S7-2-3.　降雨時列車運転規制に用いる実効雨量指標の有効性について

正［土］　島村　誠（JR 東日本研究開発センター安全研究所）
正［土］　○友利方彦（JR 東日本研究開発センター安全研究所）

Validity of the exponential rainfall index used for train operation control

Makoto SHIMAMURA, Member　(Safety Research Laboratory,
Research and Development Center of JR East Group)
Masahiko TOMORI, Member　(Safety Research Laboratory,
Research and Development Center of JR East Group)

This study is aimed a statistical analysis in search of the optimal rainfall thresholds based on the historical records of precipitation and hazard occurrence obtained among the whole regions of East Japan Railway Company in the past 25 years.

A simple numerical model called *exponential rainfall index* is chosen as the class of rainfall measures within which the scope of our study to be restricted. In order to represent a variety of response of actual ground soil to a rainfall pattern, we considered a series of thresholds composed with one or more exponential rainfall indexes with various parameter values.

As the result of the analysis, it is corroborative that the warning costs (total warning hours and the number of false negative alarms) incurred by the current empirical alert rules used by many Japanese railways can be reduced by at least approximately 20% on average by introducing the new thresholds proposed in this study.

キーワード：列車運転規制、実効雨量、半減期
Keyword : train operation control, exponential rainfall index, half-life

1．はじめに

降雨災害を予知し、警戒態勢を整えるうえで、既往の災害事例から災害発生の限界降雨量を推定することは重要である。本論文では、降雨を誘因として生ずる鉄道災害を対象に、災害発生と降雨の関係を整理し、降雨量の観測値から災害の発生を予測し適切な警報を発するためにはどのような方法を用いるのが最も有効であるかについて検討した結果を報告する。

本検討は，以下の①～③に示す手順で行った。

① 災害の発生・非発生に対応する危険指標の探索
② 各危険指標における災害発生警報しきい値の設定
③ 設定した警報しきい値の適合性の評価（現行基準との比較）

2．危険指標の探索

現在、JR 東日本における降雨時の列車運転規制は、沿線に配置された雨量計（約 600 箇所）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る。しかし、図１に示すように 12 時間無降雨状態が継続した場合、連続雨量がリセットされ過去に降った雨の影響が突然ゼロとなる。また、12 時間連続して雨が降り止まない限り運転規制の対象降雨として扱われ続けるため、連続雨量が増加し、ある一定値を超えると少量の降雨でも規制が発令される等、合理的でない面がある。

この様な現状を踏まえ、本研究で探索すべき危険指標は、これまでに提案されている降雨災害に対する代表的な危険指標である「実効雨量」および「土壌雨量指数」[1]に限定し、これを現状の JR 東日本の降雨に対する運転規制等で用いられている危険指標である「時雨量・連続雨量」と比較した。

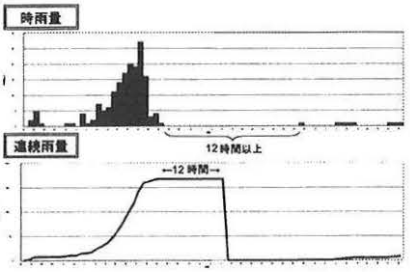

図１　現行危険指標の時雨量と連続雨量

なお、実効雨量とは、過去に降った雨の影響を考慮した積算雨量であり、時刻 t における実効雨量 R_t は降雨強度を r_t とし、過去に降った雨の影響が半分になる時間を半減期 H と定義すると、次式で表すことができる。

$$R_t = r_t + (0.5^{\frac{1}{H}}) \times R_{t-1}$$

3．危険指標の評価方法

危険指標の評価は、以下の条件で行った。

統計的決定理論による定式化にしたがい、ある期間内に行われた運転規制ルールを

災害の見逃しによる安全上の損失 (L_1)
＋　運転規制による輸送上の損失 (L_2)
の小ささによって比較する。

上記ふたつの損失は同一尺度で比較できないが、運転規制の決定しきい値を媒介としてトレードオフの関係にあるので、一方を固定したときの他方の値同士を比較することにより、ふたつの危険指標のよさを比較することができる。

L_1 の属性値として災害の見逃し件数、L_2 の属性値として警報継続時間をとり、根拠として観測期間における災害発生および降雨のデータを用いた場合、しきい値の上げ下げにともなって、L_1 は少数の離散値しかとることができないが L_2 は連続的に変化する。したがって、L_1 を固定して L_2 を比較するほうがその逆よりも感度のよい分析が期待できる（図２）。

以下、各運転規制区間について、災害見逃し件数が現行並み（非悪化）となるようにしきい値を設定した場合の警報継続時間にもとづいて危険指標のよさを比較した。

具体的には、JR 東日本管内約 600 箇所の鉄道雨量計の観測対象区間に関して過去 25 年間 (1979 年～2003 年) に収集されたデータにもとづいて、災害発生に対する警報漏れ頻度と警報継続時間の関係を調査し、これを「時雨量・連続雨量」を危険指標として用いる現行の規制基準と比較した。

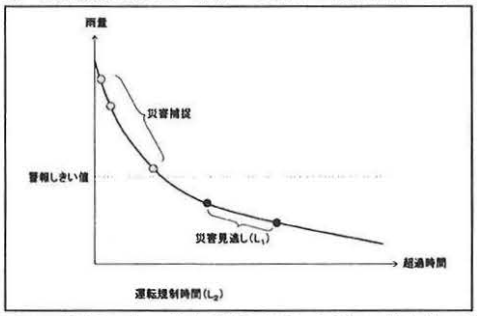

図２　警報しきい値と警報時間、見逃し災害数の関係

４．災害毎の最適半減期の分布

実効雨量を降雨災害に対する警報に用いる場合、図２に示すように災害発生に対する警報漏れ頻度と無駄な警報継続時間がともになるべく小さくなるように適切な半減期を選ぶ必要がある。

そこで、JR 東日本域内で発生した約 3,000 件の降雨災害（旧国鉄時代のものを含む）について、各災害の発生推定時刻において実効雨量による警報が正しく発せられているように警報しきい値を定めた場合に発生地点の降雨統計期間における警報継続時間が最小になる実効雨量の半減期（最適半減期）を調べた。

この調査は、まず各災害の発生推定時刻における実効雨量値を候補となる複数の半減期のそれぞれについて計算し、次いでこれを超過する値が出現する単位期間（25 年間）当たり時間数を雨量統計にもとづいて算出し、さらにこれらを各半減期について比較することにより最適半減期を決定し、最後に各半減期を最適半減期とする災害数を集計するという手順で行った（図３）。結果を表１および図４に示す。

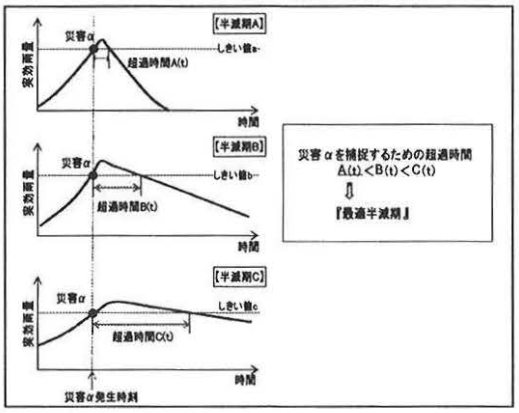

図３　最適半減期の選定

表１　災害毎の最適半減期の分布

半減期(h)	1.5	6	24	96
件数割合(%)	30	26	24	21

図４　最適半減期の分布

この結果から、最適半減期はある特定の値に集中するのではなく広い範囲にわたってほぼ一様に分布していることがわかる。また、規制区間毎の災害発生件数およびこれらの最適半減期の分布を示した図４からは、区間毎の最適半減期の分布にはバラツキが多く、系統的、特徴的な傾向は見られない。同様の分析を同じ区間をいくつかの時期に分

けても行ったが、同じ区間の発生時期を異にする災害の最適半減期の分布にも、はっきりした相関性や周期性といった特徴的な傾向はほとんど見られなかった。つまり、最適半減期の分布は、時間的にも空間的にもきわめてランダム性が強く、巨視的に見て1.5～96hを定義域とする一様分布と考えてよい結果となった。

これは、ひとくちに鉄道の降雨災害といっても、線路冠水やのり面土羽の崩壊のような主として地表水や浅い層の浸透水が誘因となるものから深い層からの築堤崩壊や地すべりのように長い時間にわたって浸透した水に起因するものまで様々であり、さらにそこに関与する地形や地質，土質条件等の素因もそれぞれに異なるという要因の多様性を反映したものであると考えられる。

5．警報継続時間の短縮効果（単独半減期）

次に、実効雨量を用いた降雨警報の有効性を検証するために、JR東日本域内約200箇所の鉄道雨量計の観測対象区間に関して収集されたデータにもとづいて、災害発生に対する警報漏れ頻度と警報継続時間の関係を調査し、これを現行の警報基準と比較した。

各半減期について、警報漏れ頻度が現行基準と等しくなるように実効雨量の警報しきい値を定めた場合の警報継続時間を現行基準のそれとの比で比較した結果を表2に示す。

この結果から、警報継続時間の短縮効果から見た最適半減期は6時間前後であること、24時間を超える長い半減期では、現行基準よりむしろ警報継続時間が増大してしまうこと等がわかる。

表2　現行警報継続時間との比較（単独半減期）

No.	半減期(h)	警報継続時間比の平均	警報継続時間比のバラツキ
1	1.5	1.08	3.26
2	3	0.75	2.89
3	6	0.66	2.99
4	12	0.74	3.32
5	24	1.00	3.46
6	48	1.48	3.87
7	96	2.61	4.66
8	土壌雨量指数	0.74	3.11

6．警報継続時間の短縮効果（組合わせ半減期）

現行の警報基準では、時雨量と連続雨量のそれぞれに警報しきい値を設定し、どちらかの観測値がしきい値を上回った場合に警報を発令し、両方の観測値のいずれもがしきい値を下回った場合に警報を解除するようにルールを定めている。

これは、前述のような鉄道降雨災害の発生要因の多様性を考慮して、短期的な降雨を発生要因とする災害にも長期的な降雨を発生要因とする災害にも適切な警報を発することができるようにするためのものである。実際、時雨量あるいは連続雨量のいずれかのみで警報基準を構成すると、警報漏れの発生頻度を同一とした場合の警報継続時間は、時雨量・連続雨量の組合わせによる場合に比べて著しく長くなってしまうことが経験的に知られている。

同様に、実効雨量の場合でも、どれかひとつの半減期を単独で用いる場合には、警報すべき災害の最適半減期が警報基準を構成する実効雨量の半減期と大きく乖離していると警報継続時間が著しく長くなってしまうという不都合があり、それは現行に対する警報継続時間比の対数分散の増大となってあらわれる。この問題を軽減する方法として、現行基準と同様に複数の半減期の実効雨量を組合わせて警報基準を構成することが考えられる。

表1に示したように、災害毎でみた最適半減期の出現確率の分布はほぼ均一なため、組合わせる半減期の範囲と個数(間隔)をどのようにきめればよいかは自明ではない。そこで、半減期の様々な組合わせについて、警報漏れ頻度が現行基準と同程度となるような警報基準を設定した場合の警報継続時間を現行基準のそれとの比の形で比較することにより、最適な半減期の組合わせを探索した。なお、異なる半減期の実効雨量を組合わせる場合の警報基準は、それぞれの半減期に対して降雨統計から推定される超過時間が等しくなるように警報しきい値を定め、実効雨量の観測値がそれらのいずれかを超過した場合に警報発令、すべてのしきい値を下回った場合に警報解除という警報ルールを仮定した。また、土壌雨量指標についても同様の方法で危険指標としての有効性について検討した（図5）。

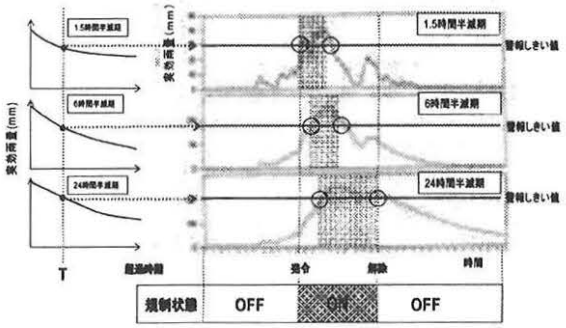

図5　しきい値の決め方及び警報発令解除方法

表3に半減期の組合わせとそれらを危険指標として用いた場合の警報継続時間を現行基準のそれに対する比で示す。

一般に複数の半減期を組合わせて用いることには、災害発生時において最適半減期に近い指標で警報を発することのできる利点と、災害非発生時において無駄な警報が生じやすくなる欠点の両方が指摘できるが、表2の結果と比較すると、異なる半減期の実効雨量を組合わせた警報基準の警報継続時間短縮効果は、概ね、それら半減期の単独での警報継続時間短縮効果の平均に近いものとなっていることがわかる。

警報継続時間の比の平均に関しては、任意の半減期に対して比が 0.5 から２の範囲内の複数の半減期を組合わせても殆ど影響がないが、それより短い半減期を組合わせた場合には警報継続時間は短縮し、より長い半減期を組合わせた場合には増大するという傾向が見られる。 一方、警報継続時間の比の対数分散でみると、組合わせる半減期の数が多いほど分散は小さくなり、警報基準としての有効性を平準化する効果があることが認められる。

表3　現行警報継続時間との比較(複数半減期組合わせ)

No.	半減期(h)	警報継続時間比の平均	警報継続時間比のバラツキ
9	1.5+6	0.69	2.74
10	1.5+12	0.68	2.71
11	1.5+24	0.76	2.50
12	1.5+48	0.84	2.43
13	1.5+96	0.94	2.49
14	3+12	0.68	2.87
15	3+24	0.75	2.64
16	3+48	0.80	2.55
17	3+96	0.88	2.51
18	6+24	0.76	2.95
19	6+48	0.82	2.85
20	6+96	0.87	2.75
21	12+48	0.91	3.17
22	12+96	0.98	3.15
23	24+96	1.27	3.47
24	1.5+6+24	0.72	2.58
25	1.5+12+96	0.78	2.43
26	3+12+48	0.76	2.61
27	6+24+96	0.90	2.80
28	1.5+6+24+96	0.79	2.39

また、土壌雨量指数については、警報継続時間比の平均では鉄道災害に対する危険指標としての有効性が大きいが、単独半減期の実効雨量と同様、対数分散が大きいことから、あてはめるデータによる有効性のバラツキが大きいという問題点が指摘できる。

警報継続時間短縮効果の平均および分散を総合的に評価すると、今回調査の対象としたデータに関する限りでは、半減期 1.5 時間と６時間のふたつの実効雨量の組合わせ(No. 9)が最適な警報基準として選択される。

一方、大規模なが け崩れや土石流を対象とした降雨警報に関する既往研究[2]や実施事例[3]においては、半減期 24 時間あるいはそれ以上の実効雨量を用いることが推奨されていることが多い。本研究で導かれた実効雨量の最適半減期がこれらと比較して小さめなのは、おそらく大規模な災害の観察されることが比較的稀な鉄道のデータをのみを対象として分析を行ったためであると考えられる。このことと、単に観測された災害のみでなく未だ発生したことはないが潜在的に発生する可能性のある災害に対しても適切な警報を発すべき警報基準の性質とを考え合わせると、24 時間あるいはそれ以上の長期半減期の実効雨量を組合わせて警報基準の冗長化を図ることは、若干の警報継続時間短縮効果の低下を我慢してもむしろ必要なことであると考えられる。

以上、JR 東日本における過去の統計データならびに鉄道以外の分野における既往研究で得られた知見を情報源とした総合的評価として、３つの半減期(1.5h+6h+24h)の組み合わせ(No. 24)が実用上最も適切な警報基準として提案できると考えられる。

7. 実効雨量による運転規制の適用性の評価

以上の検討にもとづき、次に示すふたつの比較を行い、実効雨量指標の運転規制への適用性を評価した。

①各運転規制区間の災害の捕捉性が現行並みとなるようにしきい値を設定した場合の警報継続時間の比較

②各運転規制区間の規制時間が現行並みとなるようにしきい値を設定した場合の警報漏れ件数の比較

結果を図６に示す。この結果から、提案ルールに述べた雨量指標の変更に伴って期待できる運転規制の改善効果（災害捕捉性の向上・警報継続時間削減）は、現行ルールに対して概ね１割強～３割弱のレベルであると推定できる。

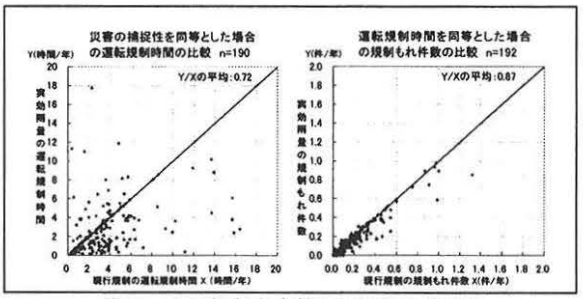

図６　現行規制と実効雨量指標における
警報継続時間比と警報漏れ件数の比較

8. まとめ

鉄道災害発生と降雨の関係について調査し、降雨災害に対する適切な警報基準を構成する方法について検討した。その結果、複数の半減期の実効雨量を組合わせた危険指標を用いる方法が災害に対する警報漏れと無駄な警報時間を削減する上で有効であることが明らかになった。

参考文献

1) 岡田憲治ほか『土壌雨量指数』天気 Vol. 48, No. 5, pp59-66, 2001

2) 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. 16-26, 1981

3) 建設省河川局砂防部砂防課『土石流災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針（案）』pp. 1-9, 1984