析方法

鉄道における雨量計の設置間隔と列車運転規制値について、表-1に示す安全性を曝露率と超過関数、安定性をダウンタイムで評価することとした。曝露率と超過関数は1時間降水量の降水量比と頻度、超過関数は1時間降水量の同時生起率、頻度、および平均継続時間から求め

表-1 雨量計の設置間隔と列車運転規制基準値の評価基準.

評価基準	定義
曝露率	雨量計の地点の降水量が速度規制基準値以下の場合に、雨量計からある距離離れた地点までの区間において、降水量が運転中止基準値以上の大雨に曝される確率
超過関数	雨量計の地点の降水量が速度規制基準値以下の場合に、雨量計からある距離離れた地点までの区間において、降水量が運転中止基準値を超過した量を2乗した平均値
ダウンタイム	雨量計の観測値が運転中止基準値を超過して列車運行が停止してから再開されるまでの時間

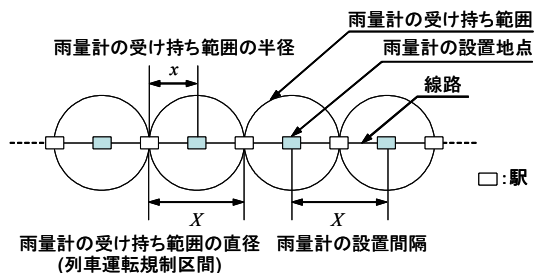


図-4 雨量計の設置間隔と雨量計の受け持ち範囲の関係.

た。本研究の解析手順は、以下の通りである。

- 列車運転規制の運転中止基準値を1時間降水量が30, 35, 40mmとした場合について、曝露率、超過関数、およびダウンタイムを求め、これを従来の運転中止基準値の場合の曝露率、超過関数、およびダウンタイムとする。
- 従来の運転中止基準値から運転中止基準値を1.05, 1.10, 1.15, 1.20倍した場合の曝露率、超過関数、およびダウンタイムを求める。
- 従来の運転中止基準値と運転中止基準値を向上した場合の曝露率、超過関数、およびダウンタイムと雨量計の設置間隔の関係から、雨量計の設置間隔と同時に列車運転規制基準値を設定する方法を提案する。

また、解析にあたって以下のとおり仮定した。

- 雨量計は、直線の線路に等間隔で設置されているものとする（図-4）。
- JR 東日本における運転中止基準値と速度規制基準値の比は平均すると1.2程度である。これから、速度規制基準値は運転中止基準値を1.2で除した値とする。
- 1時間降水量の降水量比および同時生起率は、2地点のうちの1地点以上で一般的に大雨とされる30mm以上の1時間降水量が観測された場合の結果を利用する。つまり、これらは運転中止基準値に依存しないとする。

3 従来の運転中止基準値の場合の解析

(1) 1時間降水量の頻度と平均継続時間

図-5は、正時において i mm の1時間降水量が出現した1地点・1年あたりの頻度 $F(i)$ で、347地点における正時の降水量データから求めた。1時間降水量の頻度 $F(i)$ は、累乗型と指数型の2種類の関係式について、最小二乗法を用いて係数 a, b を推定した結果、誤差が小さい次

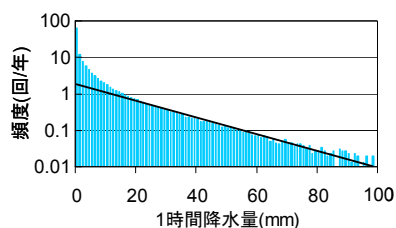


図-5 正時における1時間降水量の頻度.

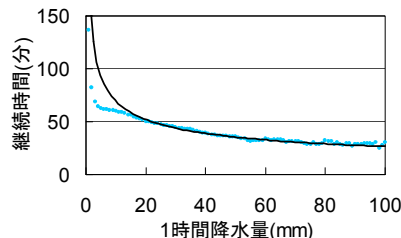


図-6 1時間降水量の平均継続時間.

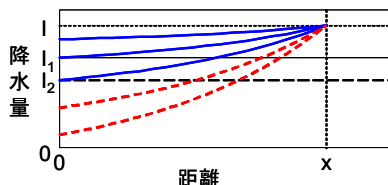


図-7 列車運転規制基準値と大雨の捕捉の可否の関係。運転中止基準値が I_1 、速度規制基準値が I_2 、ある地点 x における降水量が $I (\geq I_1)$ のとき、雨量計の地点（原点）の降水量が速度規制基準値 I_2 以上である実線の降水分布は大雨を捕捉できるとし、速度規制基準値 I_2 以下である点線の降水分布は大雨を捕捉できないとする。

式に示す指数型を採用することとした。

$$F(i) = a \times 10^{b \times i} \quad (3)$$

また、図-6は1時間降水量が i mm となってから i mm を下回るまでの平均継続時間 $T(i)$ で、JR 東日本の雨量計110地点における5分ごとの降水量データから求めた。1時間降水量の平均継続時間 $T(i)$ は、誤差の小さい次式に示す累乗型を採用することとした。

$$T(i) = a \times i^b \quad (4)$$

なお、式(3)および式(4)の a, b は1時間降水量が20mmから80mmまでのデータを用いて推定した。

(2) 曝露率

安全性の評価基準である曝露率の定義は、表-1の通りである。図-7において、運転中止基準値を I_1 、速度規制基準値を $I_2 (=I_1/1.2)$ とすると、雨量計から距離 x 離れた地点における降水量 I （図-7のA点）が運転中止基準値 I_1 以上のときに、雨量計の地点における降水量が速度規制基準値 I_2 以上であれば、この大雨を捕捉できたと考えることにする。降水量 I の大雨が捕捉できる確率は、1時間降水量の降水量比 $R(p, x)$ と I/I_2 が等しいとした次式

$$R(p, x) = I/I_2 = 1.2I/I_1 \quad (5)$$

の左辺 $R(p, x)$ を $p\%$ について解くことで求めることができる。ここで、 $p/100$ を捕捉率 $P(I_1, I, x)$ とする。

次に、雨量計の地点の降水量が速度規制基準値 I_2 以下の場合に、雨量計から距離 x の地点において、降水量が

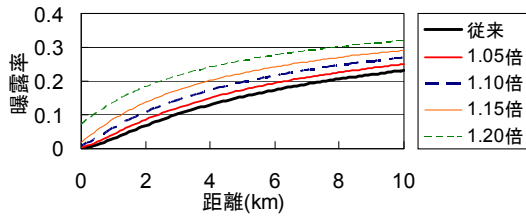


図-8 従来の運転中止基準値および運転中止基準値を向上した場合の曝露率と雨量計の受け持ち範囲の半径（2 地点間の距離）との関係。従来の運転中止基準値が 30mm の場合。

運転中止基準値 I_1 以上である確率を見逃し率 $M(I_1, x)$ とする。見逃し率 $M(I_1, x)$ は、分母を運転中止基準値 I_1 以上の降水量 I に関する 1 時間降水量の頻度 $F(I)$ の合計、つまり運転中止基準値 I_1 以上の 1 時間降水量の頻度、分子を同様に捕捉率 $P(I_1, I, x)$ の余事象と 1 時間降水量の頻度 $F(I)$ との積の合計、つまり運転中止基準値 I_1 以上で捕捉できない 1 時間降水量の頻度として次式で求めることができる。

$$M(I_1, x) = \frac{\sum_{I=I_1}^{\infty} (F(I) \times (1 - P(I_1, I, x)))}{\sum_{I=I_1}^{\infty} F(I)} \quad (6)$$

これを雨量計の受け持ち範囲の半径 r （2 地点間の距離）の区間において平均すると運転中止基準値を I_1 とした場合の曝露率 $E(I_1, r)$ となる。これから、曝露率 $E(I_1, r)$ は次式で表すことができる。

$$E(I_1, r) = \int_0^r M(I_1, x) dx / x \quad (7)$$

図-8 は、運転中止基準値 I_1 を 30mm とした場合に、式 (7) から算出される曝露率と雨量計の受け持ち範囲の半径 r の関係で、曝露率は収束型の増加関数である。また、2 地点間の距離が 0km のときに 2 地点の降水量比に関するパーセンタイル値が 1 にならないことに起因して、2 地点間の距離が 0km のとき曝露率は 0 以上の値をとる。

(3) 超過関数

安全性の評価基準である超過関数の定義は、表-1 の通りである。降水量が運転中止基準値を超過した量を 2 乗和するのは、僅かな超過であれば大目にみて、大きな超過に対しては厳しく評価するためである。雨量計の地点の降水量が速度規制基準値 I_2 以下の場合に、雨量計から距離 x の地点において降水量が運転中止基準値 I_1 を超過した量の 2 乗和 $l(I_1, x)$ は、運転中止基準値 I_1 以上の降水量 I に関して、降水量 I と運転中止基準値 I_1 の差の 2 乗、捕捉率 $P(I_1, I, x)$ の余事象、および 1 時間降水量の頻度 $F(I)$ の積の合計として次式で表すことができる。

$$l(I_1, x) = \sum_{I=I_1}^{\infty} ((I - I_1)^2 \times (1 - P(I_1, I, x)) \times F(I)) \quad (8)$$

これを雨量計の受け持ち範囲の半径 r （2 地点間の距離）の区間において平均すると超過関数 $L(I_1, r)$ となる。これから、超過関数 $L(I_1, r)$ は次式で表すことができる。

$$L(I_1, r) = \int_0^r l(I_1, x) dx / x \quad (9)$$

図-9 は、運転中止基準値 I_1 を 30mm とした場合に、式

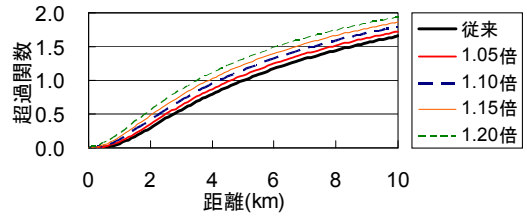


図-9 図-8 と同様。ただし、超過関数の場合。従来の運転中止基準値における雨量計の受け持ち範囲の半径が 5km の場合で規格化。

(9) から算出される超過関数と雨量計の受け持ち範囲の半径 r との関係で、雨量計の受け持ち範囲の半径を 5km で規格化して示した。超過関数は、収束型の増加関数で、曝露率と同様に 2 地点間の距離が 0km のとき 0 以上の値をとる。

(4) ダウンタイム

安定性の評価基準であるダウンタイムの定義は、表-1 の通りである。鉄道では、一つの雨量計で運転中止になると一定の区間で列車の運行ができなくなることから、その区間で観測される大雨の合計回数（大雨回数）が運転中止回数になる。ここで、ある雨量計で観測される運転中止基準値 I_1 以上の大雨の頻度は、運転中止基準値 I_1 以上の降水量 I に関する 1 時間降水量の頻度 $F(I)$ の合計で一樣と仮定する。このとき、ある区間では著者ほか³⁾で示したように雨量計が 1 つ増加するごとに、同時生起率 $S(X)$ の余事象に相当する回数が新たに大雨として観測されることになる。これから、路線延長 L に雨量計が等間隔 X で設置されている場合に観測される運転中止基準値 I_1 以上の大雨回数 $n(I_1, X)$ は次式で表すことができる。

$$n(I_1, X) = (1 + (L/X - 1)(1 - S(X))) \times \sum_{I=I_1}^{\infty} F(I) \quad (10)$$

列車の運行が停止してから運転が再開されるまでの平均時間 $d(I_1, X)$ は、著者ほか³⁾で示したように、降水量が運転中止基準値 I_1 以上の平均継続時間 $T(I_1)$ 、降水量が運転中止基準値 I_1 を下回ってから線路巡回に出発するまでに要する準備時間 s 、線路巡回に要する時間（移動速度 v ）の合計で、次式で表すことができる。

$$d(I_1, X) = T(I_1) + s + X/v \quad (11)$$

線路巡回には雨量計の設置間隔に関わらず運転規制区間ごとに 1 パーティーを充当できる、つまり同時に線路巡回を実施できると仮定すると、ダウンタイム $D(I_1, X)$ は大雨回数 $n(I_1, X)$ と運転中止の平均時間 $d(I_1, X)$ の積になり、次式で表すことができる。

$$D(I_1, X) = n(I_1, X) \times d(I_1, X) \quad (12)$$

路線延長 L は JR 東日本千葉支管内における列車の折り返し設備の平均距離である 40km、準備時間 s は 2008 年から 2010 年における実績から 61 分、線路巡回の移動速度 v は過去の実績から 178m/分とした。図-10 は、運転中止基準値 I_1 を 30mm とした場合のダウンタイムと雨量計の設置間隔との関係で、ダウンタイムは雨量計の設置間隔を 10km の場合で規格化して示した。ダウンタイム

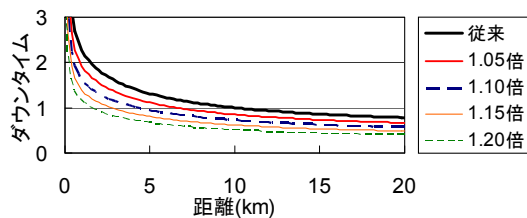


図-10 従来の運転中止基準値および運転中止基準値を向上した場合のダウタイムと雨量計の設置間隔との関係。従来の運転中止基準値が30mmの場合で、雨量計の設置間隔が10kmの場合で規格化。

は収束型の減少関数で、2地点間の距離が0kmのときに同時生起率が1にならないことに起因して、2地点間の距離が0kmのときダウタイムは発散する。なお、運転中止区間の線路巡回を同時にできるとする仮定は、雨量計の設置間隔が極端に小さい場合に成り立たないことから、図-10に示したダウタイムは雨量計の設置間隔が極端に小さい場合には最小値を示していることになる。

4 運転中止基準値を向上した場合の解析

本章では、運転中止基準値を向上した場合の曝露率、超過関数、およびダウタイムについて解析する。運転中止基準値を降水量 I_1 から I_1' に向上すると、速度規制基準値は $I_2' (=I_1'/1.2)$ に向上する。一方で、雨量計から距離 x の地点において捕捉すべき大雨は、従来と同じ降水量が運転中止基準値 I_1 以上の場合である。

(1) 曝露率

運転中止基準値を降水量 I_1' に向上すると、雨量計から距離 x の地点における降水量 I が従来の運転中止基準値 I_1 以上のときに、雨量計の地点における降水量が速度規制基準値 $I_2' (=I_1'/1.2)$ 以上であれば、この大雨を捕捉できたと考えることにする。これから、見逃し率 $M(I_1', x)$ は式(5)の右辺を $1.2I/I_1'$ として求めた捕捉率 $P(I_1', I, x)$ を式(6)に代入し、従来の運転中止基準値 I_1 以上の降水量 I に関する合計として求めることができる。曝露率 $E(I_1', x)$ は、見逃し率 $M(I_1', x)$ を式(7)に代入して求めることができ、図-8には運転中止基準値を30mmから1.05, 1.10, 1.15, 1.20倍した31.5, 33, 34.5, 36mmに向上した場合の曝露率を示した。

これから、雨量計の受け持ち範囲の半径が一定の場合には運転中止基準値を向上すると曝露率が高くなるが、半径を小さくすれば、運転中止基準値を向上しても曝露率を一定にできることが分かる。図-11には、従来の運転中止基準値を30, 35, 40mmとした場合について、運転中止基準値の向上率と、曝露率が雨量計の受け持ち範囲の半径5kmの場合と同値になる半径を示した。この図において、雨量計の受け持ち範囲の半径と運転中止基準値の向上率の組合せが実線上にあれば曝露率が従来の運転中止基準値の場合と同値であり、実線よりも左側にあれば曝露率が従来の運転中止基準値の場合より小さくなる。

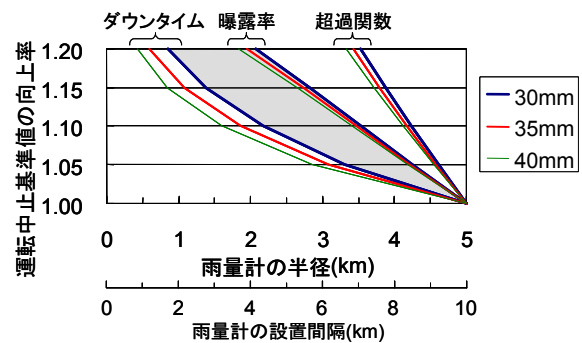


図-11 従来の運転中止基準値が30, 35, 40mmの場合に、曝露率、超過関数、およびダウタイムが雨量計の受け持ち範囲の半径5km（雨量計の設置間隔10km）の場合と同値になる運転中止基準値の向上率と雨量計の受け持ち範囲の半径（雨量計の設置間隔）の関係。網掛けは、従来の運転中止基準値が30mmの場合に、曝露率とダウタイムが改善する領域。

(2) 超過関数

運転中止基準値を降水量 I_1' に向上すると、雨量計の地点の降水量が速度規制基準値 $I_2' (=I_1'/1.2)$ 以下の場合に、雨量計から距離 x の地点における降水量 I が従来の運転中止基準値 I_1 を超過した量の2乗和 $L(I_1', x)$ は、式(8)において捕捉率を $P(I_1', I, x)$ とし、従来の運転中止基準値 I_1 以上の降水量 I に関する合計として求めることができる。超過関数 $L(I_1', r)$ は、2乗和 $L(I_1', x)$ を式(9)に代入して求めることができ、図-9には図-8と同様に運転中止基準値を30mmから31.5, 33, 34.5, 36mmに向上した場合の超過関数を示した。これから、曝露率と同様に雨量計の受け持ち範囲の半径を小さくすれば、運転中止基準値を向上しても超過関数を一定にできることが分かる。図-11には、曝露率と同様に運転中止基準値の向上率と、超過関数が雨量計の受け持ち範囲の半径5kmの場合と同値になる半径を示した。この図において、雨量計の受け持ち範囲の半径と運転中止基準値の向上率の組合せが、実線上または左側にあれば超過関数が従来の運転中止基準値の場合と同値または小さくなる。

(3) ダウタイム

運転中止基準値を降水量 I_1' に向上すると、大雨回数 $n(I_1', X)$ は、式(10)の右辺の1時間降水量の頻度 $F(I)$ の合計を運転中止基準値 I_1' 以上とすることで求めることができる。また、運転中止の平均時間 $d(I_1', X)$ は式(11)の右辺の1時間降水量の平均継続時間を $T(I_1')$ とすることで求めることができる。ダウタイム $D(I_1', X)$ は、大雨回数 $n(I_1', X)$ と運転中止の平均時間 $d(I_1', X)$ を式(12)に代入して求めることができ、図-10には図-8と同様に運転中止基準値を30mmから31.5, 33, 34.5, 36mmに向上した場合のダウタイムを示した。これから、曝露率と同様に雨量計の設置間隔を小さくすれば、運転中止基準値を向上してもダウタイムを一定にできることが分かる。図-11には、曝露率と同様に運転中止基準値の向上率と、ダウタイムが雨量計の設置間隔10kmの場合と同値になる設置間隔を示した。この図において、雨量計の設置

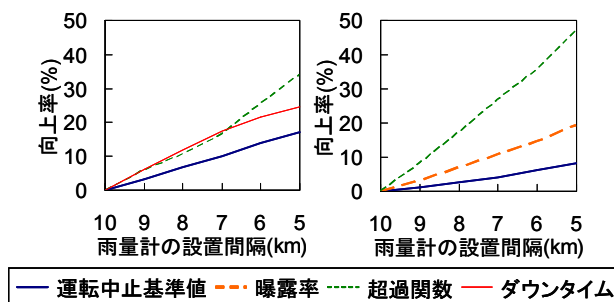


図-12 左図は、従来の運転中止基準値を 30mm とした場合に、曝露率を一定としたときの運転中止基準値、超過関数からみた安全性、ダウンタイムからみた安定性の向上率。右図は、同様にダウンタイムを一定としたときの運転中止基準値、曝露率と超過関数からみた安全性の向上率。

間隔と運転中止基準値の向上率の組合せが、実線上または右側にあればダウンタイムが従来の運転中止基準値の場合と同値または小さくなる。

5 考察

雨量計の設置間隔に関する考察では、雨量計の受け持ち範囲の半径 r と雨量計の設置間隔 X が $X=2r$ の関係にある（図-4）ことから、曝露率、超過関数、およびダウンタイムと雨量計の設置間隔 X で議論する。図-11 によると、曝露率、超過関数、およびダウンタイムは、従来の運転中止基準値が高いほど、運転中止基準値を向上した場合に、雨量計の設置間隔 10km の場合と同値になる設置間隔が小さい。これらが雨量計の設置間隔 10km の場合の値以下になるのは、曝露率と超過関数が図-11 に示した実線の左側の領域、ダウンタイムが実線の右側の領域である。これから、雨量計の設置間隔と運転中止基準値の向上率の組合せは、曝露率とダウンタイムの実線上またはこれらに挟まれた領域にとることで、曝露率とダウンタイムのどちらか一方を一定に保った上でもう一方を改善する、または両方を改善することができる。また、この領域では超過関数は必ず改善する。

図-12 の左図は、従来の運転中止基準値を 30mm とした場合に、安全性の評価基準である曝露率を雨量計の設置間隔 10km の場合で一定としたときに、雨量計の設置間隔と、運転中止基準値の向上率、超過関数でみた安全性の向上率、およびダウンタイムでみた安定性の向上率との関係を示したものである。また、図-12 の右図は同様に安定性の評価基準であるダウンタイムを一定にしたときに、運転中止基準値の向上率、曝露率および超過関数でみた安全性の向上率との関係を示したものである。なお、従来の運転中止基準値が 35, 40mm の場合に対する図-12 と同様な図の図示は省略するが、これらは図-12 と同様の傾向を示す。これから、雨量計の設置間隔を多くの鉄道が標準としている 10km から 5km、つまり雨量計の受け持ち範囲の半径を 5km から 2.5km に半減した場合には、従来の運転中止基準値が 30, 35, 40mm のとき、曝露率でみた安全性を一定にすると、運転中止基準値を

17, 16, 16%向上でき、超過関数でみた安全性が 34, 31, 28%向上し、ダウンタイムでみた安定性が 25, 29, 34%向上する。また、同様のとき、ダウンタイムでみた安定性を一定にすると、運転中止基準値を 8, 7, 6%向上でき、曝露率でみた安全性が 19, 21, 21%向上し、超過関数でみた安全性が 47, 45, 43%向上する。

6 おわりに

本研究では、著者ほか¹⁾²⁾³⁾による2地点の1時間降水量の降水量比および同時生起率と2地点間の距離との関係に関する研究成果を利用して、鉄道における雨量計の設置間隔と列車運転規制基準値を設定する方法を提案した。その結果、1時間降水量を列車運転規制の雨量指標にした場合には、雨量計の設置間隔と運転中止基準値の向上率の組合せとして、列車運行の安全性と安定性のどちらか一方を一定にした上でもう一方を向上できる、あるいは両方を向上できる組合せが存在することを示した。今後は、長期雨量（24時間降水量など）やJR東日本の列車運転規制に用いられている実効雨量について、同様の解析を行うことで、研究成果を実務に反映させて行きたいと考えている。

謝辞：本研究では、気象庁、国土交通省、東京都、および JR 東日本の降水量データを利用しました。それぞれの機関において観測とデータの保存・整理に従事された方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木博人, 高橋日出男: 関東平野における大雨の空間スケール-鉄道と気象庁の降水量データを用いた統計解析-, 自然災害科学, Vol.27, pp.161-173, 2008.
- 2) 鈴木博人, 中北英一, 高橋日出男: 雨量計の観測値を用いた降水量の空間代表性の解析, 水工学論文集, Vol.53, pp.391-396, 2009.
- 3) 鈴木博人, 中北英一, 高橋日出男: 鉄道における雨量計の配置間隔に関する考察, 水工学論文集, Vol.55, pp.271-276, 2011.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 仙台管区気象台調査課: 降雨特別調査観測について, 研究時報, No.26, pp.16-17, 1974.
- 7) 村上隆博, 菊井稔宏, 嶋 大尚, 清水基成: 雨量計の有効範囲に関する一考察, 砂防学会誌, Vol.61, pp.16-22, 2008.
- 8) 井良沢道也, 田口隆男: 降雨特性を考慮したテレメータ配置計画の検討, 新砂防, Vol.49, pp.22-27, 1996.
- 9) 建設省土木研究所砂防部砂防研究室: 土石流の警戒・避難基準雨量の設定に関する研究, 土木研究所資料, No.2215, 79pp, 1985.
- 10) 村石 尚, 杉山友康, 香川清治: 実効雨量による災害予測法の検討, 鉄道総研報告, Vol.9, pp.7-12, 1995.
- 11) 葛葉泰久, 友杉邦雄, 岸井徳雄: 降水量の空間相関構造, 水工学論文集, Vol.46, pp.127-132, 2002.

(2011. 9. 30 受付)