

斜面对策投資における鉄道事業者のリスク評価特性の計測

A Measurement of Cognitive Functions against Slope-Failure Risk on Railway Infrastructure Investment

柴崎隆一*, 大川剛思**, 家田 仁***

By SHIBASAKI Ryuichi*, OKAWA Goushi**, and IEDA Hitoshi***

1. はじめに

地震・洪水・斜面災害・交通事故など各種の災害・事故リスクは、その生起頻度や災害1件あたりの被害額が様々であり、防災・事故防止施設の整備水準を決定するにあたって、投資による便益をどのように評価するかについては多くの議論が存在する。最も一般的な評価指標としては、投資前後の期待被害額の差で表される期待被害軽減額が考えられるが、特に、相当な不確実性を伴う稀少頻度リスクや、カストロフィックな被害をもたらすリスクにおいては、期待被害軽減額による投資評価は不適切であるという指摘も多い¹⁾。このような特徴を持つ災害・事故リスクを評価する手法については、理論レベルでは問題点の整理がそれなりに進みつつあるものの²⁾、実際に投資を行うインフラ管理組織においては、明示的に考慮する必要性がようやく認識されはじめた段階にあるといえる³⁾。しかしながら、これまで現実に行われてきた数多くの防災投資においては、明示的であるかどうかはともかくとして、何らかの形でこのような災害・事故リスクの特徴を考慮しつつ、整備水準が決定されてきたものと考えられる。そこで本稿は、降雨による斜面災害防止の目的で鉄道事業者が行った防災投資実績をもとに、鉄道事業者が斜面災害リスクをどのように評価してきたのかという、「斜面災害リスクに対する鉄道事業者のリスク評価特性」を計測することを目的とする。

2. リスク評価特性計測の枠組

あるひとつの災害・事故リスクにおいて、災害（または事故、以下略）の状態 s ごとに、防災施設整備水準が z のときの災害の年間生起確率を $\pi^z(s)$ 、被害額を $D^z(s)$ と定義する。このとき、投資前の防災施設整備水準を $z = z^0$ 、投資後の水準を $z = z$ とすれば、この防災投資による期待被害軽減額 $\Delta E[D^z]$ は(1)式のように表される。

$$\Delta E[D^z] = \int_0^\infty p^{z^0}(s) \cdot D^{z^0}(s) ds - \int_0^\infty p^z(s) \cdot D^z(s) ds \quad (1)$$

しかしながら、意思決定者が主観的に評価する災害リスクの生起確率や被害額は、以下に示すような理由から、

機械的に求められるような実際の確率 $\pi^z(s)$ や被害額 $D^z(s)$ とは異なってくると考えられる。なお、ここでいう意思決定者とは、潜在的な社会ニーズも踏まえ、当該インフラ管理組織内において実質的な最終判断を担う個人またはグループと定義する。

1) 災害の生起頻度に関する評価特性

特に発生頻度が稀少である災害ほど、発生頻度に関する情報の不足・偏りのために、得られる情報から意思決定者が主観的に判断する確率と、客観的に正しいと考えられる確率にずれが生じたり（ベイズ論的主観確率の考え方）、そもそも稀少確率現象に対する判断や意思決定が通常のそれとは異なったりする（究極の場合は、被害の大きさのみに注目して生起確率の大小を全く無視したり、逆に生起確率をゼロとみなしたりする）ために、意思決定者が主観的、あるいは潜在意識下において評価する生起確率 $f(\pi^z(s))$ と、客観的データから機械的に求められる生起確率 $\pi^z(s)$ の乖離が大きくなると考えられる⁴⁾。以降では、潜在意識下における評価にも着目することを明確にするために、 $f(\pi^z(s))$ を「認知確率」、 $\pi^z(s)$ を「実確率」とよぶこととする。

2) 災害の被害額に関する評価特性

たとえば鉄道斜面災害リスクについてみれば、斜面災害による損害のうち、崩壊土砂の除去・復旧費用、災害発生区間の不通による収入損失、列車が斜面災害に巻き込まれることによる車両の被害などや、あるいは斜面对策投資の費用は、第一義的に鉄道事業者の負担するものである（最終的には鉄道利用客全体の負担となる）。これに対し、運転中止によって移動が制約されることによる時間損失や列車被災時の死傷被害等は、鉄道事業者などから完全な補償を受けない限り、利用者自身が負担しなければならない損害である。時間損失や死亡被害を完全に補償する制度等は現実の社会には存在しないので、少なくともこれらの被害の一部は、たまたま災害発生場所周辺に居合わせただけの少数の利用者が、最終的に被害を負担することになる。ここで、通常の災害リスクに対する議論と同様に、各利用者がリスク回避型の効用関数を持つと仮定すると、所有資産を固定した場合、ひとりあたりの被害額が増加するにつれて各利用者の限界不効用も増加する⁵⁾。そのため、総被害額が同じ災害であっても、それを少数の利用者で負担した場合は、鉄道利用者全体で負担する場合にくらべ、社会全体の総不効用が

キーワード：計画基礎論，公共事業評価法，防災計画

*正会員,工博,国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾システム研究室, **学生会員,東京大学社会基盤工学専攻, ***正会員,工博,東京大学社会基盤工学専攻教授

(〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬 3-1-1,

tel/fax : 0468-44-5028, shibasaki-r92y2@ysk.nilim.go.jp)

大きくなるものと考えられる。以上の考察より、(第一義的に利用者が負担するという意味で)インフラ管理組織にとっての間接被害額 D_s についてみると、意思決定者が考慮する間接被害額 $L(D_s)$ は、客観的データから機械的に積み上げられた間接被害額 D_s とは異なってくるものと考えられる。以降では、 $L(D_s)$ を「認知被害額」、 D_s を「実被害額」とよぶことにする。

3) リスク評価特性を考慮した防災施設整備水準決定行動の定式化

以上の議論を踏まえて、意思決定者のリスク評価特性を介した期待被害軽減額 $\Delta E[L^z]$ を(2)式のように表す。ここで D_d は、インフラ管理組織にとっての直接的被害額を表す。また、本研究においては、インフラ管理組織の規模は十分大きく、インフラ管理組織自身の損失についてはリスク中立的に決定を行うと仮定している。

$$\Delta E[L^z] = \int_0^\infty f(p^{z^0}(s)) \cdot \{D_d^{z^0}(s) + L(D_s^{z^0}(s))\} ds - \int_0^\infty f(p^z(s)) \cdot \{D_d^z(s) + L(D_s^z(s))\} ds \quad (2)$$

このとき、このインフラ管理組織にとって最適な防災施設整備水準 z^* は(3)式で表される。

$$z^* = \arg \max_z \left\{ \sum_{t=0}^{T-1} \frac{\Delta E[L^z]}{(1+i_r)^t} - C^z \right\} \quad (3)$$

ここで、 T は供用期間(年)、 i_r は割引率、 C^z は防災施設整備水準を z^0 から z に引き上げるのに要する費用である。

3. 分析の対象

1) 斜面对策投資と運転中止雨量

斜面災害対策は鉄道事業者にとって今なお重要な問題である。たとえば、東日本旅客鉄道管内において平成11年度に発生した161件の自然災害のうち、約半数が斜面に関する災害(倒木を除く)であった。また実際に災害が発生しなくても、降雨量が一定値に達すると運転規制が行われるため、利用者の移動が制約されることになる。たとえば、北関東地域に大被害をもたらした1998年8月の集中豪雨の際、中央本線高尾以西の区間においては、結果として斜面災害が一度も発生しなかったにもかかわらず、5日間にわたる断続的な運転規制によって延べ619本の列車が運休し、約18万人の利用者に影響を与えるなど社会的に大きな反響をもたらした⁵⁾。この事態を受けて緊急に行われた中央本線集中対策工事の後に運転規制値が引き上げられ、その結果、運転規制の日数・回数ともに半減した⁶⁾。このように、鉄道斜面对策投資の効果は、運転規制値の向上という形であらわれるのが最も一般的である。そこで本研究は、上記の中央本線の8区間で行われた斜面对策投資を対象とし、防災施設整備水準の間接指標と考えられる運転規制値を決定する際の、意思決定者のリスク評価特性を計測することとする。ただし、ここで考慮する運転規制値としては、運転中止雨量のみを考える。

2) 斜面災害による各被害の定義

本研究では、斜面災害によりもたらされる被害として、以下に示す6種類を考える。ただし以下では、斜面100mを一単位として被害額や生起頻度を算出している。

(1) 崩壊土砂の除去・復旧費用 D_a

災害復旧工事費用の実績値より、斜面对策投資の有無別に(4)式のように与えた。なお、災害発生時の降雨量と復旧費用には明確な関係が認められなかった。

$$D_a^o = 8.39 \text{ (投資済)}, D_a^w = 3.79 \text{ (未投資)} \text{ (百万円)} \quad (4)$$

(2) 不通による運賃収入の減少額 D_b

当該区間の運賃収入を fare_i (百万円/day・人)、輸送人員を flow_i (人/day)、不通期間を sus とすると、(5)式のように表される。

$$D_{bi} = \text{fare}_i \cdot \text{flow}_i \cdot \text{sus} \quad (5)$$

ただし不通期間 sus は、データの都合上1日に固定した。

(3) 事故の発生による人身・車両損失

列車が斜面災害に巻き込まれた場合の被害としては、車両損失・乗客の死亡・乗客の負傷の3種類が考えられる。それぞれの被害額 D_{c1}, D_{c2}, D_{c3} は、インタビュー調査等をもとに(6)式のように設定した。

$$D_{c1} = 100, D_{c2i} = p_{\text{death}} \cdot \frac{\text{flow}_i}{n_i} \cdot 33.2,$$

$$D_{c3i} = (1 - p_{\text{death}}) \cdot \frac{\text{flow}_i}{n_i} \cdot 0.88 \text{ (百万円)} \quad (6)$$

ここで n_i は列車本数(本/day)、 p_{death} は事故列車の旅客の死亡割合(過去の実績から0.072とした)である。

(4) 運転中止に伴う乗客の時間損失 D_s

運転規制による運転中止時間は数時間程度であり、災害発生による不通時間よりもオーダーが短いことから、この場合利用者は全員鉄道の運転再開を待つものと仮定し、乗客の時間損失を(7)式のように定義する。

$$D_{si} = v \cdot \text{flow}_i \cdot \text{ss} \quad (7)$$

ここで v は利用者の時間価値(百万円/h)、 ss は運転規制による運転中止時間である。ただし、 ss は一律4時間とした。以上の6つの被害アイテムのうち、鉄道事業者にとっての直接的被害は、土砂の除去・復旧費、収入損失、車両損失の3つであり、残りの3つは、第一義的には利用者が負担する被害といえる。

3) 被災の状態と発生頻度

はじめに、斜面对策投資が行われる以前、すなわち防災施設整備水準 z^0 の状況を考える。このときの斜面災害の発生頻度 π_{iz^0} は、降雨量 q (mm) の年間出現頻度 $\varphi_i(q)$ 、降雨量別・投資有無別に定義される土砂崩壊の発生確率 $p^w(q)$ 、 $p^o(q)$ 、投資有無別の斜面距離 l^w_i 、 l^o_i (単位は100m) によって、(8)式のように表される。

$$p_i^{z^0} = \int_{30}^{400} \{p^w(q) \cdot l_i^w + p^o(q) \cdot l_i^o\} \cdot f_i(q) dq \quad (8)$$

ここで降雨量の年間出現頻度 $\varphi_i(q)$ は、対象区間に最も近いアメダスの観測データから(9)式によって推定した。ここで、 a_i 、 b_i は各区間ごとに異なるパラメータである。

$$f(q) = a_i \cdot q^{-b_i} \quad (9)$$

また、降雨量別・投資の有無別の土砂崩壊の発生確率 $p^w(q)$ 、 $p^o(q)$ は、過去3年分(1997-1999)のJR東日本における斜面災害履歴とそのときの降雨量より、(10)式のように求めた。

$$p^w(q) = 1.09 \cdot 10^{-7} \cdot q^2 + 1.13 \cdot 10^{-5} \cdot q, \\ p^o(q) = 3.49 \cdot 10^{-5} \cdot q \quad (10)$$

次に被災の状態別の発生頻度の算出方法を以下に示す。ここで被災の状態とそのとき発生する被害を表1に示す。

表1 被災の状態と被害の種類

被災の状態	発生する被害
1 斜面災害(列車事故あり)	$D_a^w, D_a^o, D_b, D_{c1}, D_{c2}, D_{c3}, D_s$
2 斜面災害(列車事故なし)	D_a^w, D_a^o, D_b, D_s
3 運転中止(斜面災害なし)	D_s

(1) 斜面災害(列車事故あり)の発生頻度 π_1

斜面災害が生じたときまさにその場所に列車が存在する頻度を考えれば、災害発生斜面を通過するのにかかる時間を $t(h)$ として、(11)式のように定義される。

$$p_{1i}^{z^0} = \frac{n_i \cdot t}{24} \cdot p_i^{z^0} \quad (11)$$

ここで列車の時速を50kmと仮定し $t = 0.002$ とする。

(2) 斜面災害(列車事故なし)の発生頻度 π_2

$\pi_1^{z^0}, \pi_1^{z^0}, \pi_2^{z^0}$ の定義より(12)式で表される。

$$p_{2i}^{z^0} = p_i^{z^0} - p_{1i}^{z^0} \quad (12)$$

ただしここでは、計算の簡略化のため、同一区間において斜面災害は一箇所しか発生しないと仮定している。

(3) 運転中止(斜面災害なし)の発生頻度 π_3

当該区間における運転中止雨量を $Q_{i,z^0}(mm)$ とすれば、その年間出現頻度 $\pi_{si}^{z^0}$ は、(13)式で表される。

$$p_{si}^{z^0} = \int_{Q_{i,z^0}}^{400} f_i(q) dq \quad (13)$$

計算の簡略化のため運転中止雨量以下で斜面災害が発生する可能性を無視すれば、 $\pi_{3i}^{z^0}$ は(14)式で表される。

$$p_{3i}^{z^0} = p_{si}^{z^0} - p_i^{z^0} \quad (14)$$

4) 斜面对策投資による生起頻度の変化

未投資斜面に対して斜面对策投資が $\Delta l_i(100m)$ だけ行われ、防災施設整備水準が z に改善された状況を考える。このとき、運転中止雨量の年間出現頻度 π_{si}^z の変化量

$$\Delta p_{si}^z = p_{si}^{z^0} - p_{si}^z = \int_{Q_{i,z^0}}^{Q_{i,z}^0} f_i(q) dq \text{ と } \Delta l_i \text{ の間には正の相関}$$

関係があるものと考えられる。その関係式としては、いくつかの候補のうち(15)式に示したものが最も相関係数が高い結果となった(ここで α_1, α_2 は投資実績より得られるパラメータで、中央本線の場合、 $(\alpha_1, \alpha_2) = (0.010, 5.94)$ となる)。この理由としては、実際の斜面においてはその災害発生頻度は様々であり、かつ発生頻度が相対的に大きい斜面は比較的少数と想定されることから、投資進捗率の増加に対して斜面对策投資の限界効果が逓減するためと考えられる。

$$\Delta p_{si}^z = \alpha_1 \cdot \ln \left(\alpha_2 \cdot \frac{\Delta l_i}{l_i^o} \right) \quad (15)$$

この投資によって改善された斜面災害の生起頻度 $\pi_{i,z}$ は(16)式で表される。

$$p_i^z = \int_{30}^{400} \{p^w(q) \cdot (l_i^w - \Delta l_i) + p^o(q) \cdot (l_i^o + \Delta l_i)\} \cdot f_i(q) dq \quad (16)$$

また、このときの被災の状態別の発生頻度 $\pi_{1i}^z, \pi_{2i}^z, \pi_{3i}^z$ についても、(11)~(13)式と同様に定義される。なお、本研究においては、斜面对策投資によって各被害額は一切変化しないものと仮定する。

5) 斜面对策投資の費用

斜面对策投資費用 C_i^z (百万円)は、(17)式に示すように、投資斜面距離 Δl_i に比例するものと仮定し、投資実績より $c = 29.4$ (百万円/斜面100m)とした。

$$C_i^z = c \cdot \Delta l_i \quad (17)$$

4. 斜面災害リスクにおける評価特性の計測

1) リスク評価関数の推定方法

前章の議論を踏まえると、斜面災害リスクにおける、意思決定者のリスク評価特性を介した期待被害軽減額 $\Delta E[L_i^z]$ は、(18)式のように表される。

$$\Delta E[L_i^z] = f(p_{1i}^{z^0}) \cdot \{D_{ai}^{z^0} + D_{bi} + D_{cl} + L(D_{c2i} + D_{c3i} + D_{si})\} \\ + f(p_{2i}^{z^0}) \cdot \{D_{ai}^{z^0} + D_{bi} + L(D_{si})\} + f(p_{3i}^{z^0}) \cdot L(D_{si}) \\ - f(p_{1i}^z) \cdot \{D_{ai}^z + D_{bi} + D_{cl} + L(D_{c2i} + D_{c3i} + D_{si})\} \\ - f(p_{2i}^z) \cdot \{D_{ai}^z + D_{bi} + L(D_{si})\} - f(p_{3i}^z) \cdot L(D_{si}) \quad (18)$$

ここで D_{ai}^z は崩壊土砂の除去・復旧費の平均値で、(19)式のように表される。

$$D_{ai}^z = \frac{\int_{30}^{400} p^w(q) \cdot (l_i^w + \Delta l_i) \cdot f_i(q) dq}{p_i^z} \cdot D_{ai}^w \\ + \frac{\int_{30}^{400} p^o(q) \cdot (l_i^o - \Delta l_i) \cdot f_i(q) dq}{p_i^z} \cdot D_{ai}^o \quad (19)$$

このとき、鉄道事業者は、(20)式に示すように、防災施

設整備水準 z の間接指標である運転中止雨量の発生頻度 π_{si}^z を決定するものと考えられる。

$$\max_{p_{si}^z} \left\{ \sum_{t=0}^{T-1} \frac{\Delta E[L_i^z]}{(1+i_r)^t} - C_i^z \right\} \quad (20)$$

そこで、(20)式より得られる運転中止雨量の発生頻度の推定値 $\hat{\pi}_{si}^z$ と実測値 π_{si}^{z*} を比較し、中央本線の全8区間における両者の誤差二乗和が最小となるようなリスク評価関数を推定する。すなわち、

$$\min_{f, L} \sum_i \left(\hat{p}_{si}^z - p_{si}^{z*} \right)^2 \quad (21)$$

(21)式によって推定する生起頻度認知関数 $f(\pi)$ と間接被害額認知関数 $L(Ds)$ の関数形としては、本来は何らかの非線型関数を想定すべきであるが、以下の計算では簡単のため、下式に示すように、それぞれ実生起頻度と実被害額の一次関数を仮定した。

$$f(p) = b \cdot p, \quad L(Ds) = l \cdot Ds \quad (22)$$

ここで、 β , λ は非負のパラメータである。

2) リスク評価関数の推定結果

各線区ごとに得られる l_{wi} , l_{ci} , a_i , b_i , $fare_i$, n_i , $flow_i$ (具体的な数値は紙面の都合上省略する) から、各被災状態の被害額や生起頻度を求め、これを(18)式、さらには(20)式、(21)式に代入することによって、(22)式中の未知パラメータ β , λ を求めた。推定されたリスク評価関数を図1に示し、このときの運転中止雨量の発生頻度の推定値 $\hat{\pi}_{si}^z$ と実測値 π_{si}^{z*} の比較を図2に示す。図2によって、本研究の提案するモデルが、現状の投資行動を十分に説明可能なことが確認できた。また、リスク評価関数を何も考慮しなかった場合とのAICの差が29.89となり、本研究の対象である斜面对策投資における防災施設整備水準決定行動は、意思決定者のリスク評価特性を考慮することによって、説明力が有意に向上することもわかった。図1に示された結果をみると、実際の年間出現頻度が0.6件以下という斜面災害リスクにおいては、鉄道事業者は出現頻度を実際の出現頻度より若干小さく見積もっていることがわかる。また、最大で100億円程度である間接被害については、実際の被害額を3倍以上大きく見積もっている。この被害額に関するリスク評価特性の計測結果は、これまで筆者らが行ってきた他の災害・事故リスクにおける計測結果^{7), 8)}や、前出の治水経済調査マニュアル³⁾中の記述とも概ね傾向が一致する。また、斜面災害リスクの生起頻度(正確には「運転中止」の発生頻度)は、他の災害リスクに比べると高頻度であるため、認知生起頻度と実生起頻度の乖離が比較的小さい結果となったと考えられる。

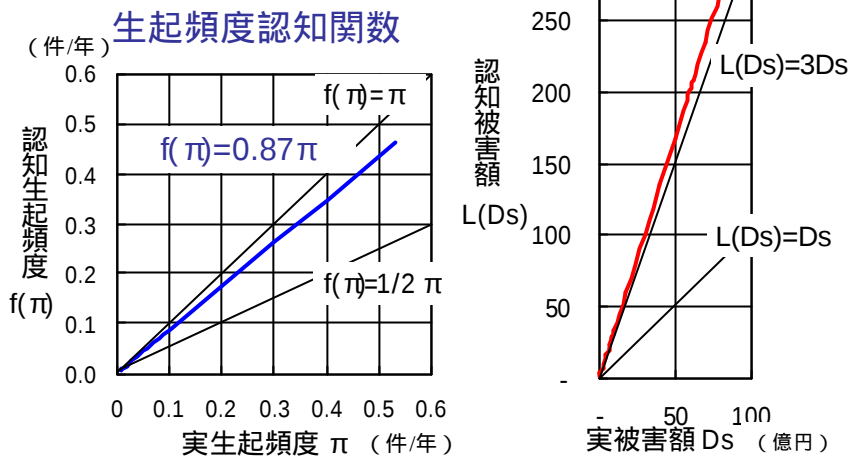


図1 推定されたリスク評価関数

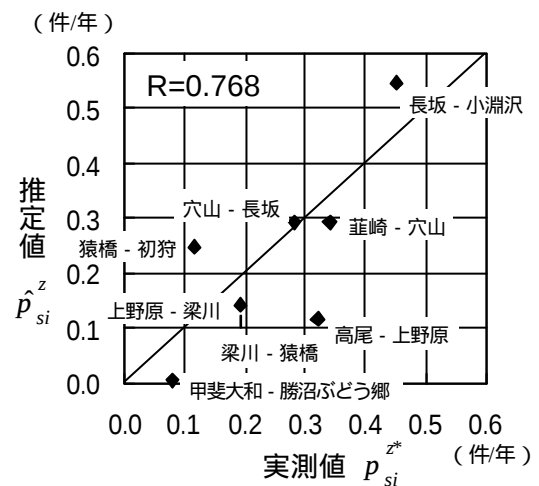


図2 中央線各区間の運転中止雨量の年間発生頻度の実測値と本モデルによる推定値の比較

謝辞

本研究の遂行にあたって、JR 東日本安全研究所の島村主幹をはじめとする多くの方々に、データ提供等のご支援を頂いた。この場を借りて感謝申し上げる。

参考文献

- たとえば、小林潔司・横松宗太、治水経済評価のフロンティア：期待被害額パラダイムを越えて、河川技術に関する論文集，第6巻，pp.237-242，2000.
- たとえば、小林潔司・横松宗太，災害リスクマネジメントと経済評価，土木計画学研究・講演集，Vol.24，招待論文，2001.
- たとえば、建設省河川局，治水経済調査マニュアル（案），p.70，2000.
- たとえば、松原望，意思決定の基礎 第2章，朝倉書店，2001.
- 家田仁・柴崎隆一，社会制度と交通システムの総合的安全性（それは足からはじまった - モビリティの科学 - 第7章6節），技報堂出版，pp.306-316，2000.
- 東日本旅客鉄道株式会社八王子支社，中央線降雨防災強化対策工事記録，2001.
- 柴崎隆一・家田仁，稀少確率・甚大被害現象を対象としたリスク評価における認知バイアスの計測，土木計画学研究・論文集，Vol.17，pp.381-391，2000.
- SHIBASAKI, R., et al., Measurement of Cognitive Effects Against Disaster / Accident Risk from Actual Social Investments, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4(6), pp.243-258, 2001.