

# 博 士 論 文

## 鉄道線路への土砂流入災害防止のための 溪流の危険度評価に関する研究

(Risk assessment to prevent the sediment inflow to railway tracks  
originating from the mountain stream)

2020 年 3 月

立命館大学大学院理工学研究科  
環境都市専攻博士課程後期課程

森 泰樹

立命館大学審査博士論文

鉄道線路への土砂流入災害防止のための  
溪流の危険度評価に関する研究

(Risk assessment to prevent the sediment inflow to railway tracks  
originating from the mountain stream)

2020 年 3 月  
March 2020

立命館大学大学院理工学研究科  
環境都市専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Architectural,  
Environmental and Civil Engineering  
Graduate School of Science and Engineering  
Ritsumeikan University

森 泰樹  
MORI Taiki

研究指導教員 : 里深 好文 教授  
Supervisor : Professor SATOFUKA Yoshifumi



## 博士論文要旨

厳しい地形や地質の条件下にある我が国では、住宅、鉄道、道路等の多くの社会インフラが、豪雨による甚大な被害を受けてきた。近年では、全国各地で局地的な大雨や、観測史上最大となるような豪雨が頻繁に観測される等、降雨強度が一段と高まる傾向にあり、さらなる被害規模の拡大も懸念されている。

鉄道の降雨災害の一つに、溪流からの土砂流入がある。鉄道に被害をもたらした土砂流入の多くは小規模なものであるが、それらによって重大な事故が発生する可能性は高い。そのため、鉄道では小規模な土砂流入を防止することが重要な課題となっている。しかしながら、線路沿線には膨大な数の溪流が存在し、それらの流域は鉄道管理用地外にもおよぶため、危険度評価には多くの時間や困難を伴う。また、溪流には、地形、溪床や溪岸斜面の荒廃状態等の様々な要因が混在することから、調査者の危険度判断能力によって評価結果にばらつきが生じる可能性がある。そこで本研究では、線路近傍の溪流を発生源とする土砂流入の危険度を、簡易な調査等により効率的かつ効果的に評価できる手法について論じた。具体的には、過去に土砂流入をもたらした溪流等のデータに基づく統計解析を行い、溪流の危険度を評価する採点表等を作成した。また、合わせて数値標高モデルを利用したマクロな危険溪流の抽出方法を提案した。

なお、鉄道では、降雨災害から列車事故を未然に防ぐために、降雨時における運転規制を実施している。近年では、増加傾向にある局地的な大雨をとらえることを目的に、鉄道事業者は線路直上の解析雨量を降雨時における運転規制に利用し始めている。一方、土砂流入を防止するためには、溪流の流域内の降雨量を観測して降雨時における運転規制を実施していくことも必要といえる。本研究では、過去に発生した土砂流入災害の事例等に基づき、溪流の流域面積や線路から流域の最遠部までの距離を明らかにした上で、解析雨量を用いて降雨の面的な距離依存性に着目した分析を行った。その結果、被害をもたらす流域の最遠部までの距離は約 1.3km であり、この距離であれば、線路直上のメッシュの降雨量との相関性が高く、保全対象物の直上の解析雨量を用いればよいことがわかった。

# Abstract of Doctoral Dissertation

In Japan, under severe topographical and geological conditions, several social infrastructures, such as housings, railways, and roads, have been severely damaged by heavy rainfall. Recently, rainfall intensity tends to increase, which further results in concern about the increase of such damages. Even small-scale sediment inflow from mountain streams owing to the rain can cause major disasters in the railway infrastructures. Preventing these disasters is an important task for railways. However, evaluating these risks is extremely time-consuming and challenging because of numerous mountain streams along the railway and the location of their watersheds located far from the railway sites. Further, the complexity of various conditions in the watershed may lead to variation in the risk judgment ability. This study presents an easy method for assessing the risk of sediment inflow to railway tracks from mountain streams. In particular, we statistically analyzed the data of disastrous and non-disastrous mountain streams, and we created a scoring table to evaluate mountain streams.

Recently, rainfall analysis of 1 km<sup>2</sup> area has been introduced in railway operation regulations. To prevent sediment inflow disasters, observing rainfall in the watershed of the mountain stream is also necessary. In this study, we clarified the size of the watershed and distance from the railway of the mountain stream as important parameters determining the risk of disaster. We analyzed our dataset focusing on the distance dependency of rainfall during the disaster. Our results indicate that the distance from the railway to the furthest part of the watershed is about 1.3 km. Because the correlation between the precipitation amount of the mesh just above railway and that of the area within 1.3 km from railway is high, analysis of the rainfall directly above the maintenance object can be used as a measure of the risk.

## 目 次

### 第 1 章 序論

1.1 研究の背景と目的 .....	1
1.2 既往の研究 .....	9
1.3 研究内容と本論文の構成 .....	11

### 第 2 章 鉄道への土砂流入被害と災害防止の現状と課題

2.1 鉄道災害の実態 .....	17
2.1.1 自然災害の発生状況 .....	17
2.1.2 JR 西日本における土砂流入災害の実態 .....	21
2.1.3 土砂流入災害の事例 .....	31
2.2 鉄道における斜面防災対策の現状 .....	39
2.2.1 鉄道施設の検査と健全度判定 .....	39
2.2.2 カルテの作成・更新時における調査と評価 .....	44
2.2.3 降雨量に基づく運転規制による事故防止 .....	49
2.3 土砂流入災害防止のための課題 .....	49

### 第 3 章 過去の被災事例分析に基づく線路近傍溪流の危険度評価に関する研究

3.1 目的と概要 .....	53
3.2 溪流調査に基づく実態分析 .....	54
3.2.1 溪流の定義 .....	54
3.2.2 溪流に関する条件の統計値 .....	58
3.3 危険度評価のための採点表の提案 .....	70
3.3.1 溪流調査結果に基づく一次解析 .....	70
3.3.2 溪流調査結果に基づく一次解析の精度分析 .....	76
3.3.3 危険度の高い要因を有する溪流を考慮した二次解析 .....	78
3.3.4 危険度の高い要因を有する溪流を考慮した二次解析の精度分析 .....	90

3.3.5	危険度評価手法の提案 .....	92
3.4	本章のまとめ .....	95
 <b>第4章 現場技術者のための溪流調査方法と危険度評価手法の提案</b>		
4.1	目的と概要 .....	98
4.2	通常全般検査のための調査方法と危険度評価 .....	99
4.3	カルテ範囲における溪流の危険度評価 .....	106
4.3.1	危険度評価の流れ .....	106
4.3.2	溪流からの土砂等流出の危険度評価 .....	107
4.3.3	列車運行への影響度評価 .....	107
4.3.4	カルテ範囲における調査のための危険度評価手法 .....	117
4.3.5	溪流の危険度評価手法の適用性の検証 .....	118
4.4	数値標高モデルによるマクロな危険溪流抽出手法 .....	121
4.4.1	溪流上流域の危険度評価の必要性 .....	121
4.4.2	数値標高モデルの概要 .....	121
4.4.3	既往の研究 .....	124
4.4.4	DEM を用いた評価手法の概要 .....	125
4.4.5	現地調査と DEM から取得したデータの比較 .....	127
4.4.6	DEM を利用した採点表の提案 .....	144
4.4.7	DEM を利用した評価手法の有効性の検証 .....	145
4.4.8	上流域に対する溪流からの土砂等流出の危険度評価手法の提案 ...	148
4.5	採点表および DEM を利用した採点表の適用性の検証 .....	149
4.5.1	採点表の適用性の検証 .....	149
4.5.2	DEM を利用した採点表の適用性の検証 .....	151
4.5.3	採点表および DEM を利用した採点表の適用性に関する考察 .....	152
4.6	本章のまとめ .....	153

第5章 土砂流入災害による列車事故防止を対象とした降雨モニタリングに関する研究	
5.1 目的と概要	158
5.2 降雨量に基づく運転規制方法	159
5.2.1 鉄道における降雨時運転規制	159
5.2.2 JR西日本における降雨時運転規制の現状	160
5.3 面的雨量情報を利用した降雨モニタリングの実態	164
5.3.1 局地的な大雨の発生状況	164
5.3.2 解析雨量の利用に向けた検討	165
5.4 災害溪流における流域の大きさと線路から流域最遠部までの距離	168
5.4.1 分析概要	168
5.4.2 分析結果	169
5.5 鉄道に土砂流入災害をもたらした降雨量の距離依存性の分析	171
5.5.1 分析概要	171
5.5.2 災害地点等の最大降雨量に着目した分析	174
5.5.3 降雨の経時変化を考慮した分析	179
5.5.4 面的な分析結果	184
5.5.5 方向に着目した降雨量の距離依存性	186
5.6 土砂流入災害を対象とした降雨モニタリングの提案	188
5.7 本章のまとめ	191
第6章 結論	195
付属資料（解析に用いた溪流データ一覧）	199
謝辞	206

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景と目的

日本は、北半球の中緯度に位置する面積約 38 万 km<sup>2</sup> の小さな島国であり、その約 3 分の 2 が山地で形成されている。山地は急峻で谷によって細かく刻まれ、地質は脆弱で複雑な構造を呈している。また、日本の国土のほとんどは温帯に含まれ、季節風の強い影響を受けて、夏季には太平洋側を中心に多くの雨が降り、冬季には日本海側を中心に多くの雪が降る。さらに、4 つのプレートの衝突部にある日本列島では、規模の大きな地震が頻繁に発生し、火山噴火も度々起こる。

こうした厳しい地形、地質、自然条件下にある我が国では、毎年のように豪雨、豪雪、地震および火山噴火等による災害が発生し、住宅、学校、病院等の生活基盤施設や鉄道、道路、港湾、上下水道等の産業基盤施設といった多くの社会インフラが甚大な被害を受けてきた。国がまとめた 1982 年以降の土砂災害に関する統計データによると、土砂災害によって被害を受けた家屋や公共施設の年間平均件数は 1000 件を超えている<sup>1)</sup>。

社会インフラの一つである鉄道は、国土全域に整備され、その歴史も比較的長いことから、これまで多くの自然災害に見舞われてきた。鉄道路線の建設は、1872 年の新橋・横浜間の開通を第一歩として急速に進み、昭和初期までに現在の路線網の大部分が完成した。その当時は、高い技術力と高額な建設費が必要となる橋りょうやトンネルの建設は極力避けられ、盛土や切土といった土構造物が多く採用されたことから、鉄道沿線には膨大な数の土構造物があり、それらのなかには建設後 100 年を超えるものもある。図-1.1 に、鉄道における土木構造物の構成比率<sup>2)</sup>を例示する。在来線では、土構造物や斜面等で構成される区間（以下、土工区間という）が 87%を占めており、新幹線では、土工区間が東海道新幹線において 53%、山陽新幹線において 13%を占めている。また、国土の地形的な特徴から、山間部に建設された鉄道路線が多く、鉄道沿線には急崖や溪流を含む膨大な数の自然斜面が存在する。こうした背景から、鉄道は、過去より盛土崩壊、切土崩壊、落石および土砂流入・土石流等の様々な自然災害を経験し、これらの災害やそれに伴い発生した列車事故から得た教訓を積み重ねて、安全を確保するための様々な施策を講じてきた。

昭和中期頃までに建設された鉄道の盛土や切土は、安価で施工できる、また被害を受けても早期に復旧ができるといった利点を持つ反面、耐久性を求めて建設された構造物ではなかった。そのため、その当時は災害が発生した後に復旧対策工事を実施する、いわゆる事後防災方式がとられていた。しかし、東海道新幹線の建設で盛土の締固め方法が管理されたことを契機として徐々に設計基準が整備されたこと、また輸送量の増大や

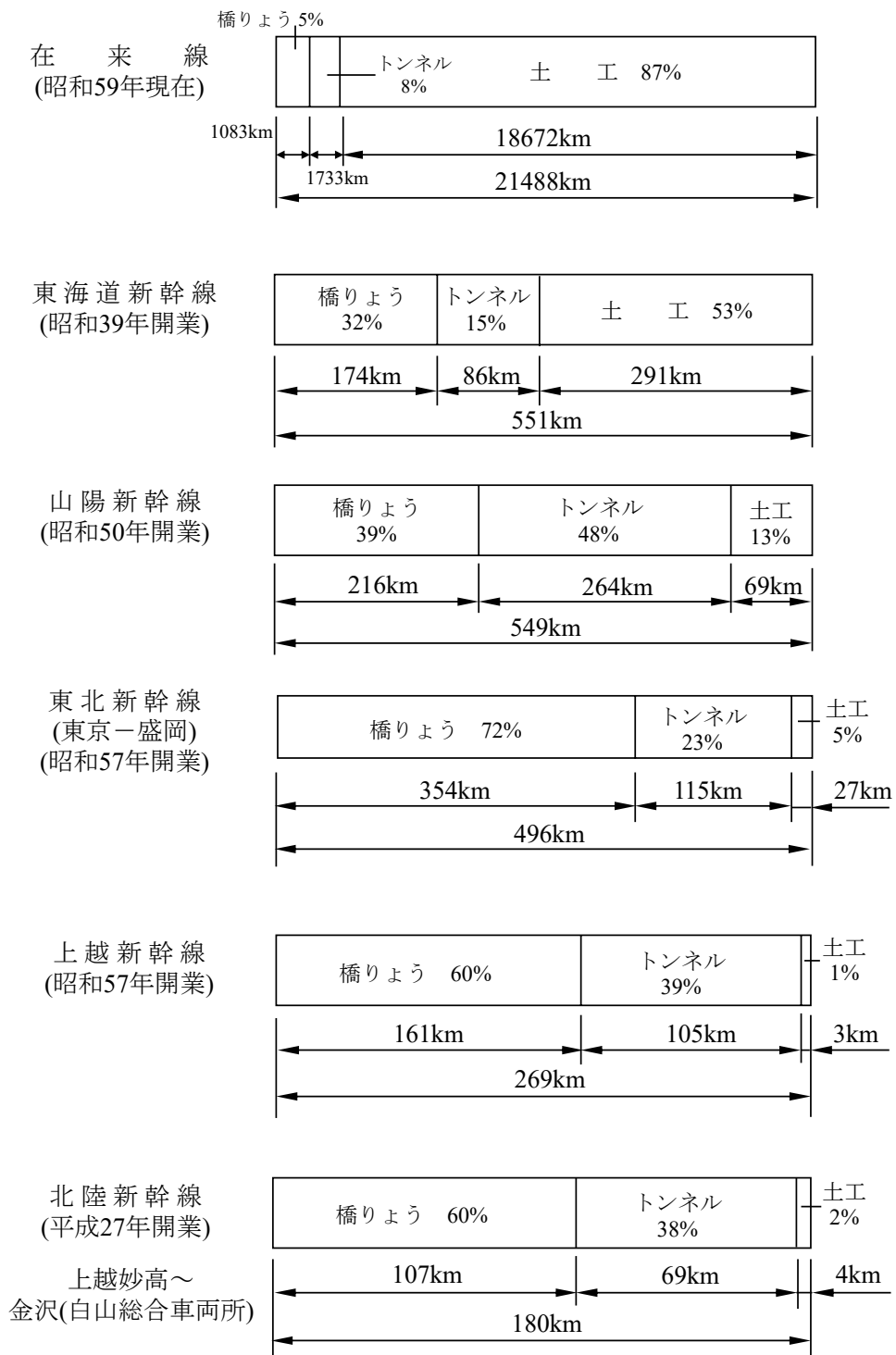


図-1.1 鉄道における土木構造物の構成比率の例  
(文献 2)を一部修正・加筆)

列車速度の向上に伴って、重大事故を防止する必要性が社会的に一層高まってきたこと等を背景に、災害が発生する前に危険度の高い箇所に防災対策工事を実施する、いわゆる事前防災方式がとられるようになった。また、これに伴って、土木構造物の危険度を専門的に評価する構造物検査センターと呼ばれる組織が設立された。しかし、個々の専門技術者の危険度判断能力や経験の違いによって土木構造物の評価精度が異なるという課題があり、その課題を解決するために統一した評価基準の策定が求められた。鉄道において土木構造物の維持管理の流れが体系立てて示された最初の基準は、日本国有鉄道（以下、国鉄という）が 1974 年に制定した「土木建造物取替の考え方<sup>3)</sup>」である。この基準では、土木構造物の危険度判定基準が示され、その判定基準にしたがって土木構造物の危険度をランク付けできるようになった。なお、斜面については、「のり面採点表」という、調査結果を評価点に換算して危険度を評価する方法が示された。その後、1987 年から 1990 年頃に、斜面やのり面を除く構造物については建造物保守管理の標準・同解説<sup>4)</sup>によって評価基準が改訂され、トンネルについてはトンネル補強・補修マニュアル<sup>5)</sup>によって危険度判定手法が示された。

1990 年代中頃には、土木構造物の検査結果を対策工事計画に反映し、対策後の状態を確認した上で、新たな計画を立てるといった、Plan（計画）、Do（実行）、Check（確認）、Action（行動）の 4 つで構成される、いわゆる PDCA サイクルにより土木構造物を合理的に保守管理する組織が誕生した。1990 年代後半には、のり面採点表による危険度評価の精度が必ずしも高くない、また危険度評価結果と降雨時の運転規制基準が関連付けられていない、といった問題を解決するために、盛土、切土の各種地盤条件等から崩壊が高まる降雨量を求める斜面安定の理論に立脚した新しい降雨災害危険度評価手法<sup>6)</sup>が開発され、斜面の危険度を経験や実績による定性的な判断ではなく、定量的に評価できるようになった。2001 年には、経年の進んだ鉄道構造物の維持管理の重要性が今後さらに高まっていくという理由を背景に、国土交通省から「鉄道に関する技術上の基準を定める省令<sup>7)</sup>」が通達され、この省令の解釈基準として、2007 年にすべての鉄道構造物を対象とする「鉄道構造物等維持管理標準<sup>8)</sup>」が制定された。このなかで、土構造物を対象としたものが、「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）土構造物（盛土・切土）<sup>9)</sup>」（以下、土構造物維持管理標準という）である。国鉄民営分割後の旅客鉄道会社（以下、JR という）では、土構造物維持管理標準や自社の組織体制に応じて整備した検査体系や技術基準に基づき、土構造物や斜面の管理を実施している。

このように、土構造物の統一した評価基準の策定が進み、危険度の高い箇所から優先的にのり面防護工等のハード対策が施工されたため、鉄道の防災強度は徐々に高まった。しかし、鉄道沿線に存在するすべての斜面にハード対策を施すことは、労力や資金の制



約条件があるなかで現実的ではないことから、鉄道事業者はソフト対策として降雨量に基づく運転規制（以下、降雨時運転規制という）を行い、未然に列車事故を防止してきた。降雨時運転規制は、数駅ごとに設置した雨量計が災害を発生させるおそれのある雨量を計測した時に、速度規制や運転中止といった運転規制を実施するものである。1972年に、国鉄が当時各機関でばらついていた運転規制基準を統一するために制定した「降雨に対する運転規制基準作成要領（国鉄運輸局、施設局）<sup>10)</sup>」に示されている基準は、現在においても多くの JR で踏襲されている。一方、近年になって、全国各地で雨域の狭い局地的な大雨<sup>11)</sup>が発生するようになり、これらの降雨を離散的に配置された鉄道の雨量計ではとらえられない可能性があるとの問題が顕在化してきた。そこで、各鉄道事業者は、局地的な大雨を捕捉するため、気象観測技術の高度化に伴って取得できるようになった面的な雨量情報を降雨時運転規制に利用することを検討し始め、一部の線区においては導入がなされている。面的な雨量情報の代表的なものとして、解析雨量<sup>12)</sup>がある。解析雨量とは、国土交通省水管理・国土保全局、道路局と気象庁が全国に設置している気象レーダと、地域気象観測システム（以下、アメダスという）等の地上の雨量計を組み合わせ、降水量分布を 1km 四方の細かさで解析したものである。なお、鉄道事業者が、現在検討している解析雨量を用いた降雨時運転規制は、主に線路直上のメッシュ（以下、線路直上メッシュという）の雨量情報を利用するものであり、対象とする災害の多くは、線路沿線の盛土や切土等の鉄道構造物の不安定化に起因するものである。

近年、日本では、上述したように局地的な大雨が多発し、さらに観測史上最大となるような豪雨が毎年のように観測される等、降雨強度が徐々に高まる傾向にある。図-1.2 は、アメダスで観測された 1 時間あたり 80mm/h 以上の短時間強雨が、1 年間に発生した回数を 1300 地点あたりに換算して示している<sup>11)</sup>。この図から、短時間強雨の年発生回数は増加していることがわかる。

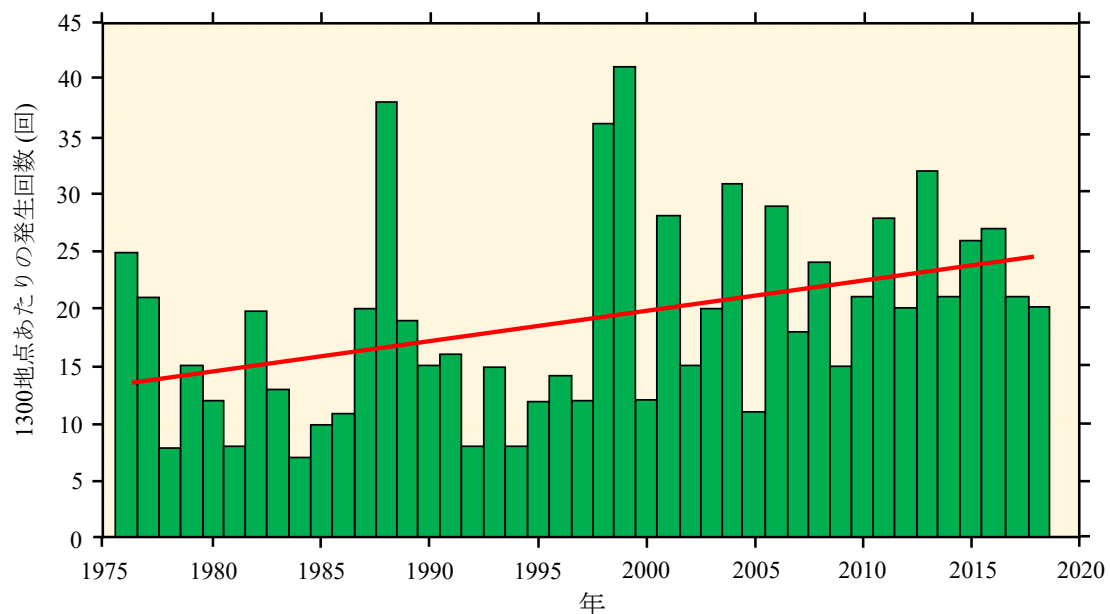


図-1.2 1時間雨量80mm/h以上の年間発生回数の経年変化（1976～2018年）  
（文献11）を一部修正・加筆）

前述したように、盛土や切土等ののり面防護工等の対策が進んだことで、鉄道施設そのものの防災強度は向上し、その結果、鉄道施設における被害は減少してきた。しかし、その一方で、豪雨等の増加に伴って、図-1.3～図-1.5に示すような線路から離れた自然斜面のうち、とりわけ溪流の流域を発生源とする土砂流入・土石流の割合が相対的に増えてきた<sup>13)</sup>。

そのため、鉄道では、広域的に分布する溪流からの土砂流入・土石流からの被害をいかにして防止するかが重要な課題となっている。また、今後は、広域的に分布する溪流の流域も含めて降雨量をモニタリングし、降雨時運転規制に反映させることも必要といえる。

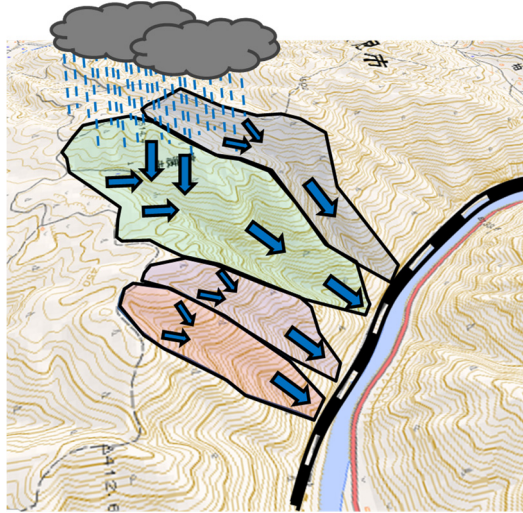


図-1.3 溪流からの土砂流入・土石流



図-1.4 線路への土砂流入・土石流の例（その 1）



図-1.5 線路への土砂流入・土石流の例（その 2）

北陸、近畿、中国地方および九州の一部に鉄道網をもつ、西日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 西日本という）の鉄道路線のうち、在来線は日本海、瀬戸内海、太平洋に面した海沿いの山裾部や、中国山地、丹波山地等の山間部に敷設されたものが多く、在来線総延長約 4090.5km<sup>14)</sup>の約 8 割が土工区間である。また、新幹線については、図-1.1 に示したように、土工区間が、山陽新幹線においては、総延長の約 1 割を占め、北陸新幹線においては、総延長の約 0.2 割を占める。このように JR 西日本管内における土工区間の延長は長く、過去から降雨に起因する種々の被害を受けており、近年では全国の鉄道の災害形態と同じく、土砂流入・土石流による被害が増加している。土砂流入・土石流による被害の多くは、山間部のローカル線区を中心に発生しており、2016 年 7 月には、広島県三次市の山間部を通過する芸備線において、溪流から線路内に流入した土砂等に列車が乗り上げ脱線する重大事故が発生した。この列車脱線事故は、溪流からの土砂流入・土石流を防止するための危険度評価手法等の研究を始める契機となった事故である。

本研究の目的は、上述した背景に基づき、鉄道沿線の溪流を発生源とする土砂流入・土石流を防止するための溪流の危険度評価手法を提案することおよび鉄道沿線に広範囲に分布する溪流の流域を対象とした適切な降雨モニタリングの範囲を提案することである。

鉄道における土砂流入・土石流の規模は、比較的小さい流域を発生源とする小規模なものが多い<sup>15)</sup>。それらの規模は、図-1.6 や図-1.7 に示すように、流入してきた土砂等が線路の一部を埋没させる程度のものであるが、このような小規模なものであっても、重大な事故が発生する可能性は高い。そこで、本研究における溪流の危険度評価手法等は、発生頻度が比較的高く、また危険度も高い、小規模な土砂流入・土石流を防止することを目的として提案する。



図-1.6 小規模な土砂流入・土石流の例（その 1）



図-1.7 小規模な土砂流入・土石流の例（その 2）

なお、以降では、線路を押し流すような大規模な土砂流入・土石流ではなく、上述したような比較的規模の小さい土砂流入・土石流を「土砂流入」と表現する。

また、鉄道においては、土構造物等の状態を示すために「健全度」という表現を用いているが、これは主に構造物に対して用いられる表現であり、自然斜面の一部である溪流の状態を示す場合には、一般的に、「危険」という表現が用いられることが多いため、本論文において溪流の状態を示す場合には「危険度」と表現する。また、鉄道では、土構造物等の検査、調査結果を示すために「判定」という表現を用いているが、ここでは、「評価」に統一する。



## 1.2 既往の研究

土砂流入・土石流による被災事例は、日本全国でみられ、これらの災害を防止するために、これまで様々な機関によって、溪流の危険度評価手法等が提案されてきた。また、降雨のモニタリングに関する研究についても、鉄道を含む各種機関において行われてきた。

本節では、溪流の危険度評価手法等に関する研究事例と、降雨のモニタリング範囲に関する研究事例について概説する。

### (1) 溪流の危険度評価手法等に関する既往の研究

鉄道における溪流の危険度評価等に関する既往の研究として、国鉄<sup>3)</sup>では、土石流発生危険度を採点表と土砂等の線路への到達のしやすさで評価する手法を提案した。また、長屋ら<sup>16)</sup>は、国鉄の採点表<sup>3)</sup>に、植生の種類や被害規模等の項目を加えた新しい採点表を作成し、その採点表と土砂災害発生予測モデルによるシミュレーションにより危険溪流を抽出する手法を提案している。これらの手法は、線路から遠く離れた溪流全域に対する評価手法であり、対象とする災害規模は主に大規模なものである。なお、採点表の調査項目の多くが定性的なカテゴリーにより分類されているため、調査者の危険度判断能力や経験の差により、評価結果にばらつきが生じる可能性がある。

鉄道以外の機関における既往の研究として、村上ら<sup>17)</sup>は、高速道路と溪流との交差部の構造による被災のしやすさや地形や地質による土石流の発生のしやすさに着目した机上評価を行い、その結果に基づき現地調査の優先度を付ける手法を提案した。また、荒木ら<sup>18)</sup>は、重判別分析によって土石流の発生、非発生を判別する手法を提案した。小橋ら<sup>19)</sup>、足立ら<sup>20)</sup>は、数量化解析を用いて溪流の危険度を評価する手法を提案した。篠崎ら<sup>21)</sup>は、SVM とラフ集合を用いて土石流の発生・非発生の有無を説明できるルールの作成手順を考案した。これらの手法は、広域にわたる溪流全域を対象としており、対象とする災害規模は、主に大規模な土石流である。

近年、斜面の形状や土石流の発生メカニズムを考慮して土石流の発生危険度をシミュレーションにより評価する手法も開発されている。布川ら<sup>22)</sup>は、斜面表層の地下水位を考慮して斜面の安定性を計算する解析モデルを用いて、土石流の発生危険度を評価する手法を提案した。また、中谷<sup>23)</sup>は、専門知識を有したユーザー以外でも土石流の発生危険度を簡易に評価できる汎用性の高いシミュレーションを開発した。Han ら<sup>24)</sup>は、侵食を考慮したモデルによるシミュレーション等を行った。林ら<sup>25)</sup>は、土石流の発生形態を崩壊型土石流と溪床流動型土石流に区分して、それぞれの発生危険度をシミュレーションにより評価する手法を提案した。これらの手法は、膨大な数の溪流に対して一律に適用するのではなく、危険度が高いと考えられる特定の溪流の危険度を精度よく分析する

場合に適している。また、近年、様々なリモートセンシングによって数値標高モデルを取得できるようになった。例えば、Adams ら<sup>26)</sup>は、無人飛行機を使用して高解像度の溪流の数値標高モデルを取得することを試みた。なお、これらの数値標高モデルを利用して、斜面崩壊の危険度を評価する手法<sup>27)</sup>等の研究も進められている。しかしながら、現在のところ、数値標高モデルを利用して、溪流の危険度を精度よく評価することは容易でなく、今後の検討課題となっている。

なお、これまでに溪流に対する調査方法を具体的に示した基準等<sup>28)~31)</sup>が提案されているが、これらの基準は、大規模な土石流を防止するために、溪流全域を対象として行う調査の基準である。また、気象庁は、土壌雨量指数と 60 分間積算雨量の 2 つの指標の組み合わせを用いた土砂災害警戒情報<sup>32)</sup>を配信している。しかし、これらは、個々の溪流の地形、地質、環境等に着目して、あらかじめ土砂等の流出のしやすさを評価するものではない。

以上のように、過去に提案されてきた溪流の危険度評価手法は、大規模な土石流の防止を目的としたものが多く、後述する鉄道線路が被る頻度が高い、土砂等が線路の一部を埋没させる程度の土砂流入の防止に着目した危険度評価に関する研究は極めて少ない。

また、近年、AI、IoT を導入した各種研究が行われており、土石流の検知に応用した研究<sup>33)</sup>も進められているが、個々の溪流の危険度を判断するものはみられない。

## (2) 降雨のモニタリング範囲に関する既往の研究

降雨のモニタリング範囲に関する既往の研究として、鈴木<sup>34)</sup>は、解析雨量を補完的に用いることにより、鉄道事業者が数駅ごとに設置している雨量計（以下、鉄道雨量計という）では観測できない場合がある局地的な大雨をとらえる降雨時運転規制を提案している。また、JR 西日本<sup>35)</sup>は、解析雨量を利用した降雨時運転規制の検討を進めてきた。なお、これらの降雨時運転規制は、いずれも線路直上メッシュの雨量情報を利用するものであり、対象とする主な災害は、線路沿線の盛土や切土等の鉄道構造物の不安定化に起因するものである。

なお、降雨のモニタリング範囲を検討するにあたっては、降雨の空間分布特性を分析することが有効であり、これらの分析に関する研究も各種機関等によってなされてきた。降雨の空間分布特性の分析には、地上にある 2 つの雨量計の降雨量を用いて、それらの差や比、相関、または同程度の降雨量となる割合を調べる方法等が用いられる。建設省土木研究所<sup>36)</sup>は、土石流の発生時における雨量計の降雨量と災害発生域における降雨量の差を調べ、災害発生箇所の降雨量を把握するには概ね 5km 以内での観測が必要であるとした。また、井良沢・田口<sup>37)</sup>は、複数の機関の雨量計で観測された 1 時間雨量を

用いて分析し、2 地点の相関係数が 0.9 以上の範囲は 3km 前後であるとした。これらの分析は、雨量計の降雨量を代表値として降雨の空間分布特性を把握したものであるが、雨量計が離散的に配置されていることや、その配置数が限られていることから、空間分布の全体的な度合いを精度よく推定できない場合がある。一方、鈴木<sup>34)</sup>は、離散的に配置された雨量計による大雨の捕捉性能を定量的に把握するために、2 地点の雨量計の降水量比に関するパーセンタイル値を用いて大雨の空間代表性を定量的に評価した。また、2 地点で同時に大雨になる割合を調べ、それらの結果から設置間隔が約 10km の鉄道雨量計による観測網によって線路沿線の大雨を概ねとらえられるとした。

上述したように、降雨の空間分布特性を把握するために、雨量計の降雨量を代表値として分析することは効果的であるが、空間分布特性をより精度よく推定するためには、空間的に分布した解析雨量を用いることが有効であると考ええる。解析雨量を用いて降雨の空間分布特性を把握した研究として、佐溝ら<sup>38)</sup>は、気象庁の面的な雨量情報である約 5km 四方の解析雨量を用いた場合、1 時間雨量については 2 地点の距離が 5km 以内であれば相関が高いとした。また、村上ら<sup>39)</sup>は、約 5km 四方の解析雨量を用いた分析により、2 地点の 1 時間雨量の誤差が 10% の範囲は約 1km、20% の範囲は約 2km とした。これらの分析結果は、5km 四方のメッシュのデータを用いた分析結果であり、今後、降雨時運転規制への導入を検討している 1km 四方のメッシュよりも大きいサイズのメッシュを用いた場合の分析結果である。また、鈴木ら<sup>40), 41)</sup>は、雨量計の観測値を用いて降雨の空間スケールや空間代表性の分析を行っている。

### 1.3 研究内容と本論文の構成

本研究は、鉄道沿線の溪流を発生源とする土砂流入による災害を防止するために、効果的かつ効果的に溪流の危険度を評価する手法を作成し、また降雨時運転規制に解析雨量を導入する場合における降雨のモニタリング範囲を提案するものである。図-1.8 に、研究フローを示す。また、各章の内容を以下に記述する。

**第 1 章「序論」**では、研究の背景と目的を示すとともに、関連する既往の研究を概説することで本研究の位置付けを明らかにする。

**第 2 章「鉄道への土砂流入被害と災害防止の現状と課題」**では、鉄道災害の実態を明らかにすることで、特に斜面、のり面に関係する災害を防止することが重要であることを指摘する。さらに、盛土や切土の崩壊等による被害割合に対して、溪流の溪岸斜面の崩壊や不安定な溪床堆積物に起因する土砂流入・土石流による被害割合が増加しており、これらの災害を防止することが重要な課題であることを指摘する。

**第 3 章「過去の被災事例分析に基づく線路近傍溪流の危険度評価に関する研究」**では、



過去に土砂流入が発生した溪流およびこれに隣接する土砂流入が発生していない溪流における地形、地質、環境および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等のデータを用いて、溪流からの土砂等流出の危険度を統計的に判別する手法について提案する。具体的には、土砂流入の発生の有無を目的変数とし、溪流における地形、地質、環境および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等の条件を説明変数として数量化 II 類解析を行い、それらの結果を用いて、溪流からの土砂等流出の危険度を評価する採点表等を作成する。

第 4 章「現場技術者のための溪流調査方法と危険度評価手法の提案」では、膨大な数におよぶ鉄道沿線の溪流における調査、検査をより効率的かつ効果的に行うための危険度評価手法について提案する。ここで提案する危険度評価手法は、第 3 章の結果に基づく溪流からの土砂等流出の危険度評価と、列車運行への影響度評価とを組み合わせる行う手法等である。検査および調査には、定期的に線路近傍の範囲に対して行う検査、線路から直角方向に最大で約 100m までの範囲を対象として行う調査およびさらに上流を含む広域的な範囲を対象として行う調査があることを踏まえた上で、それぞれの検査および調査の範囲に応じた具体的な危険度評価手法を提案する。

第 5 章「土砂流入災害による列車事故防止を対象とした降雨モニタリングに関する研究」では、鉄道に土砂流入・土石流による被害をもたらした溪流における流域の大きさと線路から流域最遠部までの距離を明らかにするとともに、被害発生時等における降雨の空間分布特性を距離依存性に着目して分析する。具体的には、各災害事例を前線等、台風および局地的な大雨の 3 つに区分し、それぞれの区分における空間分布特性を解析雨量を用いて明らかにする。最終的には、これらの結果を踏まえて、降雨時運転規制に解析雨量を導入する場合における降雨のモニタリング範囲を定量的に明確にする。

第 6 章「結論」では、第 3 章および第 4 章で提案した溪流の危険度評価手法と、第 5 章で提案した降雨時運転規制における降雨のモニタリング範囲に関する内容等を取りまとめて、本研究の結論を述べる。

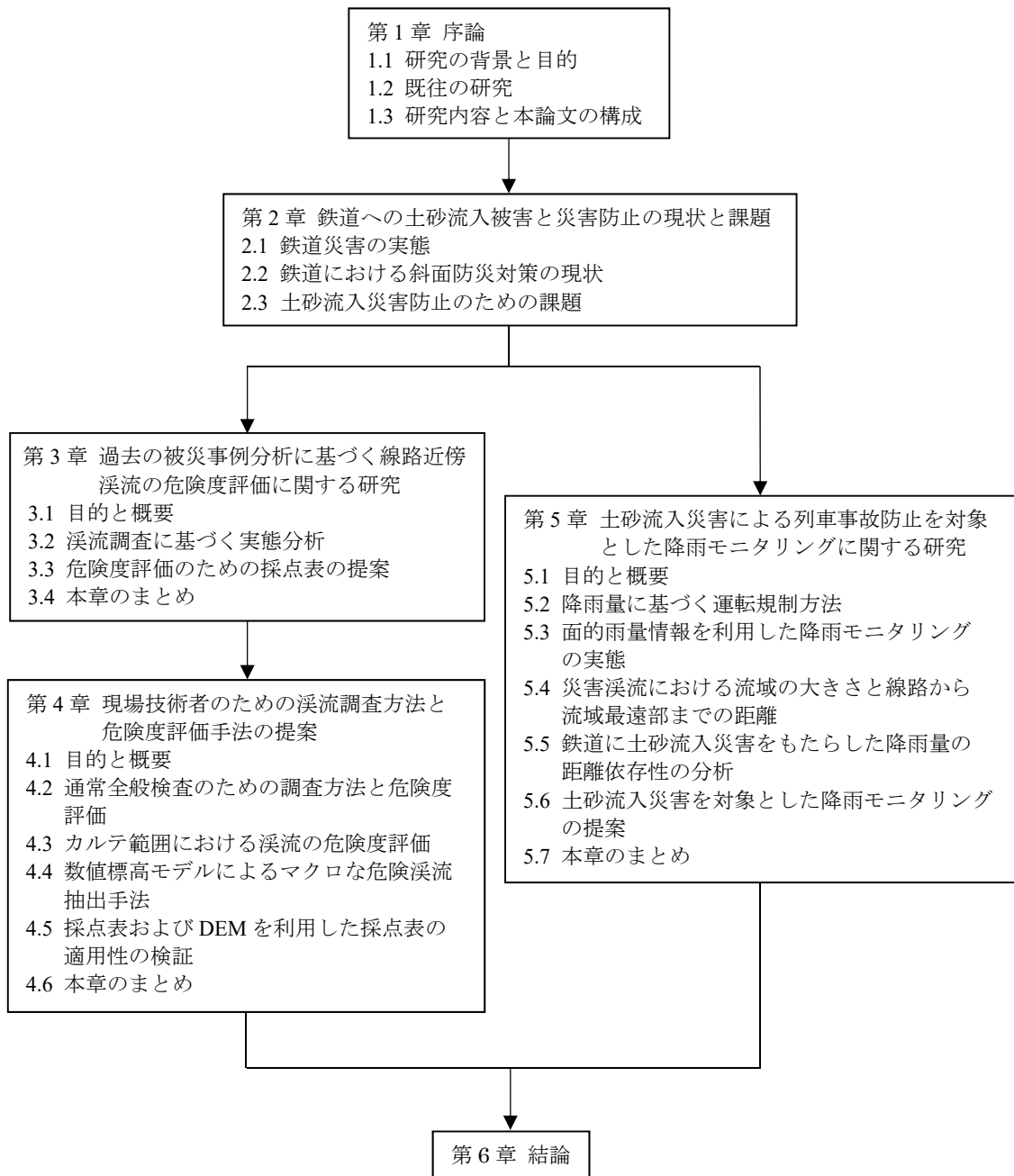


図-1.8 研究フロー

## 第1章の参考文献

- 1) 国土交通省：砂防 NEWS, <http://www.mlit.go.jp/common/001267056.pdf>, 2018.12.
- 2) 岡田清監修：鉄道事例にみる土木構造物の診断, 山海堂, pp.25-26, 1990.10.
- 3) 日本国有鉄道施設局土木課：土木建造物取替の考え方, 日本鉄道施設協会, 1974.8.
- 4) 鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説, 1987.
- 5) 鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル, 1990.10.
- 6) 杉山友康：降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究, 鉄道総研報告, 特別第19号, 1997.
- 7) 国土交通省：鉄道に関する技術上の基準を定める省令, 国土交通省令第151号, 2001.
- 8) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）, 丸善, 2007.
- 9) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）土構造物（盛土・切土）, 丸善, 2007.1.
- 10) 日本国有鉄道施設局・運輸局：降雨に対する運転規制基準作成要領, 1972.9.
- 11) 気象庁：気候変動監視レポート2018, [http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018\\_chap2.pdf](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018_chap2.pdf), p.38, 2019.
- 12) 気象庁：知識・解説 解析雨量, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/kaiseiki.html>.
- 13) 太田直之, 杉山友康：災害の推移と今後の防災, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, No.6, pp.17-19, 2009.6.
- 14) 西日本旅客鉄道株式会社：JR 西日本ホームページ 企業概要, <https://www.westjr.co.jp/company/info/outline/>, 2019.
- 15) 村上温, 野口達雄監修：鉄道土木構造物の維持管理, 日本鉄道施設協会, pp.382-383, 1998.9.
- 16) 長屋修, 山名修一, 小久保将寿：溪流における土石流危険度判定評価について, 土木学会第59回年次学術講演会, 4-119, pp.237-238, 2004.9.
- 17) 村上豊和, 下野宗彦, 中田幸男：高速道路に影響を与える土石流危険溪流の資料調査に基づく評価手法, 地盤工学会中国支部論文報告集 地盤と建設, Vol.34, No.1, 2016.
- 18) 荒木義則, 古川浩平, 松永悟, 小笠原貴人, 石川芳治, 水山高久：土石流危険溪流における地形特性を考慮した土砂崩壊の発生限界線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.574/VI-36, pp.33-47, 1997.9.
- 19) 小橋澄治, 今井篤雄, 久保村圭助, 中山政一, 真砂祥之助：航空写真判読による斜

- 面の安全度解析 (1) -高山線での実施例-, 新砂防, Vol.84, pp.14-23, 1972.5.
- 20) 足立勝治, 徳山久仁夫, 中筋章人, 中山政一, 二宮寿男, 大八木俊治: 土石流発生危険度の判定について, 新砂防, Vol.106, pp.7-16, 1977.12.
- 21) 篠崎嗣浩, 森田真人, 大石博之, 古川浩平: SVM とラフ集合を用いた土石流の発生・非発生ルールを作成方法に関する研究, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.448-460, 2009.10.
- 22) 布川修, 太田直之, 石川智史: 地形を考慮した土石流の発生危険性評価, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.35-40, 2013.11.
- 23) 中谷加奈: GUI を実装した汎用土石流数値シミュレーションシステムの開発と適用, 京都大学博士論文, 2010.3.
- 24) Han, Z., Chen, G., Li, Y., Tang, C., Xu, L., He, Y., Huang, X. and Wang, W. : Numerical simulation of debris-flow behavior incorporating a dynamic method for estimating the entrainment, Engineering Geology, 190, pp.52-64, 2015.
- 25) 林宏樹, 新海英昌, 大木基裕, 五百旗頭弘憲: レーダ雨量を活用した土石流発生危険度評価手法に関する検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-878, 2019.9.
- 26) Adams, M. S., Fromm, R. and Lechner, V.: HIGH-RESOLUTION DEBRIS FLOW VOLUME MAPPING WITH UNMANNED AERIAL SYSTEMS (UAS) AND PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, July.2016.
- 27) 末続真依, 北園芳人, 平川泰之, 佐藤秀文: 斜面崩壊危険度評価における赤色立体地図の利用, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.121-126, 2014.9.
- 28) 国土交通省水管理・国土保全局: 国土交通省 河川砂防技術基準 調査編, 第 17 章 砂防調査, pp.1-45, 2014.4.
- 29) 松村和樹, 中筋章人, 井上公夫: 土砂災害調査マニュアル, 鹿島出版会, pp.108-118, 1988.4.
- 30) 水山高久, 恩田裕一, 加藤祐子, 田井中治, 岡本正男: 流出特性による土石流発生危険度の判定調査, 砂防学会誌, Vol.54, No.5, pp.46-49, 2002.1.
- 31) 日本応用地質学会: 防災地質の現状と展望, 応用地質特別号, Vol.28, p.64, 1987.11.
- 32) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法 (案), 2005.6.
- 33) 産業技術総合研究所: AI による土石流検知センサーシステム, <http://www.aist.go.jp/>

aist\_j/press\_release/pr2018/pr20181010\_2/pr20181010\_2.html, 2018.10.

- 34) 鈴木博人：降雨時の列車運転規制のための大雨の空間分布特性を考慮した降雨量の観測方法に関する研究，京都大学博士論文，2016.3.
- 35) 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，土木学会第 64 回年次学術講演会，pp.387-388，IV-195，2009.9.
- 36) 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，p.11，1985.3.
- 37) 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，砂防学会誌，Vol.49，No.4，pp.22-27，1996.11.
- 38) 佐溝昌彦，和田昭夫，紙田茂，村石尚，杉山友康：鉄道防災情報システムと雨量計配置に関する一考察，土木学会第 48 回年次学術講演会，IV-152，pp.340-341，1993.9.
- 39) 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，No.2，pp.16-22，2008.7.
- 40) 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 J.JSND S，27-2，pp.161-173，2008.
- 41) 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.391-396，2009.2.

## 第2章 鉄道への土砂流入被害と災害防止の現状と課題

### 2.1 鉄道災害の実態

#### 2.1.1 自然災害の発生状況

##### (1) 国鉄および JR6 社における自然災害の発生状況

我が国の鉄道は、厳しい地形、地質条件のもとにあること、また、線路沿線には膨大な数の土構造物や斜面があることから、過去から降雨による盛土崩壊、切土崩壊、自然斜面の崩壊および土砂流入・土石流等の各種災害に見舞われてきた。

図-2.1 は、1966 年度から 2018 年度までの 53 年間に於いて、国鉄および JR6 社で発生した災害の件数を示したものである<sup>1),2)</sup>。このデータには、盛土崩壊、切土崩壊、自然斜面の崩壊、土砂流入・土石流、線路浸水、道床・線路流出、落石・岩石崩壊、倒木等の様々な種類の災害が含まれている。なお、1995 年の阪神・淡路大震災、2007 年の新潟県中越沖地震、2011 年の東北地方太平洋沖地震等の大規模地震による災害は、このデータに含まれておらず、災害件数の多くは降雨に起因するものである。

1972 年度以前は、年間約 6000 件を超える災害が発生していたが、1970 年代中頃から 1980 年代後半にかけてその件数は減少した。また、JR が発足した 1987 年度から 2018 年度までの災害の年間発生件数の平均値は 911 件であり、国鉄の災害発生件数の平均値である 4396 件と比較して大幅に減少している。この理由は、国鉄民営分割化で特定地方交通線が経営分離されたことも影響しているが、鉄道における土木構造物の維持管理に関する基準が整備され、合わせて土構造物や斜面に対する検査体制の構築が進められたことにより、危険度の高い箇所から順次防災対策が進められてきたためであると考えられる。このように、約 50 年間で鉄道における自然災害による被害は徐々に減少してきたものの、JR 発足後の 32 年間に於ける災害件数に着目してみると、上述したとおり災害の年間発生件数は 911 件であり、また、年間発生件数が 1000 件を超えた年度が 11 回あることから、その件数は決して少ないとはいえない。

図-2.2 は、JR6 社に於いて、1995 年度から 2018 年度までの 24 年間に発生した災害を文献<sup>2)</sup>から集計し、それらを土砂流入・土石流、切土崩壊・変状、盛土崩壊・変状、道床・線路流出・線路浸水、落石・岩石崩壊、倒木、その他の 7 つの種類に区分して、それぞれの発生割合を示したものである。これらの災害のなかで、最も割合が大きい災害は倒木である。一方、倒木とその他を除いた災害種別でみると、土砂流入・土石流が約 14%で最も多く、次いで切土崩壊・変状が約 10%、盛土崩壊・変状が約 8%と多い。

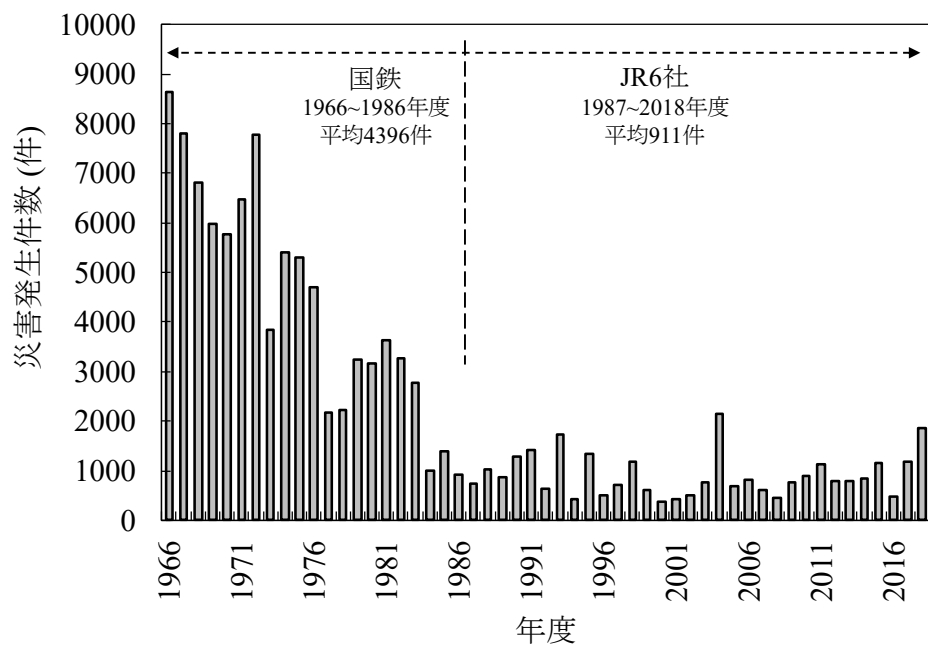


図-2.1 国鉄および JR6 社における災害発生件数（1966～2018 年度）  
（文献 1）を一部修正・加筆）

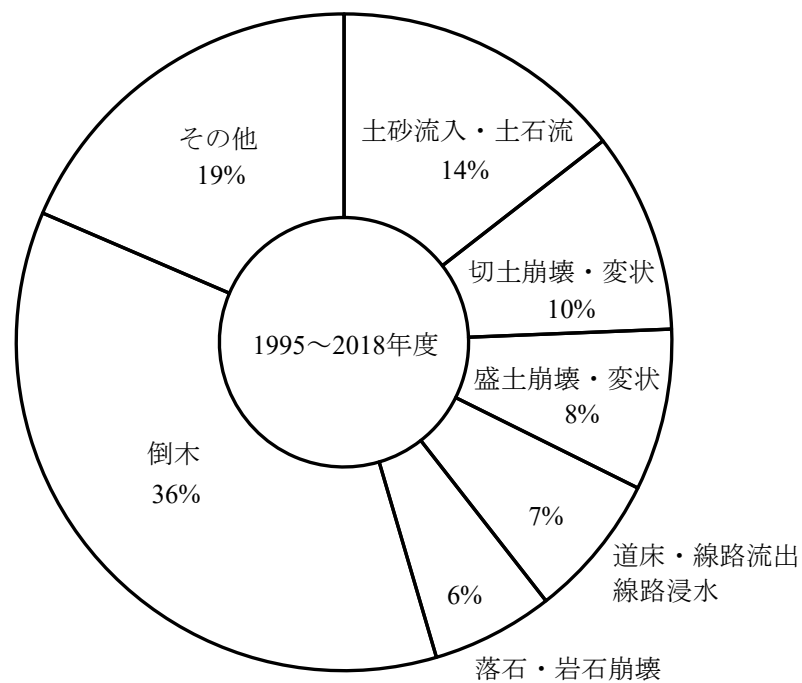


図-2.2 JR6 社で発生した災害の割合（1995～2018 年度）<sup>2)</sup>

## (2) JR 西日本における自然災害の発生状況

JR 西日本管内には、2019 年度時点において新幹線 812.6km、在来線 4090.5km の合計 4903.1km の路線<sup>3)</sup>があり、橋りょうやトンネルを除く土工区間は、新幹線では 1 割強、在来線では 8 割強となっている。

図-2.3 は、1955 年度から 2018 年度までにおいて、JR 西日本管内で発生した災害の件数<sup>2)</sup>、<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>を示したものである。図-2.3 には、1995 年の阪神・淡路大震災による災害は含まれていない。また、ここでは、国鉄の金沢、大阪、天王寺、福知山、岡山、米子、広島各鉄道管理局管内で発生した災害を、JR 西日本管内で発生した災害として扱っている。なお、1969 年度から 1978 年度までと、1979 年度から 1986 年度までの期間については、災害記録<sup>5)</sup>に単年度の件数が記載されていなかったため、これらの期間の平均値を示している。1961 年度には、梅雨前線と第 2 室戸台風の影響で多くの災害が発生した。また、1965 年度には、山陰豪雨と台風 23～25 号の影響で多くの災害が発生した。JR 西日本発足以降の災害発生件数は、国鉄における同管内の災害発生件数と比較して減少しており、年間の災害発生件数の平均値は約 160 件である。

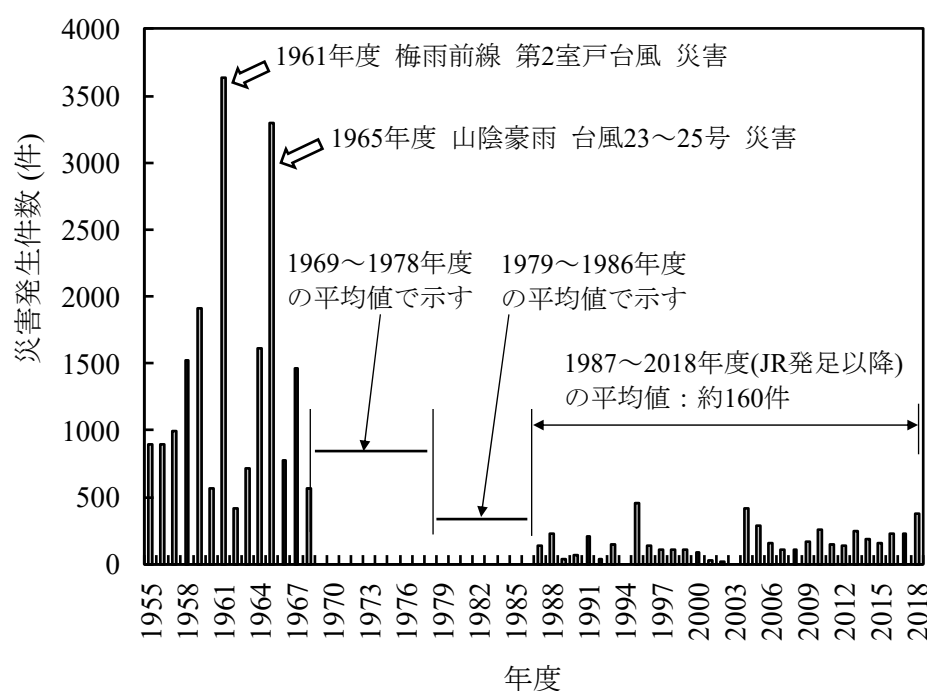


図-2.3 JR 西日本管内における災害発生件数（1955～2018 年度：国鉄の災害を含む）  
（文献 4）を一部修正・加筆）



図-2.4 は、図-2.3 の災害発生件数のうち、JR 西日本発足以降の災害発生件数を抜粋して示したものである。大糸線災害があった 1995 年度、平成 16 年 7 月福井豪雨や台風等による被害を受けた 2004 年度、平成 30 年 7 月豪雨による被害を受けた 2018 年度には、比較的多くの災害が発生している。1987 年度から 2018 年度までにおける 5 年移動平均の推移をみると、2000 年度前後で件数は一時少なくなっているものの全体的には増加傾向にあるといえる。

すなわち、JR 発足以降の災害発生件数は、国鉄の災害発生件数と比較すると減少しており、また微増の傾向にある。

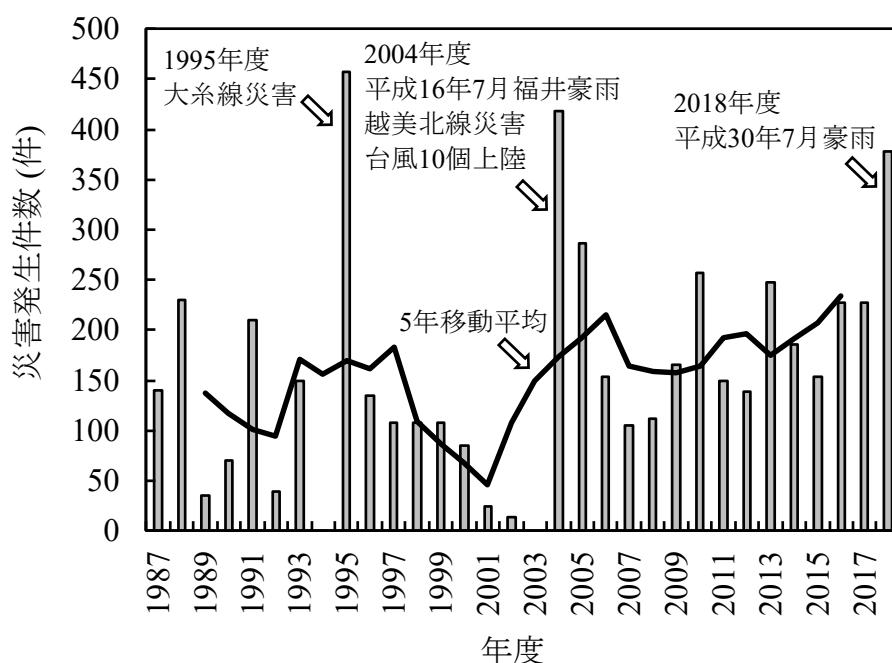


図-2.4 JR 西日本管内における災害発生件数（1987～2018 年度：JR 西日本発足以降）  
（文献 4）を一部修正・加筆）

図-2.5 は、JR 西日本管内において、1995 年度から 2018 年度までの 24 年間で発生した災害<sup>2)</sup>を、図-2.2 に示した JR6 社の災害種別と同様に区分し、その割合を示したものである。これらの災害のなかで、最も割合が大きい災害は倒木である。一方、倒木とその他を除いた災害の割合を比較すると、落石・岩石崩壊が約 13%と最も多く、次いで道床・線路流出、線路浸水と土砂流入・土石流が約 9%と多い。

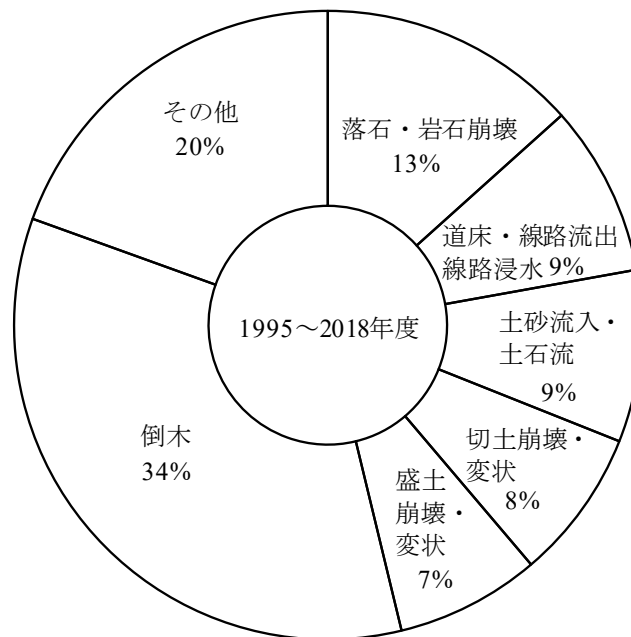


図-2.5 JR 西日本で発生した災害の割合（1995～2018 年度）<sup>2)</sup>

### 2.1.2 JR 西日本における土砂流入災害の実態

#### (1) 土砂流入・土石流の発生件数および発生割合の推移

JR 西日本管内において、1995 年度から 2018 年度までの 24 年間に発生した土砂流入・土石流の各年度の発生件数<sup>2),6)</sup>を図-2.6 に示す。この期間における発生件数は 388 件である。なお、ここでいう土砂流入・土石流は、谷地形を呈していない自然斜面が崩壊し、線路内に土砂が流入した形態のものも含んでいる。発生件数は、各年度の気候条件によって多少の影響を受けるものと考えられるが、年間の平均発生件数は約 16 件である。また、発生件数の 5 年移動平均でみれば、2001 年度からは増加傾向にある。

図-2.7 は、JR 西日本管内における各年度の土砂流入・土石流の発生割合<sup>2),7)</sup>を示したものである。土砂流入・土石流の発生割合の平均値は約 9%である。発生割合の 5 年移動平均は、2004 年度と 2006 年度の災害発生件数が比較的多かった影響を受けて、2003 年度から 2007 年度までの期間では大きな値となっており、2009 年度以降は増加傾向にある。

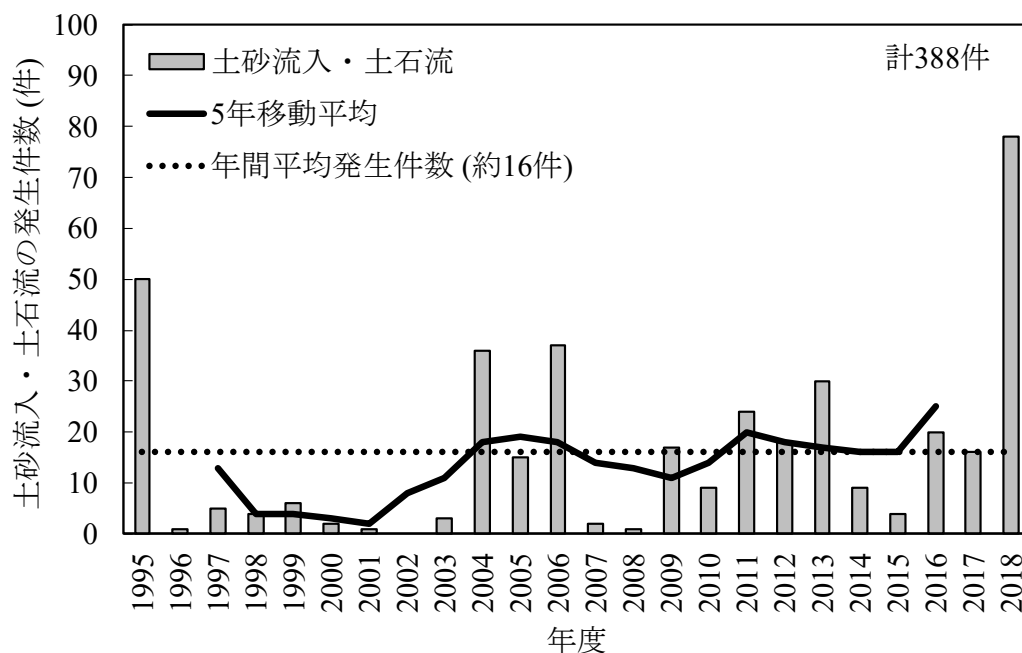


図-2.6 JR 西日本管内における土砂流入・土石流の発生件数（1995～2018 年度）  
（文献 6）を一部修正・加筆）

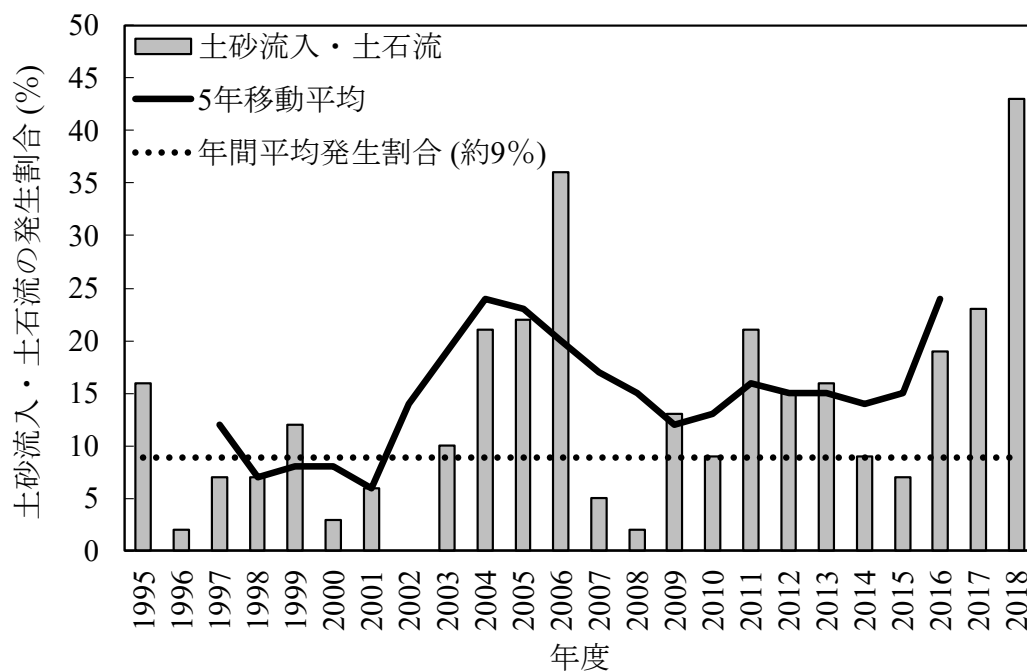
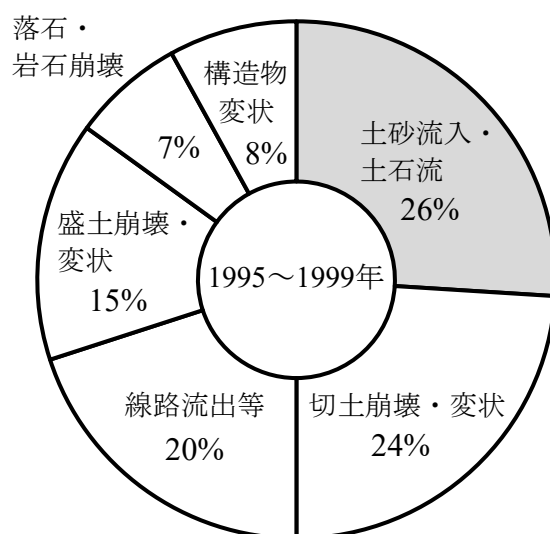
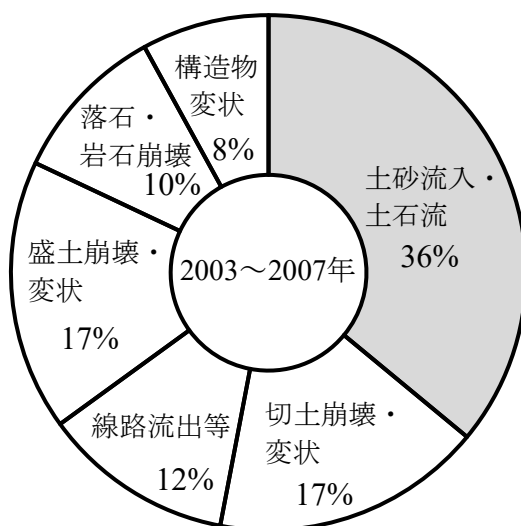


図-2.7 JR 西日本管内における土砂流入・土石流の発生割合（1995～2018 年度）  
（文献 7）を一部修正・加筆）

図-2.8 は、1995 年度から 2007 年度までの期間において、JR6 社で発生した斜面やのり面に関する各災害の割合の変化を示したものである<sup>8)</sup>。図-2.8 (a) は、JR 発足から約 10 年が経過した 1995 年から 1999 年までの 5 年間における災害種別ごとの発生割合を示している。一方、図-2.8 (b) は、2003 年から 2007 年までの 5 年間における災害種別ごとの発生割合を示している。これらの図を比較すると、切土崩壊・変状および線路流出等の割合が減少した一方で、土砂流入・土石流の割合が増加していることがわかる。



(a) 1995～1999 年



(b) 2003～2007 年

図-2.8 JR6 社における災害種別の割合の変化 (文献 8)を一部修正・加筆)

図-2.9 は、1996 年度から 2018 年度までの期間において、JR 西日本管内で発生した斜面やのり面に関する各災害の割合の変化を示したものである。図-2.9 (a) は、1996 年度から 2002 年度までの 7 年間における災害種別ごとの発生割合を示している。一方、図-2.9 (b) は、2012 年度から 2018 年度までの 7 年間における災害種別ごとの発生割合を示している。いずれの期間においても、落石・岩石崩壊の割合が最も高い。また、この約 15 年間で切土崩壊・変状や盛土崩壊・変状の割合は減少しているが、土砂流入・土石流の割合は、約 5%から約 16%に増加している。このように、JR6 社の傾向と同様に、JR 西日本においても土砂流入・土石流の割合が増加している傾向にある。

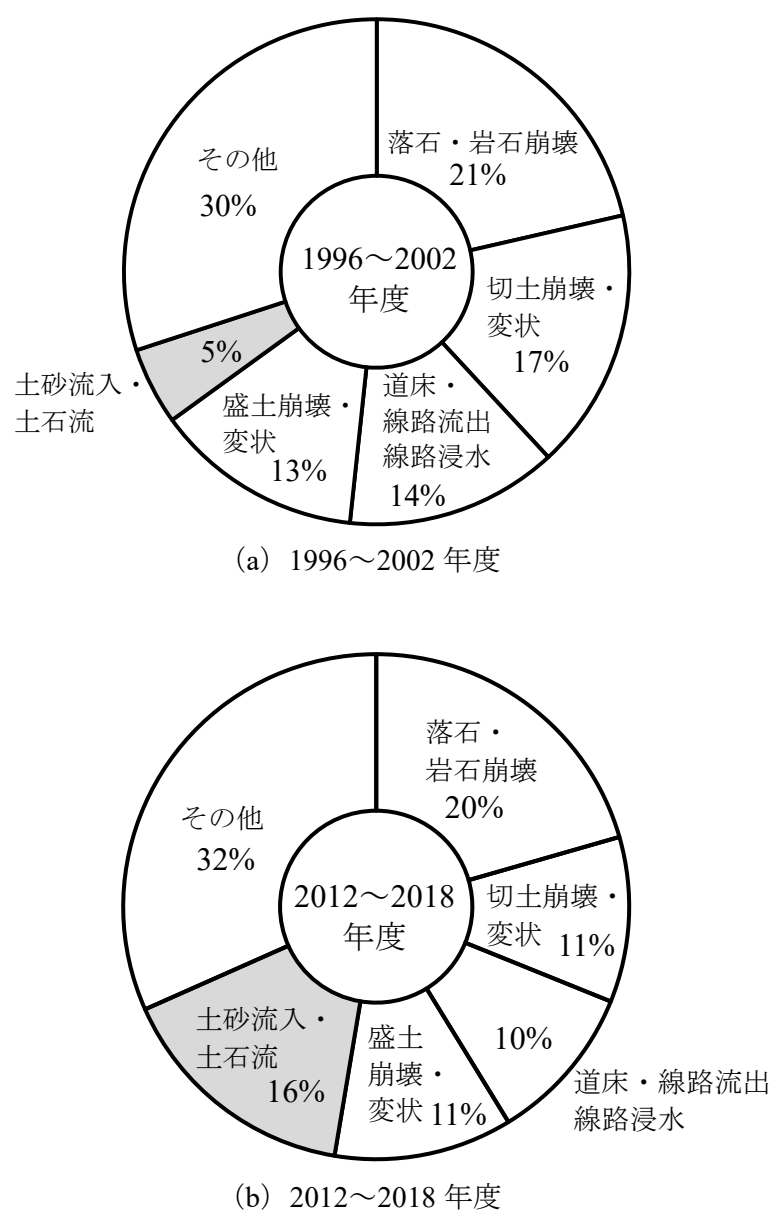


図-2.9 JR 西日本における災害種別の割合の変化 <sup>2)</sup>

## (2) 渓流を発生源とする土砂流入・土石流の発生件数の推移

図-2.10 は、JR 西日本の本社、支社において保存されていた土砂流入・土石流の災害記録のうち、渓流を発生源とするものであると判断できたものを収集、整理したものである。対象とした期間は、1976 年度から 2018 年度までの 43 年間であり、図-2.10 には、各年度の件数の推移を示している。なお、この発生件数には、2015 年 3 月に第三セクターに移管された北陸線および 2018 年 4 月に廃止された三江線における土砂流入・土石流の件数も含まれている。以下、本節の (4)、(6) においても、同様のデータで分析した結果を示す。

この期間において、JR 西日本管内では、渓流を発生源とする土砂流入・土石流が 380 件発生しており、年度の平均発生件数は約 9 件である。また、発生件数の 5 年移動平均でみれば、1980 年代と比較して 1990 年代には件数がやや減少したが、2000 年代はやや増加傾向にある。2013 年度には、7 月後半における梅雨前線の停滞の影響による大雨や 8 月 24 日から 25 日にかけて降り続いた島根県西部を中心とした大雨によって 45 件の土砂流入・土石流が発生した。また、2018 年度には、平成 30 年 7 月豪雨により広島県や岡山県を中心に京都府から山口県に至る西日本全域で、多く土砂流入・土石流が発生した。これらの年度の発生件数の影響を受け、土砂流入・土石流の発生件数の 5 年移動平均値は、2000 年代と比較して 2010 年代には 10~20 件増加した。

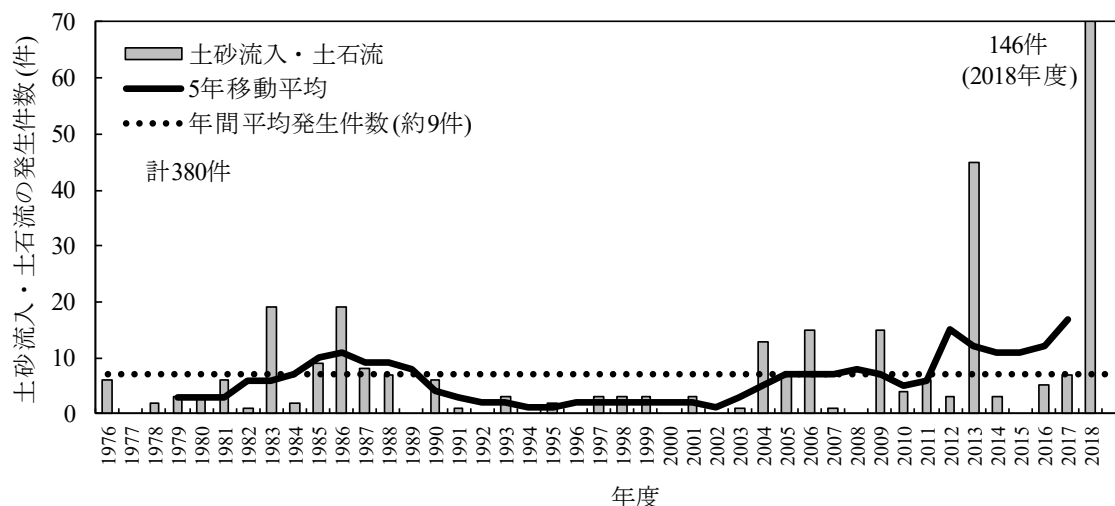


図-2.10 渓流を発生源とする土砂流入・土石流の発生件数 (1976~2018 年度)

### (3) JR 西日本管内における発生頻度の分布

図-2.11 は、JR 西日本管内において土砂流入・土石流が比較的多く発生した地域を示したものである。具体的には、発生件数が 20 件を超える任意の路線エリアを示している。中国地方の山間部における路線では、この 43 年間で 70 件を超える土砂流入・土石流が発生している。京都府北部、兵庫県北部の山間部を抜け、鳥取県東部の海沿いを通過する路線においては、30 件を超える土砂流入・土石流が発生している。同様に、広島県南部に位置する路線においても、海沿いの路線を中心に 30 件を超える土砂流入・土石流が発生している。奈良県北部の山間部、島根県北部および山口県南部の海沿いを通過する路線においては、20 件を超える土砂流入・土石流が発生している。

このように、JR 西日本管内においては、山間部や海沿いの山裾部を通過する路線において、比較的多くの土砂流入・土石流が発生している。





#### (4) 月別および季別の発生件数

図-2.12 は、土砂流入・土石流の発生件数を月別に示したものである。土砂流入・土石流の多くは、降雨量が比較的多い6月から10月にかけて発生している。特に、7月は、平成30年7月豪雨による146件が含まれていることから発生件数が著しく多いが、その影響を除いたとしても95件であり、年間で最も土砂流入・土石流が発生している月である。また、秋雨前線や台風の影響で降雨量が多くなる9月が2番目に発生件数が多い月である。一方で、12月から3月にかけては、降雨量が比較的に少ない時期であるため、土砂流入・土石流は発生していない。

図-2.13 は、土砂流入・土石流の発生件数を季別に示したものである。土砂流入・土石流の発生割合は、夏(6～8月)が全体の約8割を、秋(9～11月)が全体の約2割を占めている。一方、春(3～5月)にはほとんど発生せず、冬(12～2月)には発生していない。

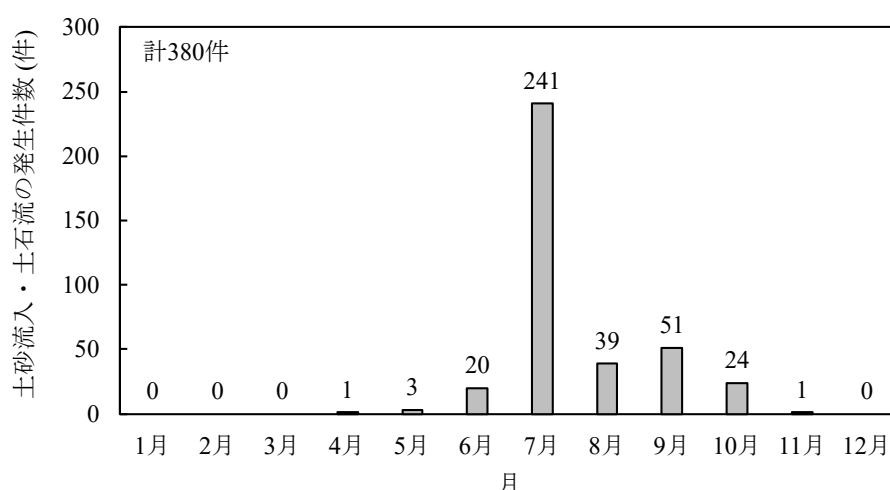


図-2.12 土砂流入・土石流の月別の発生件数（1976～2018 年度）

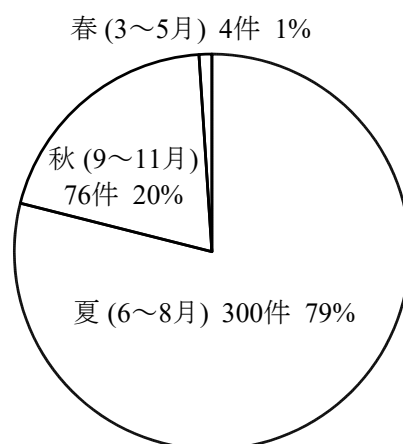


図-2.13 土砂流入・土石流の季別の発生件数（1976～2018 年度）

(5) 土砂流入・土石流発生時の降雨量

図-2.14 は、1976 年度から 2018 年度までの期間において、JR 西日本管内で土砂流入・土石流をもたらした降雨の最大 1 時間雨量と最大 24 時間連続雨量を示したものである。1 時間雨量と 24 時間連続雨量は、JR 西日本の降雨時運転規制に用いられている降雨量の種類（以下、雨量指標という）である。図-2.14 に示す降雨量は、気象庁、国土交通省および JR 西日本が設置している雨量計のうち、災害発生箇所に最も近い雨量計で計測されたものである。なお、平成 30 年 7 月豪雨については、西日本の広範囲にわたる豪雨であったため、土砂流入・土石流の発生箇所に最も近い雨量計で観測された各降雨のうち、最大 24 時間連続雨量が最大であった降雨を代表させてプロットした。

土砂流入・土石流の発生原因には、溪流の荒廃状況等も関係すると考えられるため、外力としての降雨量は多いものから少ないものまで様々である。

なお、最大 1 時間雨量について、0mm/h から 150mm/h までを 10mm/h ごとに区分し、それぞれの区分における頻度の割合を比較した場合、30～39mm/h が約 22%と最も割合が高い。最大 24 時間連続雨量について、0mm から 550mm までを 25mm ごとに区分し、それぞれの区分における頻度の割合を比較した場合、125～149mm が約 15%と最も割合が高い。なお、最大 1 時間雨量の平均値は約 48mm/h、最大 24 時間連続雨量の平均値は 203mm である。

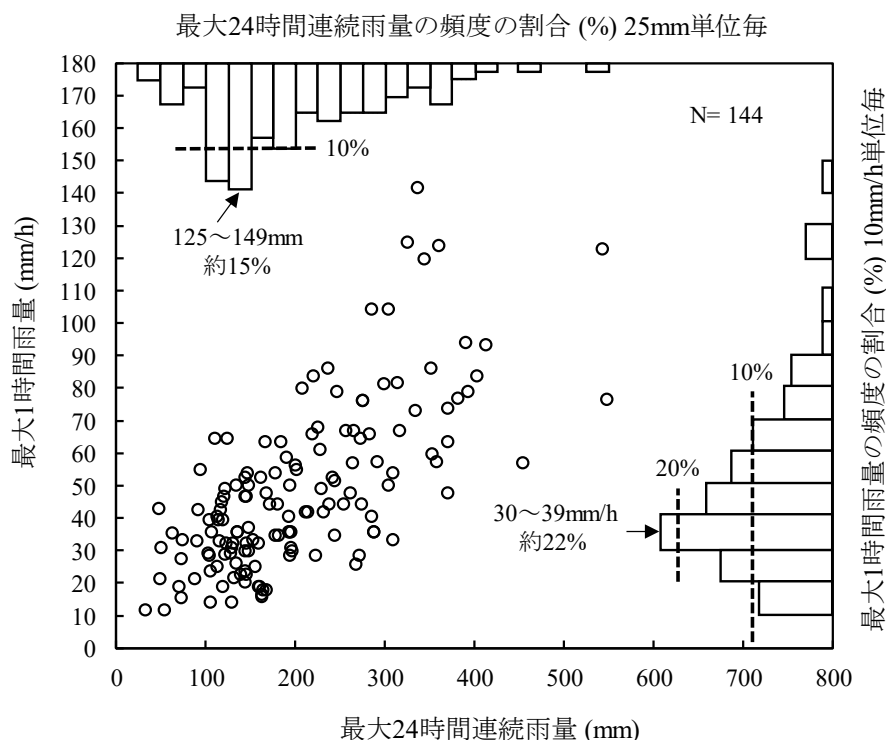


図-2.14 土砂流入・土石流発生時の降雨量（1976～2018 年度）

(6) 同一の溪流からの土砂流入・土石流の発生状況

前述したように、JR 西日本管内では、1976 年度から 2018 年度までに溪流を発生源とする土砂流入・土石流が 380 件発生した。これらの土砂流入・土石流のなかには、防護設備の対策効果を超える土砂等が発生したこと等によって、同一の溪流（以下、同一溪流という）から繰り返して発生したものもある。表-2.1 は、同一溪流からの土砂流入・土石流の発生件数とその溪流数およびそれらを乗じて算出した発生件数を示したものである。図-2.15 は、同一溪流における土砂流入・土石流の発生件数とそれらの件数に応じた土砂流入・土石流の発生件数を示している。表-2.1、図-2.15 に示すように、380 件の土砂流入・土石流をもたらした溪流の箇所数は 307 箇所である。そのうち、同一溪流からの土砂流入・土石流の発生件数が 1 件の溪流、すなわち過去に一度だけ土砂流入・土石流が発生した溪流の箇所数は 262 箇所であり、全体の約 85%を占める。次いで、同一溪流からの土砂流入・土石流の発生件数が 2 件の溪流の箇所数は 31 箇所であり、全体の約 10%を占める。一方、同一溪流から 3 件以上繰り返して土砂流入・土石流が発生した溪流の箇所数は 14 箇所であり、そのなかの 2 箇所では、過去に 6 件の土砂流入・土石流が発生している。

表-2.1 同一溪流からの土砂流入・土石流の発生状況（1976～2018 年度）

同一溪流からの 発生件数	溪流数	発生件数
1 件	262 箇所 (85%)	262 件 (69%)
2 件	31 箇所 (10%)	62 件 (16%)
3 件	4 箇所 (1%)	12 件 (3%)
4 件	8 箇所 (3%)	32 件 (9%)
5 件	0 箇所 (0%)	0 件 (0%)
6 件	2 箇所 (1%)	12 件 (3%)
合計	307 箇所	380 件

( )内の数値は全数に対する割合

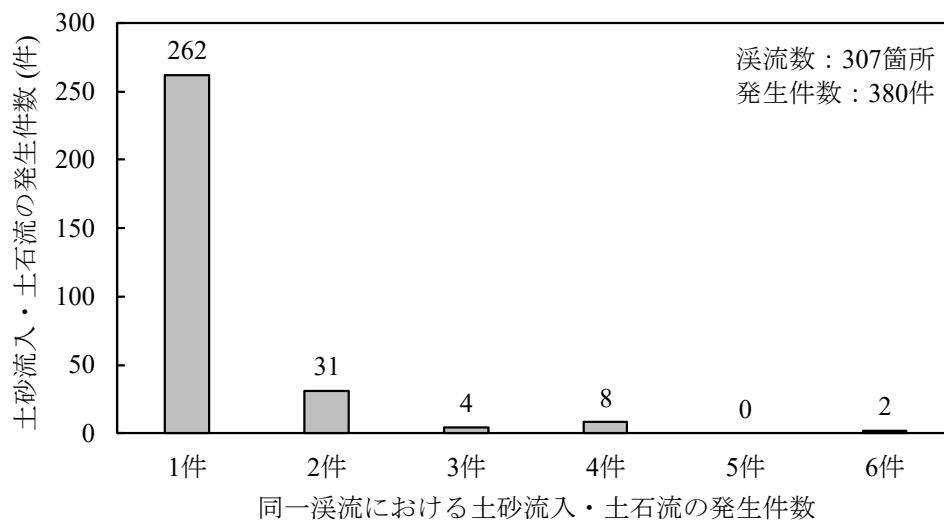


図-2.15 同一溪流からの土砂流入・土石流の発生件数（1976～2018 年度）

### 2.1.3 土砂流入災害の事例

2.1.1 および 2.1.2 で述べたとおり，鉄道では過去から土砂流入・土石流による数多くの被害を受けており，災害発生件数全体に占める土砂流入・土石流の割合は近年増加する傾向にある．これらの土砂流入・土石流の多くは，流域が極めて小さな溪流を発生源とする小規模なもの<sup>9)</sup>であるが，列車の安全走行に与える影響はその規模によらず，わずかな土砂等の流入によっても列車が脱線する等の重大事故が発生する可能性は高い．

以下に，JR 西日本管内で発生した 3 つの土砂流入の事例を示す．

#### (1) 芸備線 西三次駅・志和地駅間 土砂流入

2016年7月14日，広島県北部に位置する三次市付近において局地的な大雨が発生し，芸備線沿線の溪流から図-2.16 に示すように土砂や角礫等が線路内に流入した．その後，走行中の列車が流入土砂等に乗上げ脱線した．線路上には約  $5.7\text{m}^3$  の土砂等が流入しており，土砂流入の規模は比較的小さなものであった．

図-2.17 に，当該区間の線路平面図を示す．この区間は，溪流の下流域を通過する区間であり，切土をして線路が敷設されている．なお，地質は流紋岩で構成されている．切土斜面には，図-2.18 に示すように蓋付き構造の縦下水があり，溪流の表面水は，縦下水を通じて線路側に流下し，横断開水路を通じて線路右側の伏びに流入している．なお，伏びとは，土中に施工される通水または排水用の設備をいう．この伏びに流入した水は，線路に並行する道路の下に敷設された伏びを通じて河川に排出される．

図-2.19 に，土砂流入発生後の溪流の状態を示す．切土ののり肩から上流側に向かって約 50m の範囲には，不安定な溪床堆積物が多量に分布している．溪床堆積物の多く

は、0.1～0.3m 程度の大きさである。また、溪床には表面水による侵食跡がある。この範囲より上流側は勾配がやや緩やかになっており、不安定な溪床堆積物や著しい侵食跡はみられない。

なお、災害発生箇所の付近では、図-2.20 に示すように解析雨量で最大約 53mm/h の 1 時間雨量が観測されていた。災害直後には、縦下水の呑み口が土砂等で閉塞されていたことから、表面水によって流下した土砂等が、縦下水の呑み口を閉塞した後に縦下水を越流し、線路内に流入したと推定される。

JR 西日本では、線路沿線の土構造物や斜面の状態を把握するために、2.2.2 で詳述する斜面防災カルテ（以下、カルテという）を整備している。このカルテにおける当該溪流の評価は、溪床堆積物が分布しているが、縦下水周辺に土砂の堆積はなく、伏びの通水状況も健全であるとの理由で、5 段階（危険度が高い順番に、AA, A, B, C, S）の評価のうち、B ランクとされていた。



図-2.16 土砂流入の状況

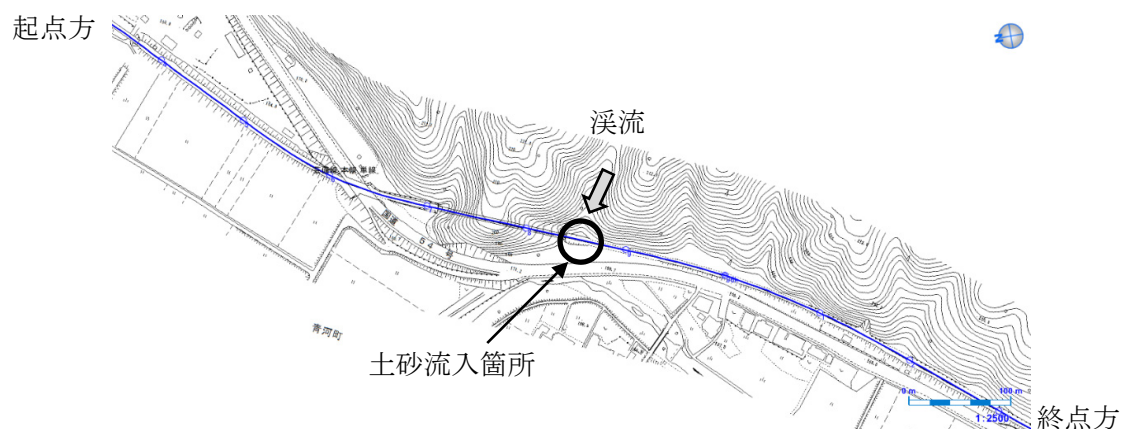


図-2.17 土砂流入箇所（線路平面図）

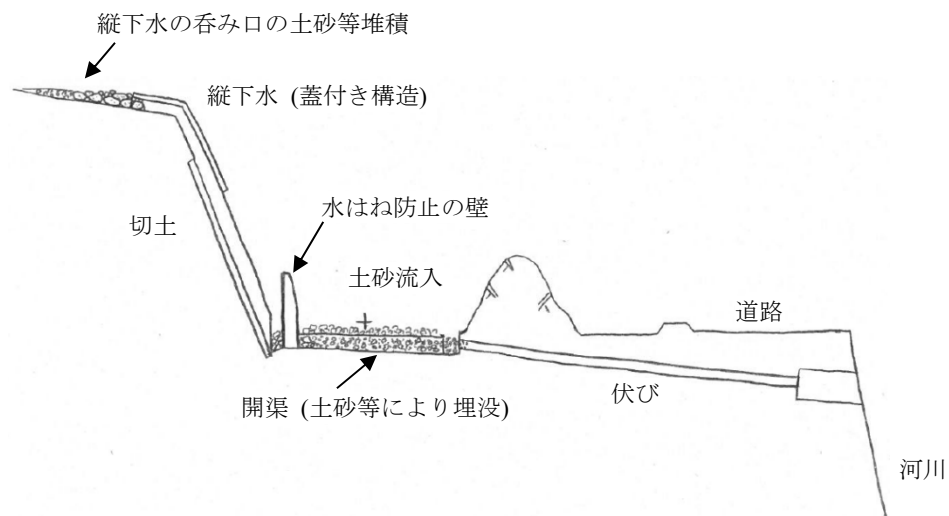


図-2.18 線路付近の状況および排水構造



図-2.19 土砂流入発生後の溪流の状態

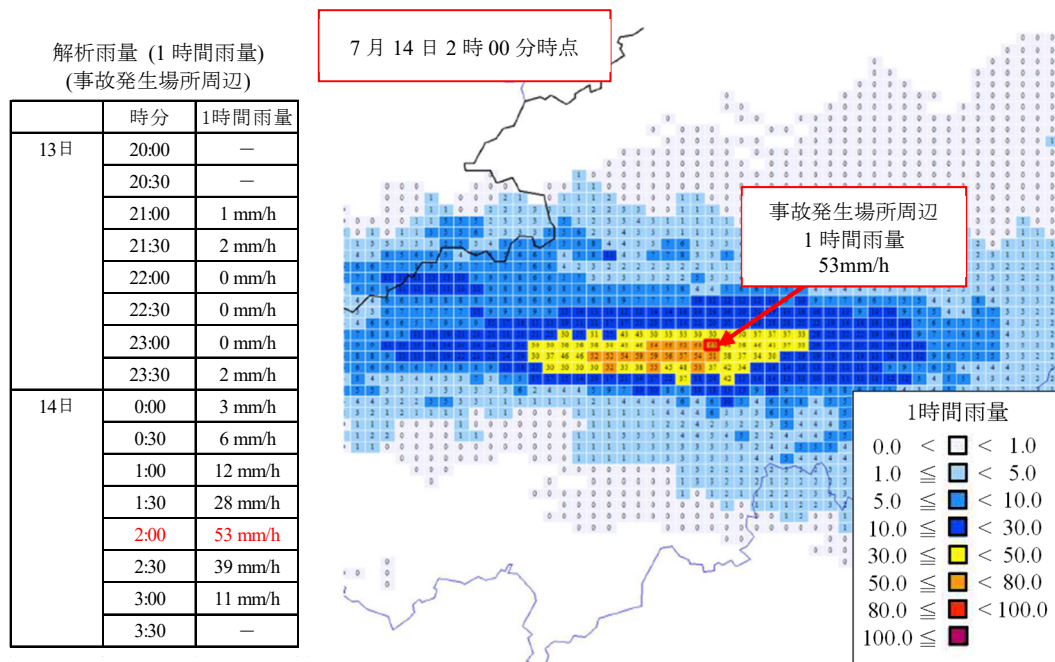


図-2.20 降雨履歴 (2016 年 7 月 13 日 21 時から 7 月 14 日 3 時まで)

(文献 10)を一部修正・加筆)

## (2) 紀勢本線 紀伊日置駅・椿駅間 土砂流入

2017 年 6 月 21 日未明、紀勢本線紀伊日置駅・椿駅間において、図-2.21 に示すように溪流から土砂等が線路内に流入した。当該箇所は、図-2.22 に示すように溪流出口付近の平坦地に線路が敷設されている区間にあり、地質は、砂岩、堆積岩で構成される。災害発生箇所から約 4km 離れたアメダス観測所「日置川」の降雨量データを図-2.23 に示す。雨は 2017 年 6 月 20 日 23 時頃から降り始め、6 月 21 日 11 時頃に降り止んでおり、その間における最大 1 時間雨量は 87mm/h、24 時間連続雨量は 304mm であった。

図-2.24 に、土砂流入発生後の溪流の状態を示す。線路付近の溪床は著しく侵食されており、溪床には土砂や 0.1～0.3m 程度の大きさの岩塊等が多量に堆積している。さらに上流の溪岸斜面には多数の崩壊跡が確認でき、倒木もみられる。また、線路から約 100m 離れた箇所には高さ約 10m の露岩があり、露岩下には、直径約 1m 程度の岩塊が多数存在している。なお、線路と溪流の交差部は水路となっている。

災害原因は、大雨による多量の表面水により流下した溪床堆積物が、水路を閉塞後、越流したためであると推察される。





図-2.21 土砂流入の状況

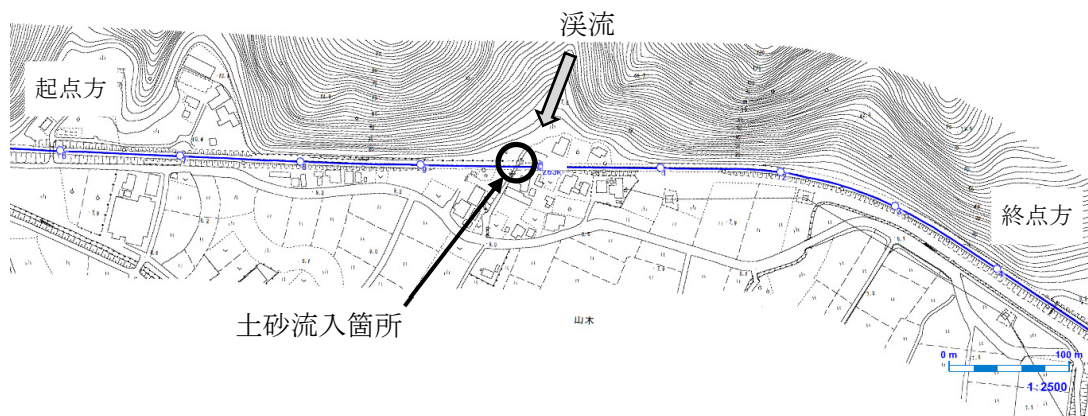


図-2.22 土砂流入箇所（線路平面図）

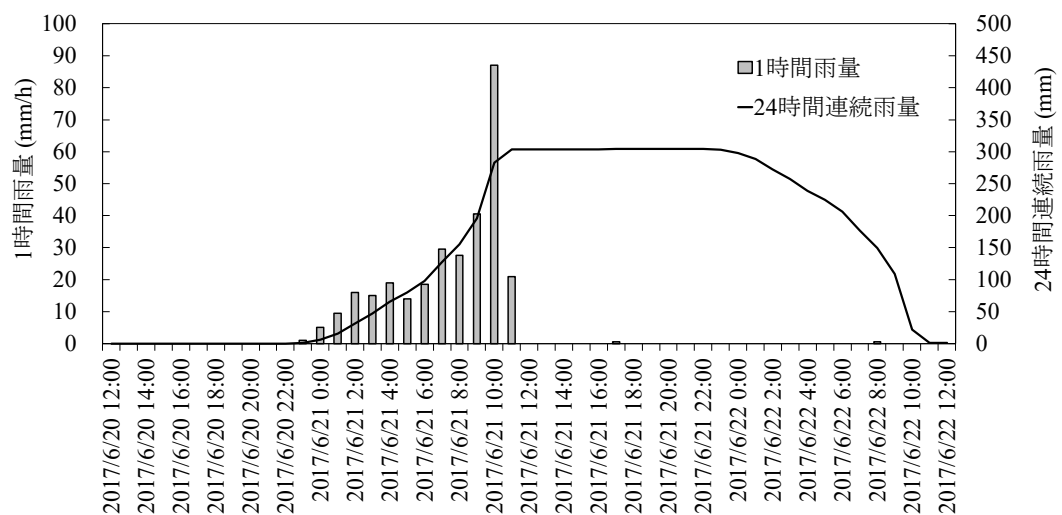


図-2.23 降雨履歴

（2017年6月20日12時から6月22日12時まで）

（災害現場から約4km離れたアメダス観測所「日置川」の降雨量データ）



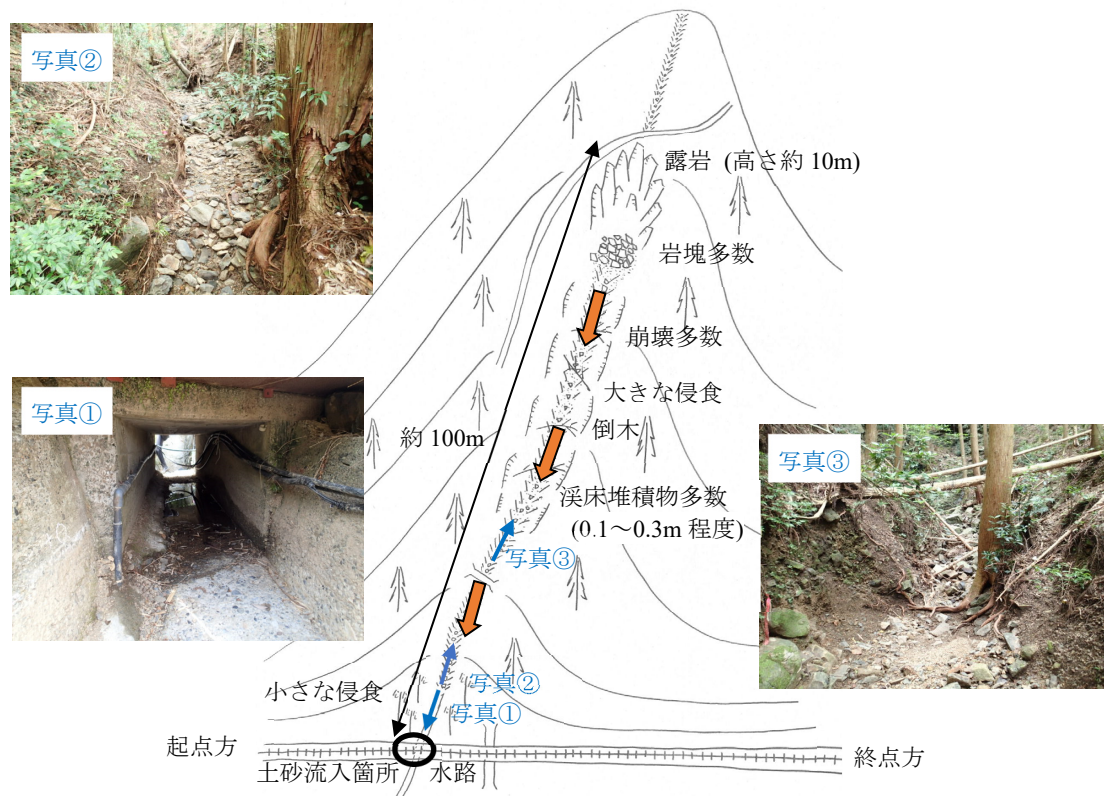


図-2.24 土砂流入発生後の溪流の状態

### (3) 山陽本線 岩田駅・島田駅間 土砂流入

2009 年 7 月 21 日未明，山陽本線岩田駅・島田駅間において，図-2.25 に示すように溪流から土砂等が線路内に流入した．当該溪流は，図-2.26 に示すように，トンネル坑口付近に位置し，地質は，花崗岩で構成される．

災害発生箇所から約 10km 離れたアメダス観測所「下松」で観測された降雨量データによると，雨は図-2.27 に示すように，2009 年 7 月 20 日と 7 月 21 日に観測されており，7 月 21 日 9 時には，47.5mm/h の最大 1 時間雨量が記録されている．なお，災害発生箇所から約 2km 離れた岩田駅に設置されている鉄道雨量計では，7 月 21 日 8 時において，70mm/h の最大 1 時間雨量が記録されている．

図-2.28 に，土砂流入発生後の溪流の状態を示す．溪流の出口付近には，排水溝が整備されており，排水溝の流水は，石積造りの縦下水を流下し，線路横の排水溝に導かれる．溪床は，約 1m の幅で蛇行するように侵食されており，侵食箇所には流水が存在している．また，その周辺には流水のない約 0.5m の侵食跡もある．溪流の上流には，崩壊跡が数箇所存在する．溪流には，平坦な湿地帯が 2 箇所存在しており，伏流水がある可能性がある．

災害原因は、大雨によって溪床が侵食され、それに伴って多量の土砂等が表面水とともに流下したためであると推察される。



図-2.25 土砂流入の状況

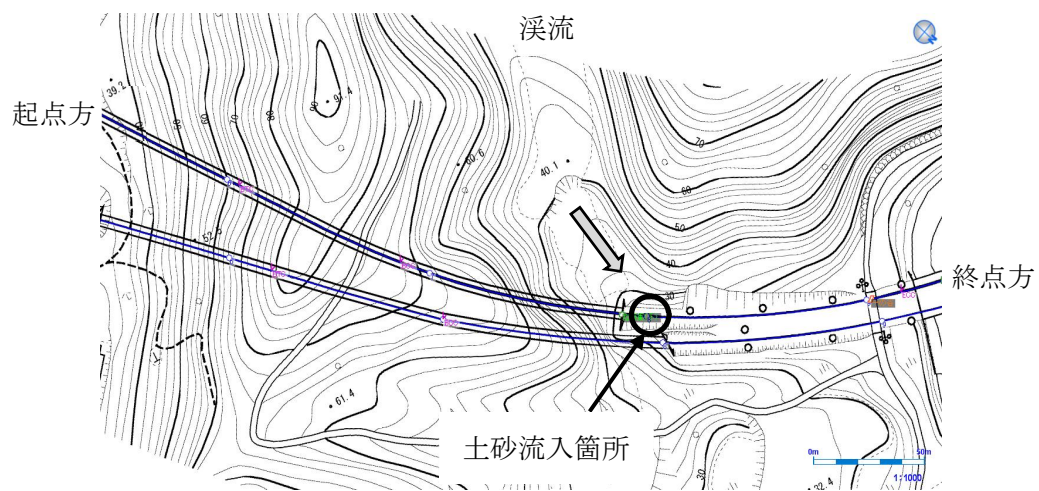


図-2.26 土砂流入箇所（線路平面図）

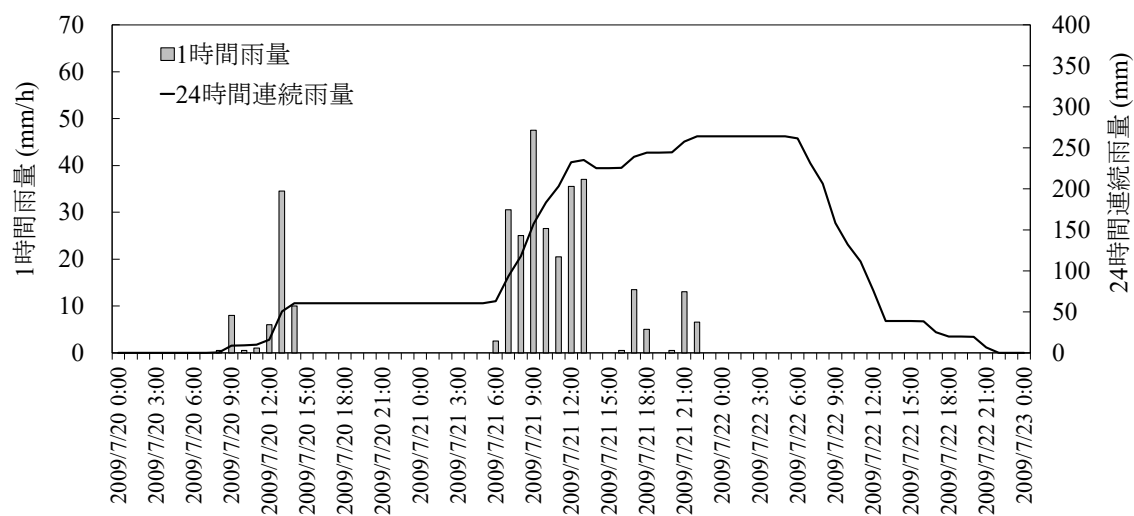


図-2.27 降雨履歴

(2009年7月20日0時から7月23日0時まで)

(災害発生箇所から約10km離れたアメダス観測所「下松」の降雨量データ)

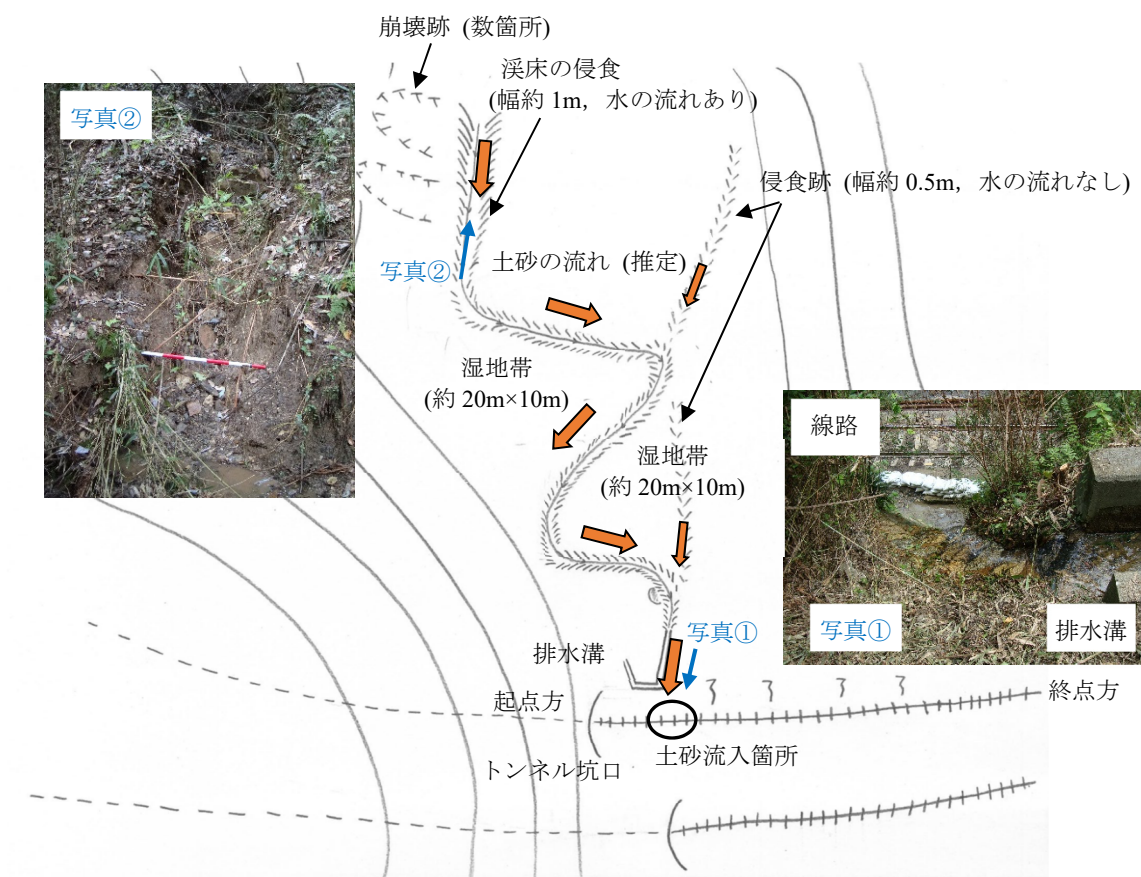


図-2.28 土砂流入発生後の溪流の状態

## 2.2 鉄道における斜面防災対策の現状

### 2.2.1 鉄道施設の検査と健全度判定

1.1 で述べたように、鉄道事業者は、土構造物維持管理標準や自社の組織や体制に応じて整備した検査体系や技術基準に基づき、盛土や切土等の土構造物や自然斜面、排水設備、防護設備等（以下、土工等設備という）の維持管理を実施している。

なお、鉄道事業者にとって、線路沿線の自然斜面を盛土や切土等の鉄道構造物と同等に扱うことは厳密には難しい面もあるが、JR 西日本では、近年増加傾向にある自然斜面からの土砂流入等に対して安全を確保することの重要性を踏まえて、線路から比較的近い範囲の自然斜面については、鉄道構造物に準じた取り扱いをすることとしている。

鉄道構造物の検査の区分<sup>11)</sup>を図-2.29 に示す。初回検査は、新設や改築を行った鉄道構造物の初期の状態を把握することを目的に供用開始時に行う検査である。全般検査には、通常全般検査と特別全般検査がある。通常全般検査は、鉄道構造物の健全度を2年に一度の周期で検査するものであり、特別全般検査は、トンネル等の重要構造物に対して検査精度を高めて実施するものである。なお、個別検査は、全般検査等の結果、健全度が低いと判定された構造物に対してより精密に行う検査である。随時検査は、災害時や梅雨期の前等に臨時的に行う検査である。

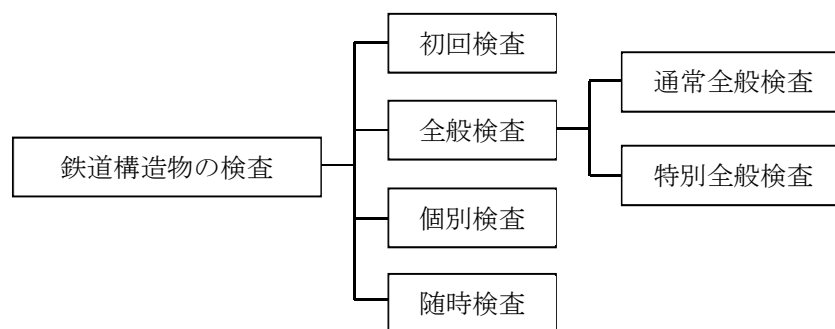


図-2.29 鉄道構造物の検査の区分（文献 11)を一部修正・加筆）

JR 西日本における土工等設備の検査の区分を図-2.30 に示す。JR 西日本では、土工等設備に対する全般検査として、通常全般検査を実施している。通常全般検査には、保線を担当する社員が線路を徒歩で巡回する時に行う巡回検査と、巡回検査よりもやや広い範囲を、土木を担当する社員が確認する巡回以外検査がある。これらの検査は、JR 西日本が組織体系等を考慮して定めたものである。

なお、渓流を対象として行う検査は、通常全般検査、個別検査および随時検査である。

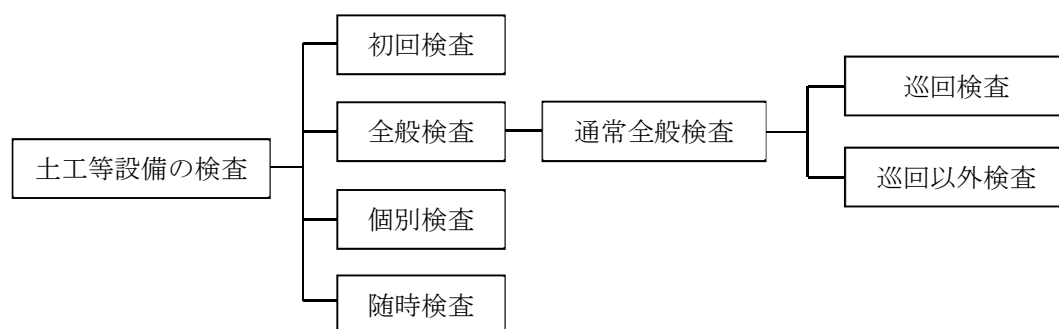


図-2.30 JR 西日本における土工等設備の検査の区分

土構造物維持管理標準における維持管理の流れ<sup>11)</sup>を図-2.31に示す。また、鉄道構造物に対する健全度判定区分<sup>11)</sup>を表-2.2に示す。鉄道構造物に対して、定期的に行う全般検査および随時検査を行い、健全度を判定する。健全度が低いと判定された場合には、より精密に行う個別検査を実施し、必要により措置を行った上で、通常の維持管理に戻るという流れとなる。

表-2.2に示すように、すべての検査において、健全度が低い方から A, B, C, S の 4 段階に区分する。A ランクはさらに細分化され、健全度が著しく低く、直ちに措置を行う必要があるものを AA, 早急に措置を行う必要があるものを A1, 必要な時期に措置を行うものを A2 と判定することを基本としている。

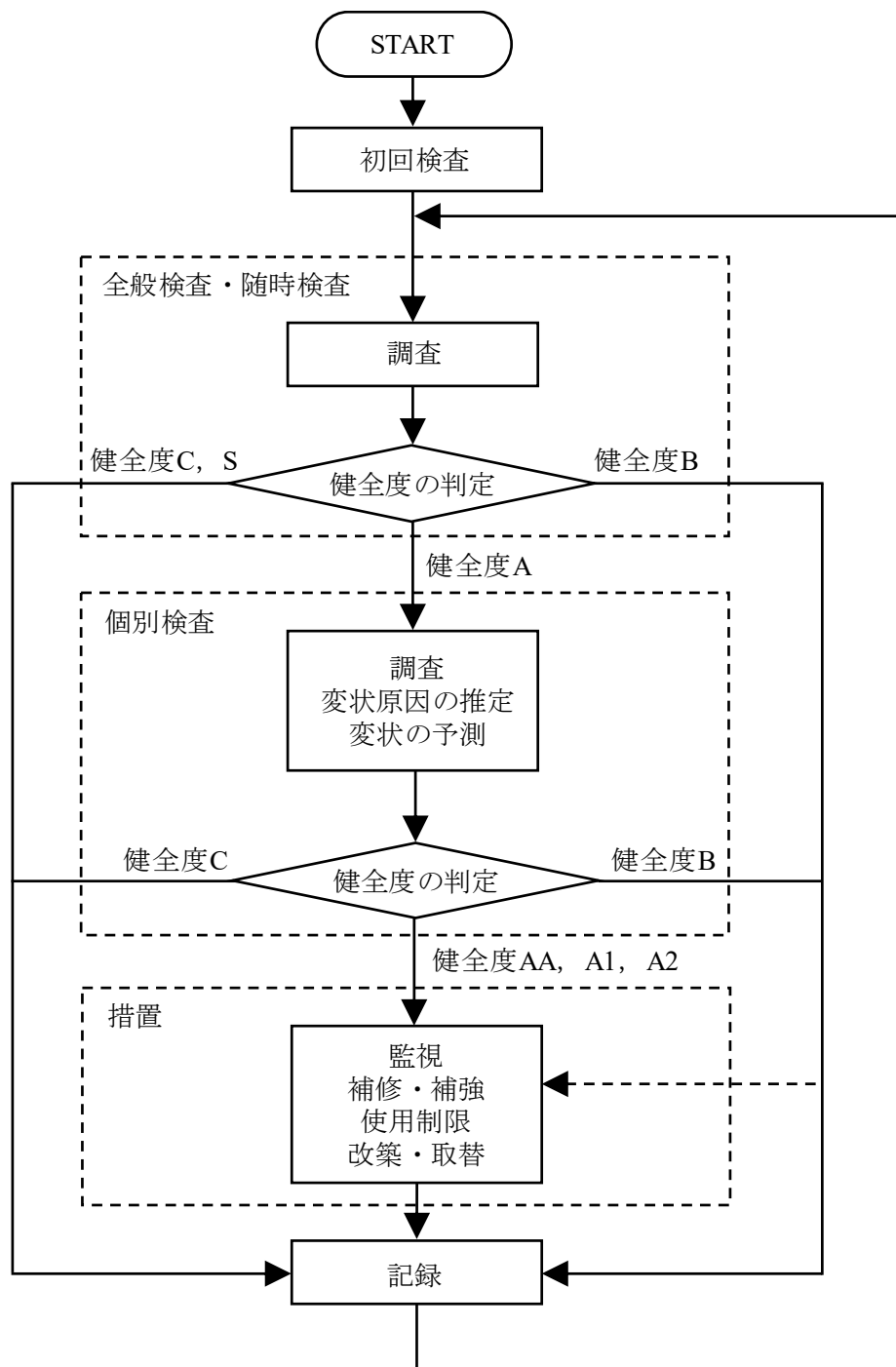


図-2.31 鉄道構造物の検査の概要（文献 11)を一部削除）

表-2.2 鉄道構造物の健全度判定区分 <sup>1)</sup>

健全度		構造物の状態
A		運転保安, 旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす, またはそのおそれのある変状等があるもの
	AA	運転保安, 旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり, 緊急に措置を必要とするもの
	A1	進行している変状等があり, 構造物の性能が低下しつつあるもの, または, 大雨, 出水, 地震等により, 構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2	変状等があり, 将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
B		将来, 健全度 A になるおそれのある変状等があるもの
C		軽微な変状等があるもの
S		健全なもの

JR 西日本においては, のり面保護工, 土留壁等の防護設備および斜面そのものの変状や不安定性の評価と列車運行への影響度とを表-2.3 のとおり組み合わせることで土工等設備の総合的な健全度判定を行う. 設備や斜面そのものの変状や不安定性は, それらの状態がよくない順に aa ランクから s ランクまでの 5 段階で評価し, 列車運行への影響度は, 大きい順に 1 から 3 までの 3 段階で評価する. これらの評価を組み合わせることで A ランクから S ランクまでの 5 段階で総合的な健全度判定を行う. 表-2.4 に, 渓流の危険度に関係する不安定性に対する列車運行への影響度の評価区分について例示する.

なお, 盛土や切土の土構造物や自然斜面については, 個々の特性が異なることおよび地域ごとに気象条件が異なることから定量的な評価が困難な場合が多いため, JR 西日本では, 落石に対する健全度判定を除き, A1 と A2 に区分しないこととしている.

渓流については, 渓流からの土砂等流出の危険度を, 危険度が高い順に aa ランクから s ランクまで評価し, 列車運行への影響度を, 影響度が大きい順に 1 から 3 まで評価して, これらを組み合わせることで渓流の危険度評価を行う. 例えば, 渓流からの土砂等流出の危険度が b ランクで, 列車運行への影響度が 1 の場合は「b-1 : B」となる.

なお, 前述したように, 本論文において渓流の状態を示す場合には, 「健全度」という表現に代えて「危険度」を用いる.



表-2.3 JR 西日本における土工等設備の健全度判定表  
(文献 12)を一部修正・加筆)

		土工等設備の変状および不安定性の評価 (渓流からの土砂等流出の危険度評価)				
		aa	a	b	c	s
列車運行への 影響度評価	1	AA	A	B	C	S
	2	A	B	B	C	S
	3	B	B	C	C	S

[土工等設備の変状および不安定性 (渓流からの土砂等流出の危険度)評価の区分]

aa：きわめて不安定，a：不安定，b：やや不安定，c(s)：安定

[対策工等の効果を考慮した列車運行への影響度評価の区分]

1：影響大，2：影響中，3：影響小

表-2.4 列車運行への影響度評価（不安定性）  
(文献 13)を一部修正・加筆)

評価 区分	列車運行への影響度（不安定性）
1	対策がなされておらず，列車運行におよぼす影響が大きいもの。 対策がなされていても対策の効果が十分でなく，小崩壊等でも列車運行におよぼす影響が大きいもの。
2	対策はなされていないが，崩壊等が発生しても線路より離れていて，列車運行におよぼす影響が小さいもの。 対策がなされており対策の効果はあるが，中～大規模な崩壊等が発生した場合には列車運行におよぼす影響が大きいもの。
3	対策はなされていないが，線路よりかなり離れており，列車運行におよぼす影響がないもの。 対策がなされており対策の効果が十分であって，列車運行におよぼす影響が小さいもの。

※列車運行への影響度評価には，第三者・重要構造物への被害についても考慮する

なお，鉄道構造物の健全度が低いと判定された場合には，列車運行の安全性を確保するために対策工を施す。渓流の危険度が高いと評価された場合には，対策工を計画することになるが，土砂流入・土石流の発生源は線路から遠く離れた鉄道管理用地外となることも多く，地権者との協議が必要となる場合も多い。また，鉄道では，前述したように，降雨時運転規制をのり面保護工等のハード対策と合わせて行うことで，列車の安全走行を確保している。



## 2.2.2 カルテの作成・更新時における調査と評価

2004 年度に、JR 西日本管内の因美線，三江線，姫新線，津山線において斜面が崩壊し，それに伴って 4 件の列車脱線事故が発生した．JR 西日本は，事故の再発防止を目的として，2005 年度に「土構造物維持管理検討委員会」（委員長：沖村孝 神戸大学教授（当時））を発足し，土工等設備および自然斜面の状態を詳細に把握するためのカルテ<sup>12)～20)</sup>の作成に着手した．現在，JR 西日本では，盛土，切土およびのり面保護工等の土工等設備を個々に管理するだけでなく，地形や地質，立地条件等も含めた斜面全体の状態を把握するために，線路延長方向に最大で約 500m，線路から直角方向に最大で約 100m の管理ブロックを設定し，カルテに管理ブロック単位の調査結果を記載している．

図-2.32 に，JR 西日本における土工等設備の維持管理の基本的な流れとカルテの位置付け<sup>13),18)～20)</sup>を示す．カルテで抽出された検査時の着眼点は，通常全般検査等で確認することになっている．また，カルテは，対策工の位置や施工範囲の検討，あるいは災害が発生した場合に実施する緊急点検の類似箇所抽出等に活用されている．

なお，カルテは，通常全般検査等で得た情報に基づいて，前回検査以降に変化した状況や実施した対策工を追記する等，随時修正する．また，大規模な環境変化等を考慮して，概ね 10 年から 20 年の周期で全面的に見直して修正することとしている．

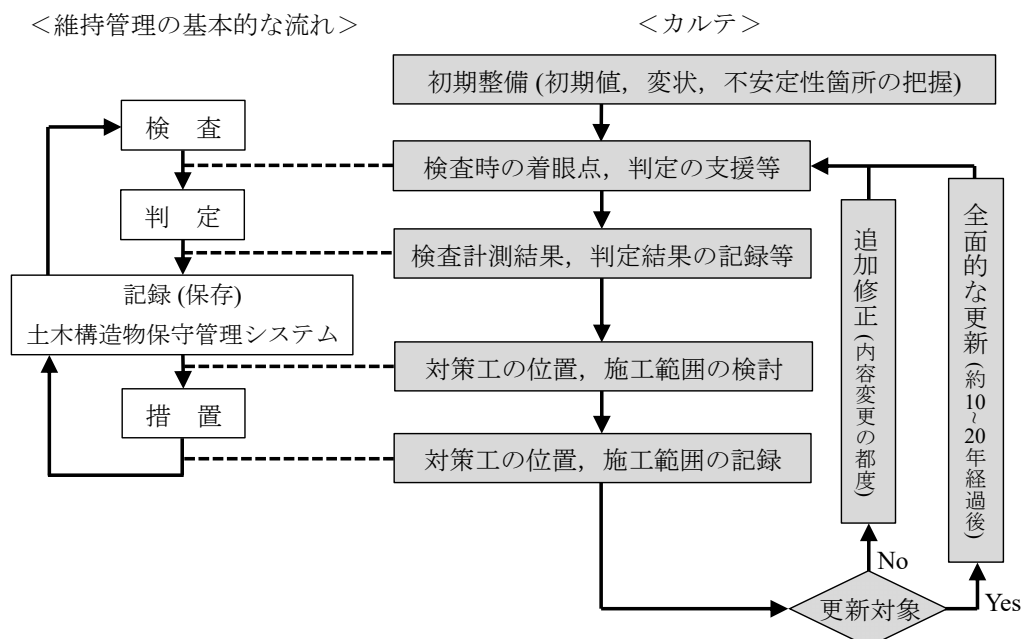


図-2.32 土工等設備の維持管理の流れとカルテの位置付け  
(文献 13)，18)～20)を一部修正・加筆)

カルテは、地形図等を用いた土構造物カルテ位置図、斜面管理マップ、現地状況の写真によって構成される。土構造物カルテ位置図の例を図-2.33 に示す。土構造物カルテ位置図は、管理ブロックの概要を把握するためにカルテ作成区間の路線概要図（1/2500）、カルテ作成位置概要図（1/25000）、空中写真および記事（路線概要等）で構成される。

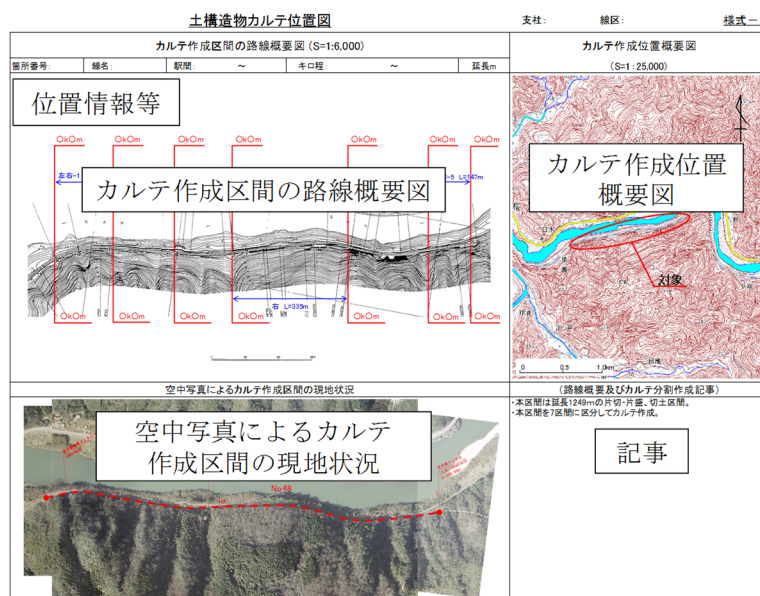


図-2.33 土構造物カルテ位置図の例

斜面管理マップの例を図-2.34 に示す。斜面管理マップは、カルテの中心となる部分であり、管理ブロックの調査結果を、①斜面状況がわかる調査スケッチ（平面図、断面図）、②地形、地質ならびに立地条件、周辺環境等を記述した区間概要、③管理ブロックに存在する斜面の変状ならびに不安定性に対する調査結果、④検査時の着眼点、⑤想定される災害形態、⑥評価結果、⑦カルテ更新の必要性の有無や局所的に注意すべき事項、災害履歴等を記載した特記事項としてまとめている。調査スケッチは、斜面状況の重要な点を絞って記載し、拡大図を多用する等してわかりやすく表現するようにしている。また、各箇所簡単な説明を付け加えるとともに、今後の検査時の着眼点、添付写真の番号と撮影方向の矢印を示している。検査時の着眼点については、各種検査で確認する重要項目であるため、例えば、斜面に発生した変状の状態や溪流の溪床堆積物の有無等の確認すべき内容を詳細に記述している。

調査範囲は、線路直角方向に対して水平距離で約 50m を基本としているが、それより上部の斜面に不安定性の高いものがある場合には、最大で約 100m までとしている。また、さらに上方に不安定性の高いものがあると推定される場合には、斜面上方の確認が別途必要であることをカルテに明記することになっている。



なお、JR 西日本では、土工等設備に関する膨大なデータを一元管理することを目的として、土工等設備管理システム<sup>16)</sup>を構築し、2009 年度から運用を開始した。土工等設備の維持管理データは、その情報量が膨大であり、従来の紙ベースでの管理は、非常に煩雑で非効率であった。JR 西日本では、土工等設備管理システムにより、検査計画、検査周期、検査実績、カルテ、災害履歴等のデータを保存管理するとともに、各部署の端末をネットワーク化して社内全体で情報を共有できるようにしている。図-2.36 に、土工等設備管理システムの一例を示す。

#### (a) 検査計画・検査周期

検査計画を入力する機能に加え、次に検査を実施する日までの残日数を確認でき、適切に周期管理をすることができる。

#### (b) 検査実績

検査実施後に、管理ブロック単位で、検査日、検査者、検査種別、当該管理ブロックに含まれる土工等設備の変状、不安定性の健全度判定等のデータを入力している。

なお、当該管理ブロックの各土工等設備の健全度判定のなかで、最も低い健全度判定が、当該管理ブロックの健全度判定となるように管理されている。

線名	土工ブロックNO	起点方駅名	終点方駅名	上り下り別	起点キロ程	終点キロ程	ブロック延長	検査基準日	備考	残日数
2-東海道本線	1	米原	米原	下り	443.99	444.32	0.32	2009/02/15		28日
2-東海道本線	2	米原	米原	下り	444.32	447.85	3.52	2009/02/15		7日
2-東海道本線	3	米原	彦根	下り	447.85	448.31	0.46	2010/03/15		
2-東海道本線	4	米原	彦根	下り	448.31	448.63	0.32	2010/03/15		

管理ブロックデータ (駅間、キロ程など)

検査基準日までの日数管理  
残日数が60日以下で黄色、30日以下で赤色

図-2.36 土工等設備管理システムの一例 (文献 16)を一部修正・加筆)



(c) カルテ

カルテの変状や不安定性の評価，検査時の着眼点，想定される災害形態等の主要項目を閲覧できる．また，調査スケッチや写真等の検査結果は，データとして追加保存できる．

(d) 災害履歴

過去に発生した災害の発生日時，災害形態，雨量情報，災害の概要，対策工事の概要等について，管理ブロックごとに管理している．なお，災害ごとの写真や対策工の図面等の任意のデータは，関連ファイルとして登録することができる．

また，JR 西日本では，GIS を活用した電子線路平面図システム<sup>16)</sup>（以下，平面図システムという）を導入している．平面図システムの概要を図-2.37 に示す．平面図システムでは，航空写真や線路平面図，地形図等のベースマップに構造物等の情報を重ね合わせたり，列車前頭から撮影したビデオを閲覧したりすることができる．平面図システムに土工等設備管理システムの管理ブロックの災害履歴等を重ね合わせて表示することが可能であり，この一元管理により，これまで点で管理していた各データを周辺の環境状況や地形も考慮した線として管理することができる．

溪流の状態や，その危険度評価および土砂流入・土石流の災害の記録等も，土工等設備管理システムや平面図システムに登録することで，効率的かつ効果的に管理することができる．



図-2.37 電子線路平面図システムの一例（文献 16)を一部修正・加筆）

### 2.2.3 降雨量に基づく運転規制による事故防止

図-2.38 に、鉄道における降雨量の観測の概要を示す。前述したように、降雨時運転規制は、鉄道雨量計で観測した降雨量に基づいて実施されている。図-2.38 に示すように、鉄道雨量計によって観測された降雨量が、速度規制や運転中止の規制基準値（以下、運転規制値という）を超えた時に当該雨量計が受け持つ区間の運転を規制する。しかしながら、局地的な大雨が鉄道雨量計間で発生した場合、鉄道雨量計によってそれらの降雨量を計測できない可能性がある。そのため、各鉄道事業者は、解析雨量を利用して局地的な大雨を捕捉することを検討し、一部の鉄道事業者においては、解析雨量を用いた降雨時運転規制が行われている。

なお、降雨時運転規制の概要等については、5.2 において詳細する。

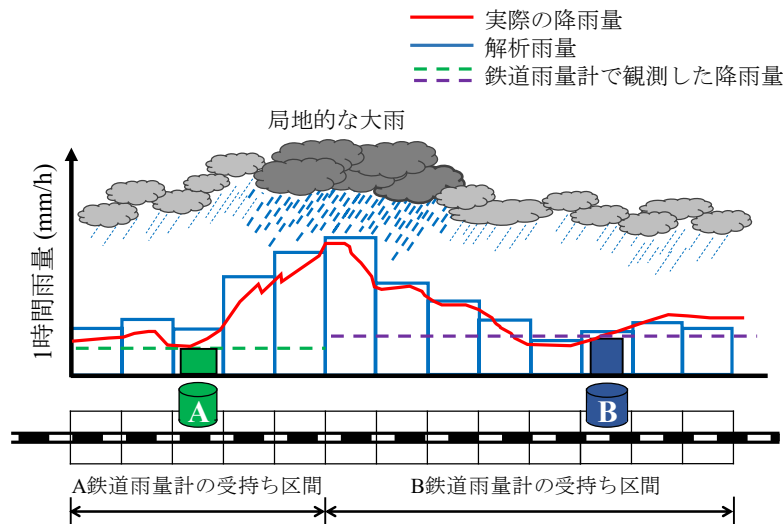


図-2.38 鉄道における降雨量の観測の概要（文献7）を一部修正・加筆）

### 2.3 土砂流入災害防止のための課題

本研究における課題は、以下に示すように、溪流の危険度評価に関する課題と、降雨時運転規制に関する課題に大別される。

#### (1) 溪流の危険度評価に関する課題

鉄道沿線には、膨大な数の溪流が存在し、流域が鉄道管理用地外にも広くおよぶものも多い。鉄道では、線路沿線の盛土や切土および鉄道管理用地内やその周辺の自然斜面等の状態を、調査者が現地を踏査することで確認しているが、線路から遠く離れた流域の状態を踏査で確認することは、時間的、労力的な制約条件があるなかで現実的に困難である。

従来、溪流の危険度評価は、鉄道沿線の土工等設備を検査する能力をもつ現場技術者

の定性的な判断により行われてきた。具体的には、溪床の緩急の程度および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等を主に目視で確認し、過去に調査した他の溪流の状態と相対比較すること等により危険度を評価していた。しかしながら、溪流には、地形、地質、線路と溪流との交差構造等の様々な要因が複雑に混在しており、また溪流の危険度評価は、盛土と切土のように統一された判定基準<sup>11)</sup>に基づいて実施されていないことから、調査者の危険度判断能力や経験の差によって、評価結果にばらつきが生じやすい。加えて、必ずしも斜面調査の専門技術者ではない鉄道の現場技術者にとって、溪流の危険度を精度よく評価することは技術的に容易ではない。

すなわち、多くの時間と労力を要せず効率的に溪流を評価できる手法を作成すること、また、調査者の危険度判断能力や経験の差による評価結果のばらつきが生じにくく、かつ精度の高い効果的な評価手法を作成することが課題である。

## (2) 降雨時運転規制に関する課題

離散的に配置された鉄道雨量計の設置間隔は、近年増加傾向にある局地的な大雨の雨域よりも広い場合があるため、鉄道事業者は、線路直上メッシュの解析雨量を降雨時運転規制に導入することを検討している。しかしながら、線路から遠く離れた溪流を発生源とする土砂流入・土石流は、線路直上メッシュ以外のメッシュの降雨によって発生する可能性がある。そのため、溪流の流域を発生源とする土砂流入・土石流による災害を防止するために、図-2.39に示すように、線路からどの程度離れた位置までの降雨をモニタリングする必要があるかを明らかにすることが課題となっている。

すなわち、解析雨量を用いて降雨時運転規制を行う場合において、効果的に土砂流入・土石流を防止するための降雨のモニタリング範囲を設定することが課題である。

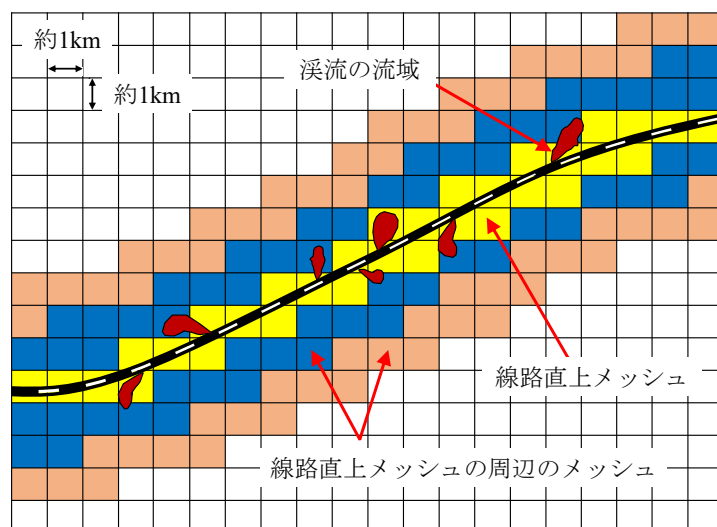


図-2.39 降雨のモニタリング範囲

## 第2章の参考文献

- 1) OTA, N. : Disaster Prevention Technology to Improve Safety of Railway, Japanese Railway Engineering, p.18-21, No.203, Jan.2019.
- 2) 日本鉄道施設協会:防災特集 各年度の災害の概要, 日本鉄道施設協会誌, 1995-2018. 6.
- 3) 西日本旅客鉄道株式会社:JR 西日本ホームページ 企業概要, <https://www.westjr.co.jp/company/info/outline/>, 2019.
- 4) 杉山友康:半世紀の鉄道災害を振り返って, 京都大学 災害リスクマネジメント工学セミナー (JR 西日本) 講座資料, p.11, 2014.3.
- 5) 日本国有鉄道施設局:国有鉄道線路災害記録, 1955-1986.
- 6) 佐々木良, 杉山友康:鉄道線路への土砂流入に対応する降雨モニタリングに関する検証, 第52回地盤工学研究発表会, T-04, pp.1871-1872, 2017.
- 7) 森泰樹, 佐々木良, 藤井昌隆, 杉山友康, 里深好文:土砂流入災害をもたらす降雨の空間分布特性と降雨モニタリングに関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.1, pp.1-14, 2019.3.
- 8) 太田直之, 杉山友康:災害の推移と今後の防災, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, No.6, pp.17-19, 2009.6.
- 9) 村上温, 野口達雄監修:鉄道土木構造物の維持管理, 日本鉄道施設協会, pp.382-383, 1998.9.
- 10) 運輸安全委員会:鉄道事故調査報告書, 西日本旅客鉄道株式会社 芸備線 西三次駅～志和地駅間 列車脱線事故, RA2017-4, 2017.6.
- 11) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編) 土構造物 (盛土・切土), 丸善, 2007.1.
- 12) 森泰樹, 藤井昌隆, 杉山友康, 里深好文:線路への小規模土砂流入の危険度評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.1, pp.31-48, 2019.5.
- 13) 松田好史:鉄道強靱化における JR 西日本の斜面および土構造物の防災・減災の取り組み, 交通と統計, No.56, pp.80-100, 2019.7.
- 14) 細岡生也, 村田一郎, 杉山友康, 沖村孝:鉄道における土構造物管理のためのカルテの考案, 土木学会第61回年次学術講演会, 4-336, 2006.9.
- 15) 小林徹:土構造物管理のための斜面防災カルテ策定, 日本鉄道施設協会誌, Vol.46, No.2, pp.21-23, 2008.2.
- 16) 小林徹:土工等設備管理システムの開発, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, No.4, pp.65-68, 2009.4.



- 17) 森泰樹：JR 西日本における斜面の維持管理の現状，新線路，Vol.63，No.4，pp.17-19，2009.4.
- 18) 高馬太一，泉並良二，深田隆弘，森泰樹，荒巻智：土構造物維持管理のための斜面防災カルテの利活用，第 47 回地盤工学研究発表会，C-09，pp.5-6，2012.7.
- 19) 荒平義生，高馬太一，渡邊恭崇，泉並良二，杉山友康：斜面防災カルテを活用した土工等設備の維持管理，土木学会第 69 回年次学術講演会，pp.1013-1014，2014.9.
- 20) 森泰樹，藤井昌隆，木村元哉：JR 西日本における斜面管理の現状と今後の取組み－斜面防災カルテの利活用，溪流災害の防止の取組み－，土木施工，Vol.58，No.9，pp.39-42，2017.9.

## 第3章 過去の被災事例分析に基づく線路近傍溪流の危険度評価に関する研究

### 3.1 目的と概要

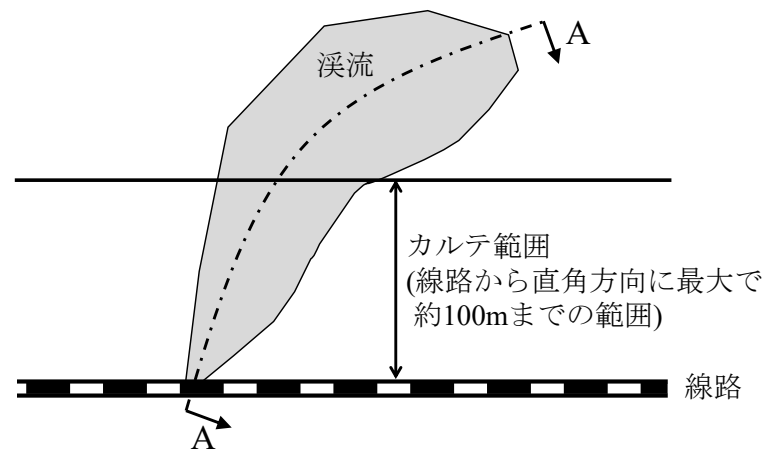
近年、全国各地で局地的な大雨や観測史上最大の豪雨が度々観測される等、降雨強度が高まる傾向にある。このような雨の降り方の変化に伴って、2.1.2 で示したとおり、盛土崩壊や切土崩壊等の鉄道施設の被害が減少する一方で、線路から離れた鉄道管理用地外の自然斜面を発生源とする土砂流入・土石流の発生割合が相対的に増えてきた。

鉄道線路への土砂流入・土石流の多くは、河川氾濫を伴うような大規模なものではなく、流域が比較的小さい溪流<sup>1)</sup>を発生源とする小規模なものであり、流入してきた土砂等が線路の一部を埋没させる程度のものもある。しかしながら、列車の安全走行に与える影響は、線路への土砂等の流入量によらず、2.1.3 (1) の芸備線での土砂流入事例で示したように、わずかな流入土砂等に列車が乗り上げて脱線する事故も発生している。そのため、鉄道事業者にとっては、発生頻度が高く、かつ危険度も高い土砂流入を防止することが重要となっている。なお、線路沿線には、膨大な数の溪流が存在し、それらの流域は鉄道管理用地外にもおよぶこと、また、溪流には、地形、地質および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等の様々な要因が混在することから、危険度評価には、多くの時間を要する上に、調査者の危険度判断能力や経験の差による評価結果のばらつきが生じる可能性がある。そのため、鉄道事業者では、溪流の危険度評価を効率的かつ効果的に行うことができる手法の作成が課題となっている。

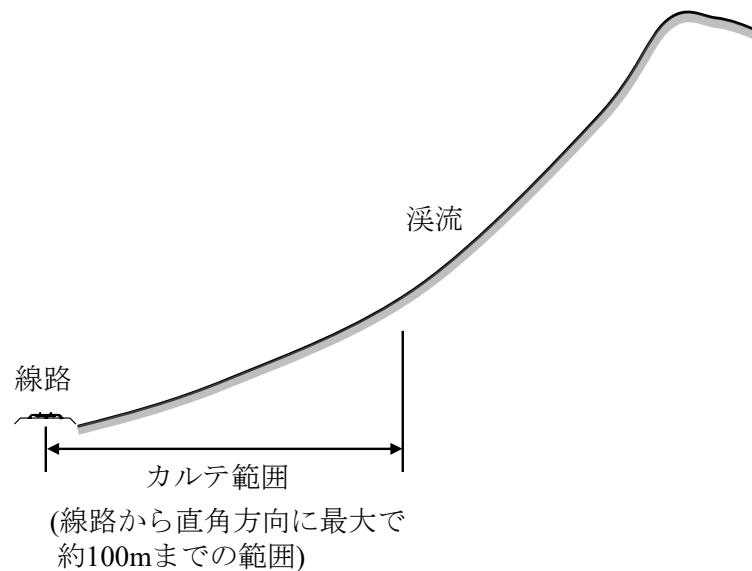
なお、1.2 で示したように、過去に提案されてきた溪流の危険度評価手法は、大規模な土石流の防止を目的としたものが多く、鉄道線路が被る頻度が高い土砂流入の防止に着目した危険度評価に関する研究は極めて少ない。

一方、JR 西日本は、盛土、切土および落石に対しては、土構造物維持管理標準や社内における土構造物に関する標準に定められている判定基準に基づいて、健全度判定を行ってきたが、土砂流入に対しては、調査者が掘り所とするような危険度評価手法を作成できていなかった。

本章では、上記の課題を踏まえ、図-3.1 に示すように、線路から直角方向に最大で約100m までの範囲を対象とするカルテの作成・更新時の調査範囲（以下、カルテ範囲という）における溪流の状態や、線路と溪流の交差部の構造等を簡易な調査で確認することによって溪流の危険度を評価できる手法について論じる。具体的には、JR 西日本管内で実施した溪流調査に基づく実態分析の結果等<sup>2)~6)</sup>から作成した、溪流からの土砂等流出の危険度と、防護設備の対策効果等を考慮した列車運行への影響度との組み合わせにより、溪流の危険度を評価する手法<sup>7)</sup>について提案する。



(a) 平面図



(b) A-A 断面図

図-3.1 カルテ範囲（カルテ作成・更新時の調査範囲）の概要

## 3.2 渓流調査に基づく実態分析

### 3.2.1 渓流の定義

本論文では、以下に示す 4 つの条件のいずれかに合致するものを渓流として定義する。

- ① 図-3.2 に示すように、1/2500 地形図において、谷地形が確認できるもの
- ② 図-3.3 に示すように、カルテにおいて、谷地形として描かれているもの
- ③ 表-3.1 に示すように、カルテにおいて、想定される災害形態が土石流または土砂流入とされているもの

ただし、**図-3.4** に示すように、延長約 4m 以上の橋りょうで線路と交差する溪流は、流域が大きく、想定される災害規模は大規模なものである可能性が高いと判断し、ここでは溪流として定義しない。一方で、**図-3.5** に示すような延長が数 m の橋りょうでは、**図-3.6** に示すように大雨の増水により流下してきた土砂等による著しい堆積が考えられるため、溪流として定義する。

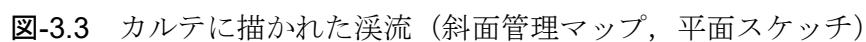
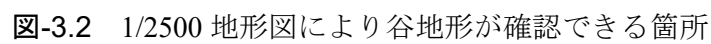
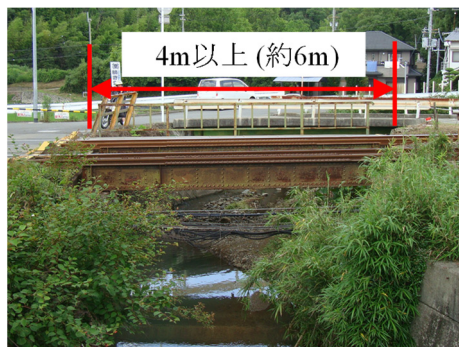
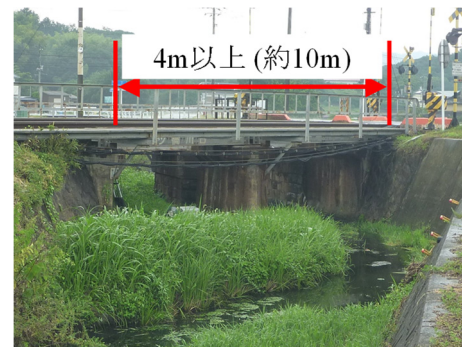


表-3.1 想定される災害形態（カルテ，斜面管理マップ）

想定される災害形態		
落石	岩石崩壊	斜面崩壊
地すべり	土石流	土砂流入
盛土崩壊	倒木	
その他（ ）		



(a) 橋りょうの例（その1）



(b) 橋りょうの例（その2）

図-3.4 延長約4m以上の橋りょうで線路と河川が交差する箇所の例



(a) 橋りょうの例（その1）



(b) 橋りょうの例（その2）

図-3.5 延長約4m未満の橋りょうで線路と溪流が交差する箇所の例



(a) 土砂等の堆積状況（その1）



(b) 土砂等の堆積状況（その2）

図-3.6 延長約4m未満の橋りょうにおける土砂等の堆積状況



なお、図-3.7 (a) に示すように、1/2500 地形図において、同一等高線上での開口幅よりも同一等高線上で最も奥に入った地点の奥行きが長い谷、いわゆる 1 次谷は溪流として定義する。また、2 次以上の谷についても溪流として定義する。図-3.7 (b) に示すように、1/2500 地形図において、同一等高線上での開口幅よりも同一等高線上で最も奥に入った地点の奥行きが短い谷、いわゆる 0 次谷も、基本的に溪流として定義する。ただし、現地において、想定される災害形態が、土砂流入ではなく、斜面崩壊であると判断できる場合には、溪流として定義しない。

図-3.8 に示すように、等斉斜面や尾根部における表層崩壊や侵食等による微小な凹地形は、溪流として定義しない。なお、表層崩壊による微小な凹地形とは、図-3.9 に示すように、斜面の長さおよび幅が数十 m 程度であるものや、現地において崩壊範囲全体を見とおせる規模のものをいう。

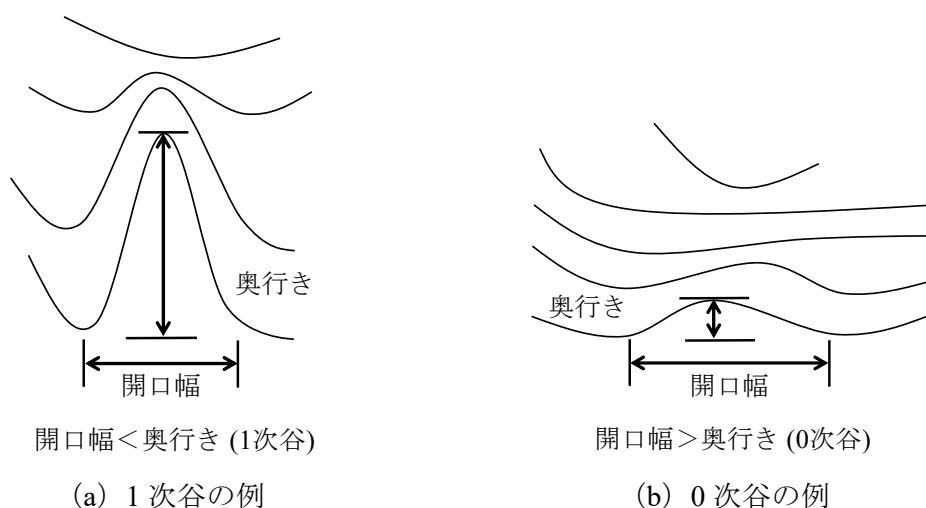


図-3.7 谷次数の概要

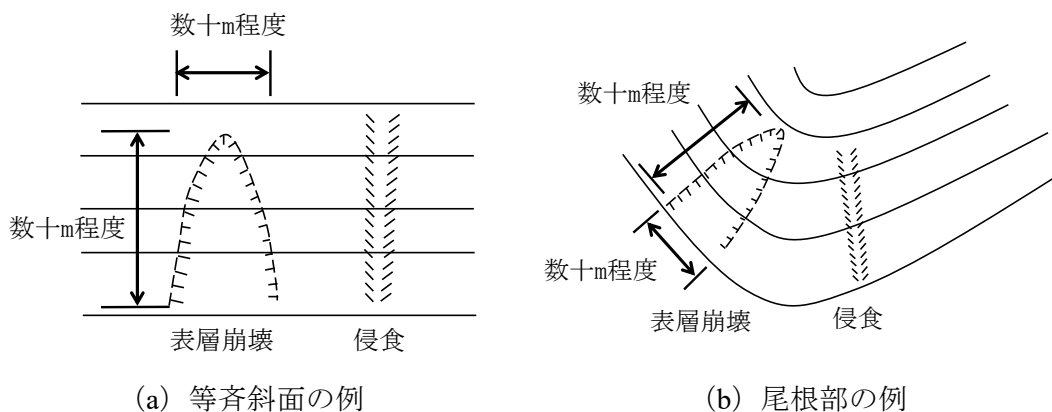
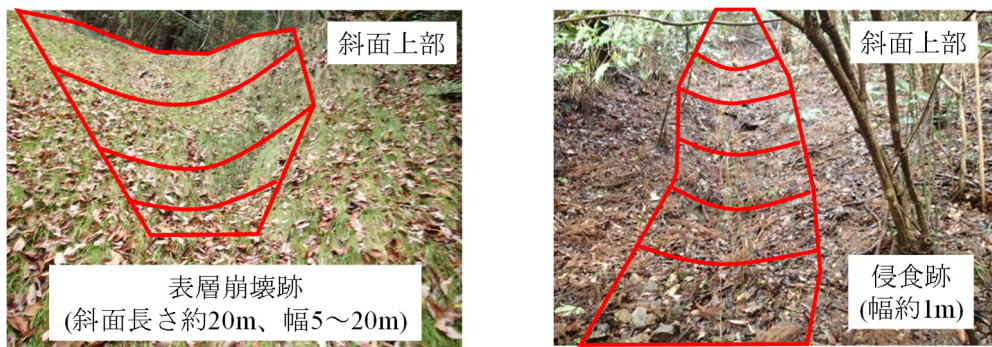


図-3.8 等斉斜面や尾根部における微小な凹地形の例(その1)(溪流として定義しない)



(a) 表層崩壊跡の例

(b) 侵食跡の例

図-3.9 等斉斜面や尾根部における微小な凹地形の例 (その 2) (溪流として定義しない)

### 3.2.2 溪流に関する条件の統計値

#### (1) 危険度評価および解析の概要

ここでは、過去に土砂流入をもたらした溪流（以下、災害溪流という）およびこれに隣接する土砂流入をもたらしていない溪流（以下、未災害溪流という）における地形、地質、環境および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等のデータを用いて、溪流からの土砂等流出の危険度を統計的に判別する手法について検討した。具体的には、土砂流入の発生の有無を目的変数、溪流における地形、地質、環境および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等の条件を説明変数として数量化Ⅱ類解析<sup>8)</sup>（以下、解析という）を行い、それらの結果を用いて、溪流からの土砂等流出の危険度を評価する手法の作成を試みた。

鉄道では、盛土、切土、斜面等の危険度評価手法を開発するために、統計解析を用いた各種研究が行われてきた。岡田ら<sup>9),10)</sup>、杉山ら<sup>11),12)</sup>は、降雨によって発生した盛土や切土の崩壊事例データを用いた判別解析や数量化Ⅰ類解析の結果を基に、盛土や切土の各条件から崩壊の可能性が高まる降雨量を求めた。また、鉄道沿線斜面の降雨時のリスクを評価する研究<sup>13)</sup>に関連して、盛土や切土の崩壊事例データを統計的に解析することで、崩壊規模等を予測する手法<sup>14)~18)</sup>も提案されている。岩本ら<sup>19)</sup>は、過去の切土の崩壊事例データを用いて統計解析を行い、切土の対策工の優先順位を決定する手法を提案した。また、野口<sup>20)</sup>は、現地調査から得た斜面の情報等のデータを統計解析した結果から、落石発生源の危険度を評価する手法を提案した。外狩ら<sup>21)</sup>は、現地調査から得た斜面のデータ等を統計解析した結果から、なだれの発生危険度を評価する手法を提案した。

統計解析を用いて、溪流の危険度評価手法を開発する研究も行われてきた。小橋ら<sup>22)</sup>は、鉄道の一部区間を対象として多変量解析を用いた危険度要因の抽出を行った。その他にも各種機関等によって、統計解析を用いた土石流の危険度評価手法が提案されてき

た<sup>23)~25)</sup>。しかしながら、これらは流域が広範囲にわたる溪流からの大規模な土石流の発生危険度手法の作成を主な目的としたものであり、本論文において対象としているような小さな流域を対象とした土砂流入の危険度を評価するものではない。

分析対象とした災害溪流は、JR 西日本管内において 1976 年度から 2016 年度までに土砂流入が発生した溪流とし、降雨量の分析を可能とするために災害時の降雨量データが記録されている箇所等とした。また、未災害溪流は、基本的に災害溪流と同じ線区にあるものとし、可能な限り災害溪流に隣接するものとした。なお、ここでの解析結果は、溪流からの土砂等流出の危険度を評価するために用いるため、過去に土砂流入が発生していない溪流であっても、流域内に土砂等の流出の形跡が明らかに認められる溪流や砂防えん堤等の防護設備のポケットに土砂等が多く堆積しているような溪流は、未災害溪流とはせず、分析対象としなかった。

過去に土砂流入が発生していること、また、災害時の降雨量データが残っていること等を確認して災害溪流を選定し、それに併せて、地形図やカルテの情報を基に隣接する未災害溪流を選定して、現地調査を実施した。その結果、解析の対象とした溪流数は、災害溪流が 52 箇所、未災害溪流が 49 箇所の合計 101 箇所である。なお、現地調査は溪流の状態を比較的確認しやすいと判断した 9 月頃から 2 月頃までの期間において実施した。

## (2) 溪流データの統計値

カルテ範囲における現地調査や 1/25000 地形図から得られた全流域の情報等から、解析に用いる説明変数の候補とした条件は、表-3.2 に示す 43 条件である。これらの条件は、地形、地質、環境、溪床や溪岸斜面の荒廃状態および列車運行への影響度に関する条件に大分類できる。これらの分類を同一種類と考えられる条件ごとにさらに中分類し、現地での確認のしやすさ等の実務での適用性を検討した上で、解析に用いる条件を選出した。また、各条件について、災害溪流および未災害溪流ごとに統計値を確認し、それらに明確な違いがみられる条件は、災害溪流と未災害溪流を判別するのに適した条件であると判断した。

すなわち、地形、地質条件のうち、溪床および溪岸斜面の勾配は、現地において最大勾配箇所を見つけることが現実的には困難であることから、平均的な勾配で代表させることにした。流域の規模は、多くの条件のなかで、資料調査により容易に確認することができる流域面積を、溪流の形状は、現地で比較的容易に確認できる横断形状を選定した。ここで、横断形状は、溪床の幅が約 5m 以上と比較的広いものを U 型とし、溪床の幅が約 5m 未満と比較的狭いものを V 型とした。地質については、現場技術者にとっても判断しやすいように、火成岩、堆積岩、変成岩の 3 つに区分した。なお、同じ区分の



なかで脆弱性が異なるものは、溪岸斜面の崩壊、溪床堆積物の厚さおよび溪床の侵食状態等によって確認することができると判断した。環境条件である水に関しては、目視で確認できる流水の有無を、植生については、土砂等の流下の抑止効果に関係すると思われる植生量を選定した。

荒廃条件のうち、堆積物に関しては、流下量に関係してくる溪床堆積物の厚さを、溪床の侵食については、侵食幅と侵食深さから算出できる侵食断面積を選定し、これらの条件についても、最大値をみつけることが困難であるため、平均的な値により代表させることにした。また、溪床を含む形で崩壊が発生し、溪床に段差が生じている箇所（以下、溪床の崩壊という）については、崩壊面積に大きな差がなかったことから崩壊の有無を採用した。一方で、溪岸斜面の崩壊については、101箇所のなかでも崩壊面積に明確な差があったことから崩壊面積を採用した。また、列車運行への影響度については、土砂等の線路への流入のしやすさに関係する条件として、線路と溪流の交差部における線路と溪床との高さ関係（以下、線路と溪床との高さ関係という）と、線路際かつ線路より上流側に位置する平坦地の線路直角方向長さ（以下、線路上流側平坦地の線路直角方向長さという）を選定した。

表-3.2 条件の一覧

条件の大分類	条件の中分類	No	解析へ適用する条件の候補	データ 収集方法	解析への 適用の可否
地形 地質	溪床の勾配	1	線路から斜面長さ約100m までの溪床の平均勾配 (度)	現地調査	適用
		2	線路から斜面長さ約100m までの溪床の最大勾配 (度)	現地調査	-
	溪岸斜面の 勾配	3	溪岸斜面の平均勾配 (度)	現地調査	適用
		4	溪岸斜面の最大勾配 (度)	現地調査	-
	流域の規模	5	流域面積 (km <sup>2</sup> )	1/25000地形図	適用
		6	線路から溪流最上端までの 高低差 (m)	1/25000地形図	-
		7	線路から溪流最遠端までの 直線水平距離 (m)	1/25000地形図	-
		8	流域長 (m) (線路から溪流最上端までの 延長)	1/25000地形図	-
		9	主溪流長 (m) (同一等高線上での谷幅より 同一等高線上で最も奥に 入った地点の奥行が長い 箇所)の延長)	1/25000地形図	-
		10	流域最大幅 (m)	1/25000地形図	-
		11	流域形状比 (流域最大幅 / 流域長)	1/25000地形図	-
		12	谷深比 (主溪流長 / 流域長)	1/25000地形図	-
		13	線状模様 (本数)	1/25000地形図	-
		14	谷次数	1/25000地形図	-
	溪流の形状	15	溪流の横断形状 (U型, V型)	現地調査	適用
		16	線形 (直線形, 曲線形)	1/25000地形図	-
		17	勾配変化点 (遷急線, 遷緩線)	1/25000地形図	-
	地質	18	地質 (火成岩, 堆積岩, 変成岩)	地質図 現地調査	適用
環境	水	19	流水の有無	現地調査	適用
		20	湧水の有無	現地調査	-
		21	伏流水の有無	現地調査	-
	植生	22	溪床の植生量	現地調査	適用
		23	溪床の植生の種類 (草本, 針葉樹, 広葉樹等)	現地調査	-
		24	溪岸斜面の植生の種類 (草本, 針葉樹, 広葉樹等)	現地調査	-
荒廃	その他	25	人工改変地, 道路開発等	現地調査	-
	堆積物	26	溪床堆積物の平均厚さ (m)	現地調査	適用
		27	溪床堆積物の堆積量 (m <sup>3</sup> ) (溪岸斜面勾配等を利用した 簡易計算)	現地調査	-
		28	溪床における角礫の分布 の程度	現地調査	-
		29	溪床における倒木の数	現地調査	-
		30	流水に挟まれた不安定な 溪床堆積物の有無	現地調査	-
		31	崩土閉塞, ダムアップの有無	現地調査	-
	溪床の侵食	32	溪床の侵食の有無	現地調査	-
		33	溪床の平均侵食幅 (m)	現地調査	-
		34	溪床の最大侵食幅 (m)	現地調査	-
		35	溪床の平均侵食深さ (m)	現地調査	-
		36	溪床の最大侵食深さ (m)	現地調査	-
		37	溪床の平均侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	現地調査	適用
	溪床の崩壊	38	崩壊により溪床に段差が 生じている箇所 (溪床の崩壊) の有無	現地調査	適用
		39	崩壊により溪床に段差が 生じている箇所 (溪床の崩壊) の面積 (m <sup>2</sup> )	現地調査	-
	溪岸斜面の 崩壊	40	溪岸斜面の崩壊の有無	現地調査	-
		41	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	現地調査	適用
列車運行 への 影響度	—	42	線路と溪流の交差部における 線路と溪床との高さ関係	現地調査	適用
		43	線路上流側平坦地の線路直角 方向長さ (m)	現地調査	適用

なお、後述する解析に基づき作成する採点表は、溪流からの土砂等の流出のしやすさを評価するものであり、土砂等の流出に伴う列車運行への影響度は、別途評価するものである。しかしながら、実際には、列車運行への影響度に関する条件も、土砂流入の発生に寄与するものであるため、ここでは、一旦、列車運行への影響度に関する条件も含めて解析を行い、各条件の寄与度を確認した。なお、寄与度とは、各条件における点数の範囲（最大値と最小値の差分）のことである。

以上の結果から、解析に適用する候補とした 43 条件のうち、表-3.2 の網掛けで示した 13 条件を用いて、以降の分析を行った。

図-3.10～図-3.14 に、地形、地質条件である溪床の平均勾配、溪岸斜面の平均勾配、流域面積、溪流の横断形状、地質の各カテゴリーの割合を示す。なお、本章の図中における  $\mu$  は平均値、 $\sigma$  は標準偏差を示す。

溪床の平均勾配の平均値は、災害溪流が約 25 度、未災害溪流が約 17 度であり、災害溪流の勾配がやや大きい。また、溪岸斜面の平均勾配の平均値は、災害溪流が約 41 度、未災害溪流が約 35 度であり、災害溪流の勾配がやや大きい。流域面積については、災害溪流において  $0.05\text{km}^2$  以上の流域をもつ箇所割合が高い。溪流の横断形状については、未災害溪流において U 型の割合が約 80% と高い。地質については、表-3.3 に示す主な岩石の分類を参考にして、変成岩、堆積岩、火成岩の 3 つに区分した結果、災害溪流において火成岩の割合が約 85% と高い。

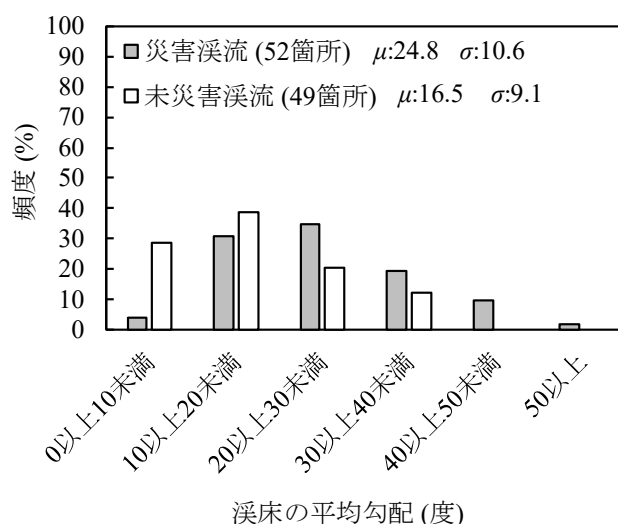


図-3.10 溪床の平均勾配の頻度分布

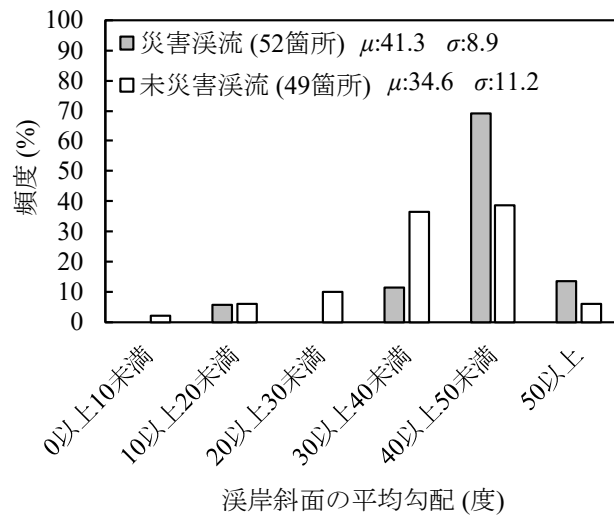


図-3.11 溪岸斜面の平均勾配の頻度分布

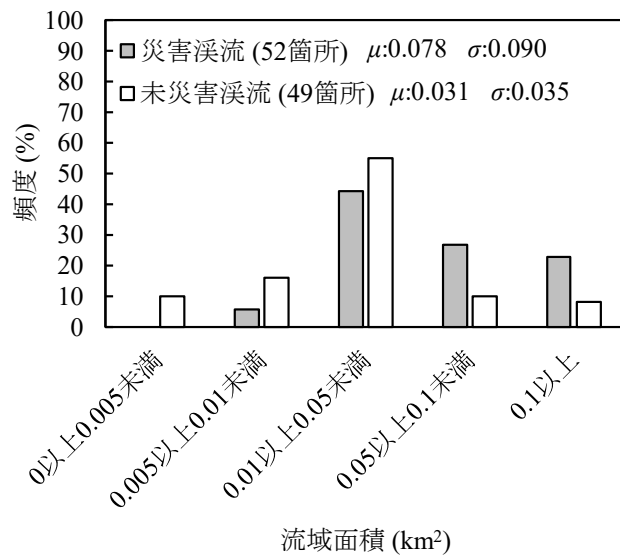


図-3.12 流域面積の頻度分布

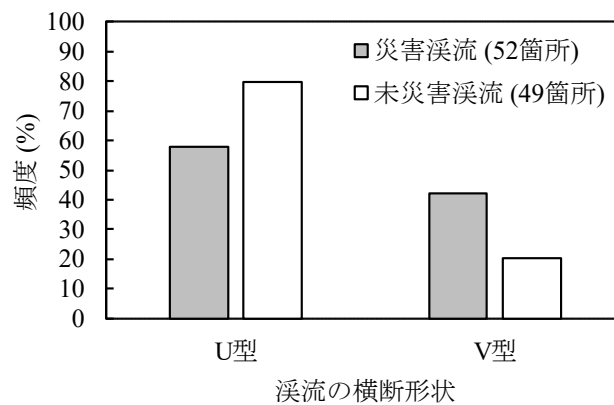


図-3.13 溪流の横断形状の頻度分布

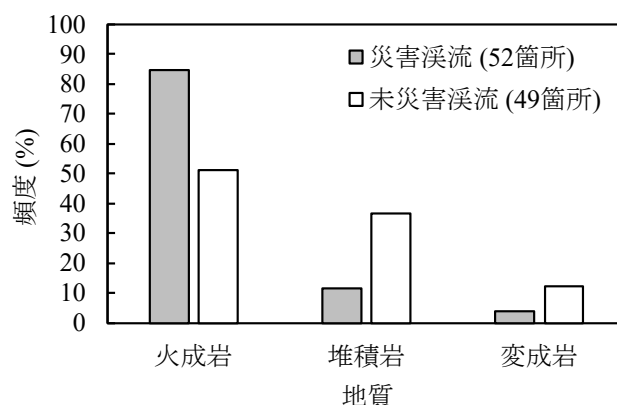


図-3.14 地質の頻度分布

表-3.3 主な岩石の分類表（文献 26）を一部修正・加筆）

岩石の分類		主な岩石名
火成岩	火山岩 半深成岩 深成岩	流紋岩, 粗面岩, 石英安山岩, 安山岩, 玄武岩 花崗斑岩, 石英斑岩, ひん岩, 輝緑岩 花崗岩, 閃緑岩, はんれい岩, かんらん岩 蛇紋岩
堆積岩	砕屑岩 火山砕屑岩 生物起源堆積岩 化学起源堆積岩	砂岩, 泥岩, 礫岩, 頁岩, 粘板岩, 硬砂岩 火山角礫岩, 凝灰角礫岩, 凝灰岩, 輝緑凝灰岩 石灰岩, チャート, 石炭 石灰岩, チャート
変成岩	熱変成岩 動力変成岩	ホルンフェルス, 大理石 千枚岩, 片岩, 片麻岩

図-3.15, 図-3.16 に, 環境条件である流水の有無, 溪床の植生量の各カテゴリーの割合を示す。流水の有無は, 季節や天候によって影響を受ける可能性があるため, 直近の現地調査の結果だけでなく, カルテに記載されている過去の状態等も確認した上で, 総合的に判断した。その結果, 流水が確認された箇所の割合は, 災害溪流では約 85%, 未災害溪流では約 57%であり, 災害溪流における割合が高い。溪床の植生量の判断基準は, 草本が溪床のほぼ全面を覆っているもの, もしくは樹木が密に繁茂しているものを植生量が多いとし, 草本が溪床を約 50%覆っているもの, もしくは樹木がまばらに繁茂しているものを植生量が普通とした。一方で, 草本が溪床を覆う範囲が約 50%未満であるもの, もしくは樹木がごく少数しか繁茂していないものは, 植生量が少ない, 草本や樹木

が繁茂していないものは、植生がないとした。過去の調査記録等も含めてデータを収集し、分析した結果、植生量が少ないまたは植生がない箇所の割合は、災害溪流では約 92%、未災害溪流では約 43%であり、災害溪流において植生量がかなり少ない。

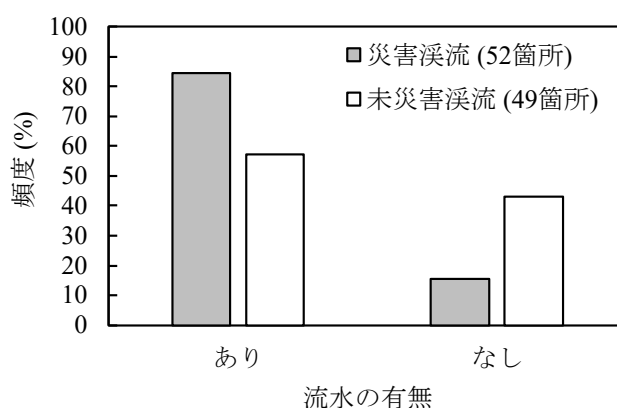


図-3.15 流水の有無の頻度分布

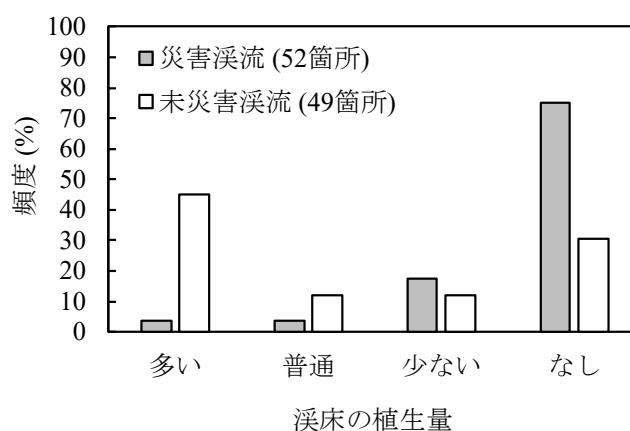


図-3.16 渓床の植生量の頻度分布

図-3.17～図-3.20 に、荒廃条件である渓床堆積物の平均厚さ、渓床の平均侵食断面積、渓床の崩壊の有無および溪岸斜面の崩壊面積の各カテゴリーの割合を示す。

渓床堆積物の厚さは、調査者が現地で簡易に計測することを意識して、図-3.21 に示すように、鋼製の測定ピン等により人力で容易に貫入できる緩い層の厚さとした。この調査方法により収集したデータを分析した結果、渓床堆積物の平均厚さは、災害溪流では約 0.94m、未災害溪流では約 0.48m であり、災害溪流においては、渓床堆積物が比較的厚く分布している。渓床の平均侵食断面積は、図-3.21 に示すように、平均的な侵食

幅と侵食深さにより簡易に算出した。その結果、平均侵食断面積は、災害溪流では約  $2.55\text{m}^2$ 、未災害溪流では約  $0.69\text{m}^2$  であり、災害溪流において溪床の侵食が進んでいる。溪床の崩壊が確認された箇所割合は、災害溪流では約 38%、未災害溪流では約 12% であり、災害溪流において崩壊した箇所が多い。溪岸斜面の崩壊面積は、図-3.22 に示すように、各崩壊箇所の崩壊面積の累計値とした。溪岸斜面の崩壊面積が、 $100\text{m}^2$  以上であった箇所の割合は、災害溪流では約 79%、未災害溪流では約 27% であり、災害溪流において崩壊面積が大きい。

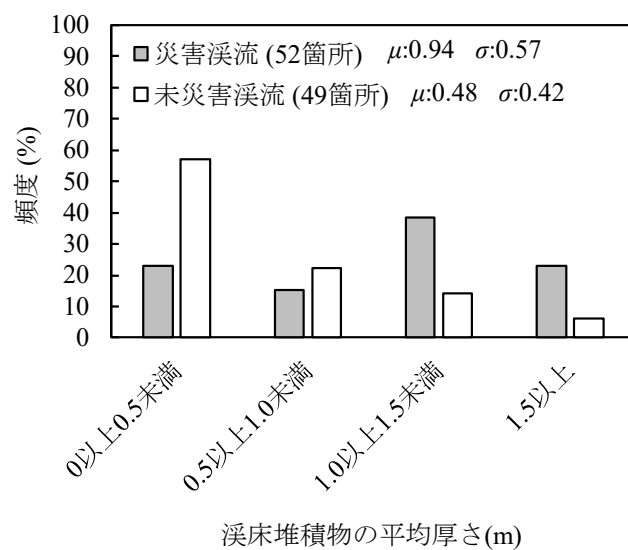


図-3.17 溪床堆積物の平均厚さの頻度分布

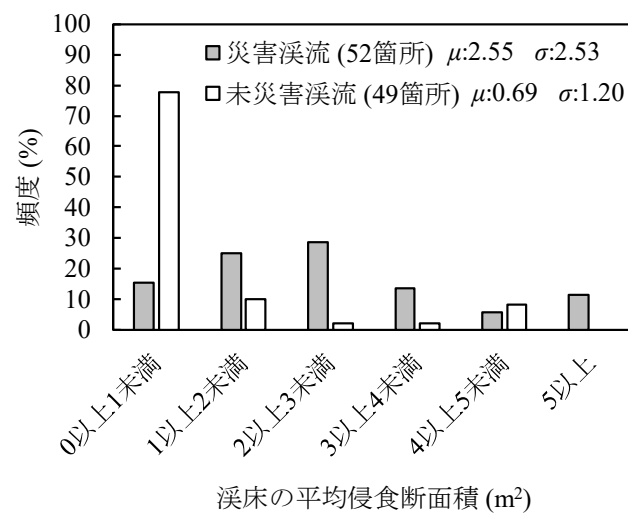


図-3.18 溪床の平均侵食断面積の頻度分布

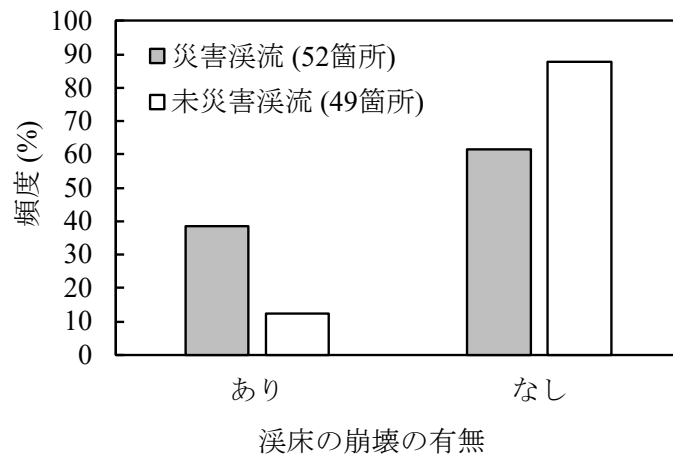


図-3.19 渓床の崩壊の有無の頻度分布

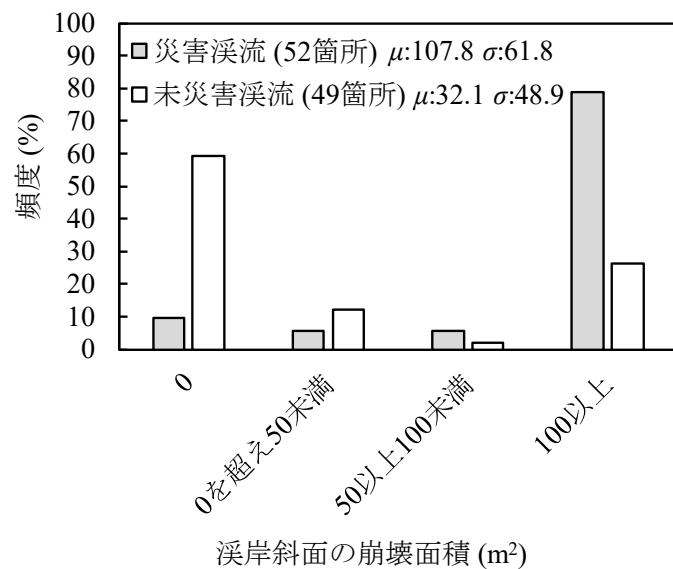


図-3.20 渓岸斜面の崩壊面積の頻度分布

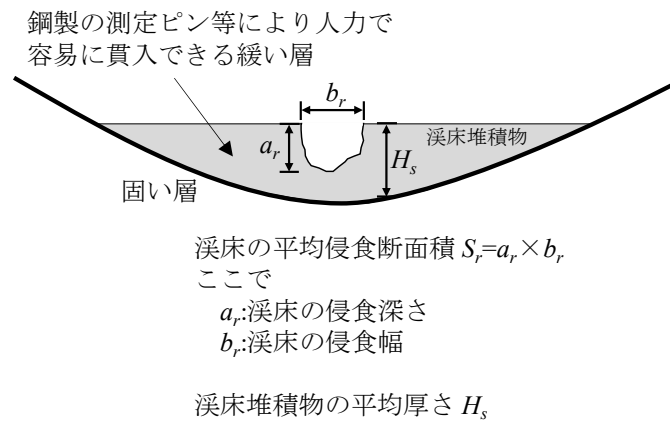
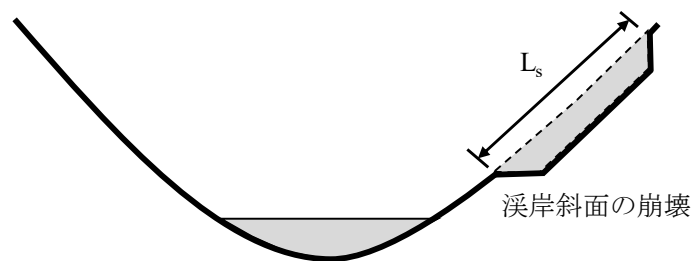


図-3.21 渓床堆積物の厚さおよび渓床の侵食断面積の概要





渓岸斜面の崩壊面積  $S_s \doteq \sum (L_s \times B)$

$L_s$ : 崩壊箇所の斜面長さ

$B$ : 崩壊箇所の奥行き

図-3.22 渓岸斜面の崩壊面積の概要

図-3.23 に，列車運行への影響度に関する条件として，後述する線路と溪床との高さ関係の各カテゴリーの割合を示す．災害溪流および未災害溪流ともに，線路と溪床の高さが概ね同じものの割合が高い．図-3.24 に，線路上流側平坦地の線路直角方向長さの各カテゴリーの割合を示す．その平均値は，災害溪流では約 0.67m，未災害溪流では約 5.82m であり，未災害溪流において延長が長い．

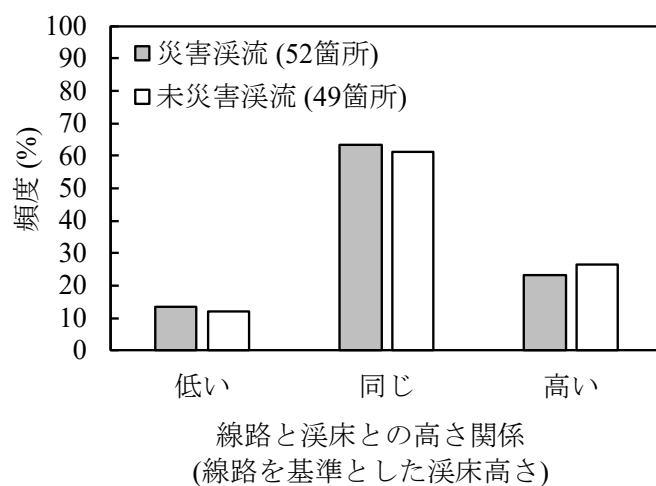


図-3.23 線路と溪床との高さ関係（線路を基準とした溪床高さ）

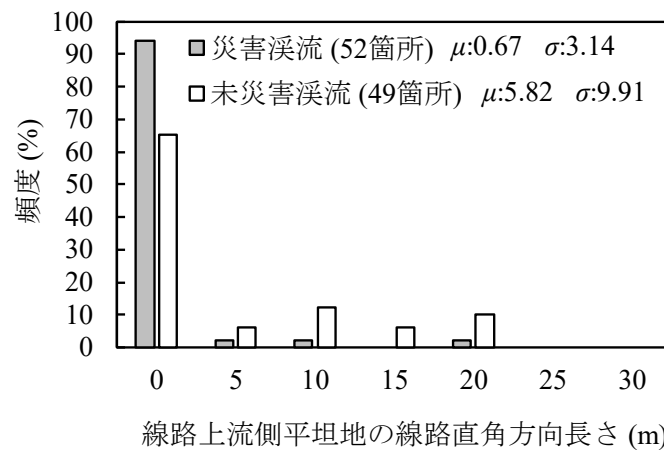


図-3.24 線路上流側平坦地の線路直角方向長さの頻度分布

条件別に災害溪流と未災害溪流の特徴を比較した結果を表-3.4に示す。地形、地質条件については、災害溪流において溪床と溪岸斜面の勾配および流域面積が大きく、火成岩が多く分布している。環境条件については、災害溪流において流水が多く、植生量は少ない。荒廃条件については、災害溪流において溪床堆積物が厚く分布し、溪床と溪岸斜面の荒廃が進んでいる。列車運行への影響度に関する条件のうち、線路と溪床との高さ関係については、災害溪流と未災害溪流ともに、高さが概ね同じものが多い。線路上流側平坦地の線路直角方向長さは、未災害溪流において延長が長い。

これらの結果は、溪床、溪岸斜面が急勾配である場合、流域面積が大きい場合、溪床の植生量が少ない場合、溪床、溪岸斜面の荒廃が進んでいる場合および線路の上流側に土砂等を堆積させる平坦地が少ない場合等には、土砂流入が発生しやすい傾向にあることを示唆している。

表-3.4 災害溪流と未災害溪流の特徴の比較

条件		災害溪流	未災害溪流
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	大きい	小さい
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	大きい	小さい
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	大きい	小さい
	溪流の横断形状 (U型, V型)	U型がやや多い	U型が多い
	地質 (火成岩, 堆積岩, 変成岩)	火成岩が多い	火成岩, 堆積岩 がやや多い
環境	流水の有無	流水が多い	流水がやや多い
	溪床の植生量	少ない, なし	多い, 普通
荒廃	溪床堆積物の平均厚さ (m)	大きい	小さい
	溪床の平均侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	大きい	小さい
	溪床の崩壊の有無	多い	少ない
	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	大きい	小さい
列車運行 への 影響度	線路と溪床との高さ関係 (線路を基準とした溪床高さ)	概ね同じ	概ね同じ
	線路上流側平坦地の線路直角方向 長さ (m)	短い	長い

### 3.3 危険度評価のための採点表の提案

#### 3.3.1 溪流調査結果に基づく一次解析

3.2.2の溪流に関する条件の統計値に基づいて、表-3.5に示すように条件別にカテゴリー分類を行った。数量データである溪床の平均勾配, 溪岸斜面の平均勾配, 流域面積, 溪床堆積物の平均厚さ, 溪床の平均侵食断面積, 溪岸斜面の崩壊面積および線路上流側平坦地の線路直角方向長さについては, 平均値や各階級に属するサンプル数等を考慮してカテゴリー分類を行った。解析は, 表-3.5のカテゴリー分類によって第一回の解析を行い, その結果を確認して条件を見直した上で, 第二回以降の解析を行った。

表-3.5 条件のカテゴリー分類

条件		カテゴリー分類		
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	$\theta_r < 10^\circ$	$10^\circ \leq \theta_r < 25^\circ$	$25^\circ \leq \theta_r$
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	$\theta_s < 40^\circ$	$40^\circ \leq \theta_s$	-
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	$S_b < 0.05$	$0.05 \leq S_b$	-
	溪流の横断形状	U型	V型	-
	地質	火成岩	堆積岩	変成岩
環境	流水の有無	なし	あり	-
	溪床の植生量	少ない,なし	多い,普通	-
荒廃	溪床堆積物の平均厚さ (m)	$H_s < 1.0$	$1.0 \leq H_s$	-
	溪床の平均侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	$S_r < 0.25$	$0.25 \leq S_r$	-
	溪床の崩壊の有無	なし	あり	-
	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	$S_s < 100$	$100 \leq S_s$	-
列車運行 への 影響度	線路と溪床との高さ関係 (線路を基準とした溪床高さ)	低い	同じ	高い
	線路上流側平坦地の線路直角方向長さ (m)	$L < 10$	$10 \leq L$	-

第一回の解析結果を表-3.6 に示す。表-3.6 には、各条件とカテゴリー分類、カテゴリーに対応するデータ数と点数、条件別の点数の範囲とその順位を示している。なお、カテゴリーに対応する点数が大きいほど、土砂流入が発生しやすい傾向にあることを示している。第一回の解析の結果、溪流の横断形状において、溪岸斜面の勾配が小さいU型がV型よりも土砂流入が発生しやすいという結果になった。この結果は、災害溪流は未災害溪流と比較して、溪岸斜面の勾配がやや大きいという図-3.11 の結果と矛盾しているため、第二回の解析から除外した。また、流水の有無は、点数の範囲の大きさが他の条件と比較して1/15～1/4 となり明らかに小さく、明確な傾向を得られなかったため、第二回の解析から除外した。また、線路と溪床との高さ関係は、明確な傾向がみられなかったため、第二回の解析から除外した。このように、明確な傾向を得られなかった条件や、点数の範囲が小さい条件等を除外しながら第四回までの解析を行った。

表-3.6 一次解析（第一回）の結果

条件		カテゴリー分類	データ数	点数	点数の範囲 (最大値と最小値の差分)	順位
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	$\theta_r < 10^\circ$	16	-0.32	0.65	3
		$10^\circ \leq \theta_r < 25^\circ$	53	-0.10		
		$25^\circ \leq \theta_r$	32	0.33		
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	$\theta_s < 40^\circ$	36	-0.19	0.29	9
		$40^\circ \leq \theta_s$	65	0.10		
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	$S_b < 0.05$	63	-0.15	0.40	5
		$0.05 \leq S_b$	38	0.25		
	溪流の横断形状	U型	69	0.13	0.40	5
		V型	32	-0.27		
環境	流水の有無	なし	29	0.04	0.06	13
		あり	72	-0.02		
	溪床の植生量	少ない, なし	69	0.12	0.37	8
		多い, 普通	32	-0.25		
荒廃	溪床堆積物の平均厚さ (m)	$H_s < 1.0$	59	-0.09	0.22	12
		$1.0 \leq H_s$	42	0.13		
	溪床の平均侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	$S_r < 0.25$	26	-0.61	0.82	1
		$0.25 \leq S_r$	75	0.21		
	溪床の崩壊の有無	なし	75	-0.10	0.38	7
		あり	26	0.28		
	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	$S_s < 100$	47	-0.15	0.28	11
		$100 \leq S_s$	54	0.13		
列車運行 への 影響度	線路上流側平坦地の線路 直角方向長さ (m)	$L < 10$	85	0.09	0.58	4
		$10 \leq L$	16	-0.49		
	線路と溪床との高さ関係 (線路を基準とした溪床 高さ)	低い	13	0.06	0.29	9
		同じ	63	0.07		
		高い	25	-0.22		

表-3.7 に、第四回の解析結果を示す。第四回の解析における地形、地質条件は、溪床の平均勾配、溪岸斜面の平均勾配、流域面積、地質であり、環境条件は、溪床の植生量、荒廃条件は、溪床堆積物の平均厚さ、溪床の平均侵食断面積、溪岸斜面の崩壊面積である。表-3.7 より、土砂流入の発生のしやすさと各条件との関連性について考察する。

溪床の平均勾配、溪岸斜面の平均勾配、流域面積は、値が大きいほど土砂流入が発生しやすいと判別される傾向となった。これは、溪床や溪岸斜面の勾配が大きいほど土砂等が流下しやすく、流域面積が大きいほど土砂等を流下させる流水量が多くなるためであると推察される。地質は、火成岩、堆積岩、変成岩の順番で、土砂流入が発生しやすい

いと判別される傾向となった。これは、災害溪流における火成岩に、風化花崗岩が多く含まれていたためと推察される。溪床の植生量が少ないまたは植生がない場合には、土砂流入が発生しやすいと判別される傾向となった。これは、植生の繁茂による土砂等流出の抑止効果が少ないためであると推察される。また、植生が成長する間もなく土砂等が頻繁に移動している可能性もある。溪床堆積物の平均厚さは、値が大きいほど土砂流入が発生しやすいと判別される傾向となった。これは、土砂等の堆積量が多いほど、流水に伴う土砂等の流下量が増加するためと推察される。溪床の平均侵食断面積、溪岸斜面の崩壊面積は、値が大きいほど土砂流入が発生しやすいと判別される傾向となった。これは、溪床が侵食されやすく、溪岸斜面に崩壊が発生しやすい溪流ほど、土砂等の繰り返し供給と流下が発生しやすいためと推察される。

なお、点数の範囲が比較的大きい条件は、溪床の平均侵食断面積、地質および溪床の平均勾配であった。また、第一回の解析結果である表-3.6 に示すように、列車運行への影響度に関する条件である線路上流側平坦地の線路直角方向長さについては、10m 未満であれば土砂流入が発生しやすい傾向にあることを確認できた。

表-3.7 一次解析（第四回）の結果

条件		カテゴリー分類	データ数	点数	点数の範囲 (最大値と最小値の差分)	順位
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	$\theta_r < 10^\circ$	16	-0.36	0.63	3
		$10^\circ \leq \theta_r < 25^\circ$	53	-0.05		
		$25^\circ \leq \theta_r$	32	0.27		
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	$\theta_s < 40^\circ$	36	-0.23	0.36	5
		$40^\circ \leq \theta_s$	65	0.13		
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	$S_b < 0.05$	63	-0.13	0.35	7
		$0.05 \leq S_b$	38	0.22		
	地質	火成岩	69	0.16	0.69	2
		堆積岩	24	-0.29		
		変成岩	8	-0.53		
環境	溪床の植生量	少ない, なし	69	0.15	0.48	4
		多い, 普通	32	-0.33		
荒廃	溪床堆積物の平均厚さ (m)	$H_s < 1.0$	59	-0.15	0.36	5
		$1.0 \leq H_s$	42	0.21		
	溪床の平均侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	$S_r < 0.25$	26	-0.52	0.70	1
		$0.25 \leq S_r$	75	0.18		
	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	$S_s < 100$	47	-0.19	0.35	7
		$100 \leq S_s$	54	0.16		

図-3.25 に、第四回の解析結果から得た判別グラフを示す。図-3.25 に示すように、土砂流入の発生と非発生とを判別する点数（以下、判別の中心点という）は 0.22 である。したがって、表-3.7 の第四回の解析結果を用いて算出した各条件の点数の合計値（以下、判別点数という）が 0.22 より大きい場合には、土砂流入が発生すると判別され、0.22 より小さい場合には、土砂流入が発生しないと判別される。また、判別点数が大きいほど、土砂流入の危険度は高くなる。

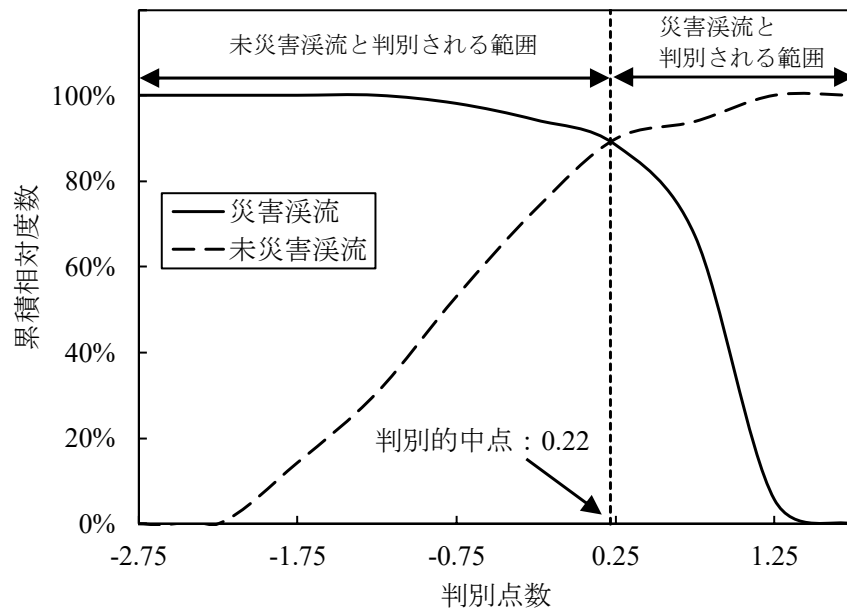


図-3.25 判別グラフ（一次解析（第四回）の結果）

ここでは、解析の精度を確認するために、実績としての災害の有無と、解析により判別した災害の有無とが的中した割合（以下、的中率という）および的中しなかった割合（以下、非的中率という）を式(3.1)～(3.4)で求めた。

$$M_I = a / S_I \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$M_{II} = b / S_I \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$M_{III} = c / S_{II} \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$M_{IV} = d / S_{II} \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$M_{V1} = (a+c) / (S_I+S_{II}) \cdot 100 \quad (3.5)$$

$$M_{V2} = (a+c+d) / (S_I+S_{II}) \cdot 100 \quad (3.6)$$

ここで,

- $S_I$  : 災害溪流の全件数
- $S_{II}$  : 未災害溪流の全件数
- $a$  : 災害溪流のうち, 解析により災害溪流と判別された件数
- $b$  : 災害溪流のうち, 解析により未災害溪流と判別された件数
- $c$  : 未災害溪流のうち, 解析により未災害溪流と判別された件数
- $d$  : 未災害溪流のうち, 解析により災害溪流と判別された件数
- $M_I$  : 災害的中率 (%)
- $M_{II}$  : 災害非的中率 (%)
- $M_{III}$  : 未災害的中率 (%)
- $M_{IV}$  : 未災害非的中率 (%)
- $M_{V1}$  : 判別的中率 (%)
- $M_{V2}$  : 安全側判別的中率 (%)

表-3.8 に, 表-3.7 の第四回の解析結果を用いて土砂流入の発生, 非発生を判別した場合の精度を示す. 災害溪流のうち, 解析により災害溪流と判別されたもの (以下, 災害的中という) の割合である災害的中率は約 88%, 災害溪流のうち, 解析により未災害溪流と判別されたもの (以下, 災害非的中という) の割合である災害非的中率は約 12% である. また, 未災害溪流のうち, 解析により未災害溪流と判別されたもの (以下, 未災害的中という) の割合である未災害的中率は約 90%, 未災害溪流のうち, 解析により災害溪流と判別されたもの (以下, 未災害非的中という) の割合である未災害非的中率は約 10% である.

式(3.5)で求めた全データを対象とした判別の中率は, 約 89% である. また, 判別の中率のほかに分析の精度を表す指標である相関比は, 0.58 である. これらの結果から, 解析の精度は比較的高いといえる. なお, 式(3.6)で求めた危険側に判別されている災害非の中を除いた場合的中率 (以下, 安全側判別の中率という) は, 約 94% である.

表-3.8 解析精度 (一次解析 (第四回) の結果)

	災害溪流 (判別)	未災害溪流 (判別)
災害溪流 (実績)	88%	12%
未災害溪流 (実績)	10%	90%



### 3.3.2 溪流調査結果に基づく一次解析の精度分析

一次解析の結果、災害非的中率および未災害非的中率は、約 10%である。このうち、特に災害非的中の溪流については、危険側に判別されていることから、その原因を確認する必要がある。なお、溪流からの土砂等流出の危険度は、地形、地質、環境等により評価することを考えているため、解析では誘因である降雨量を考慮していない。この降雨量が、非的中の原因の一つである可能性があるため、ここでは、解析で評価した各溪流の危険度と降雨量との関係を確認することにした。具体的には、表-3.7 の第四回の解析結果を用いて、分析に使用した各溪流の判別点数を算出し、それらの溪流における災害時の降雨量（以下、災害雨量という）や過去に経験した降雨量（以下、経験雨量という）との関係を確認した。

降雨量の指標は、JR 西日本の降雨時運転規制に用いている 1 時間雨量および 24 時間連続雨量とした。また、降雨量は、分析対象の溪流におけるピンポイントのデータがないため、気象庁、国土交通省および JR 西日本が設置している雨量計のうち、分析対象の溪流に最も近い雨量計で計測されたものを用いた。近年、観測が可能となったレーダ雨量の利用も検討したが、レーダ雨量の観測開始時期よりも古い災害が多く、十分なデータが得られなかった。

なお、繰り返して土砂流入が発生した災害溪流については、同一箇所でも時期の異なる複数の災害雨量が記録されているため、災害溪流 52 箇所における降雨量データは 93 データとなった。一方、未災害溪流 49 箇所における降雨量データは 49 データである。

災害溪流については、災害雨量の最大値を、未災害溪流については、経験雨量の最大値を用いて、各溪流の危険度と降雨量との関係を確認した。なお、災害が実際に発生した時の降雨量は確認できないため、ここでは、災害雨量の最大値を用いることとした。

各溪流に対して算出した判別点数と、最大 1 時間雨量および最大 24 時間連続雨量との関係をそれぞれ図-3.26、図-3.27 に示す。これらの図より、災害非的中の溪流の降雨量データには、最大 1 時間雨量が 30mm/h 以下の降雨量や、最大 24 時間連続雨量が 70mm 以下の降雨量があることがわかる。すなわち、災害非的中の溪流には、危険側に判別されている上に、実際には、小さい降雨量で土砂流入が発生したものがある。図-3.28 は、災害雨量を最大 1 時間雨量と最大 24 時間連続雨量の 2 つの雨量指標で示したものである。図-3.28 より、災害非的中の溪流の災害雨量には、比較的小さいものがあることがわかる。

以上のとおり、各溪流の判別点数と、災害雨量や経験雨量との関係を確認したところ、表-3.7 の第四回の解析結果を用いた評価は、危険側になる可能性があることがわかった。

なお、土砂流入は、多くの要因が少しの割合で関与して発生する場合だけでなく、単

一あるいはごく少数の劣悪な要因により発生する場合もあると考えられる。例えば、線路付近の溪床に不安定な堆積物が多量に分布している等の状態があれば、地形、地質、環境等の他の要因に支配されず、危険度は高いと判断できる。このような劣悪な要因を有する溪流に対して、解析結果を用いた評価を行った場合、劣悪な要因が過小評価され、結果として危険側に評価されてしまう可能性がある。つまり、単一で明らかに危険度が高いと判断できる劣悪な要因の影響が反映されず、危険側の評価となる。

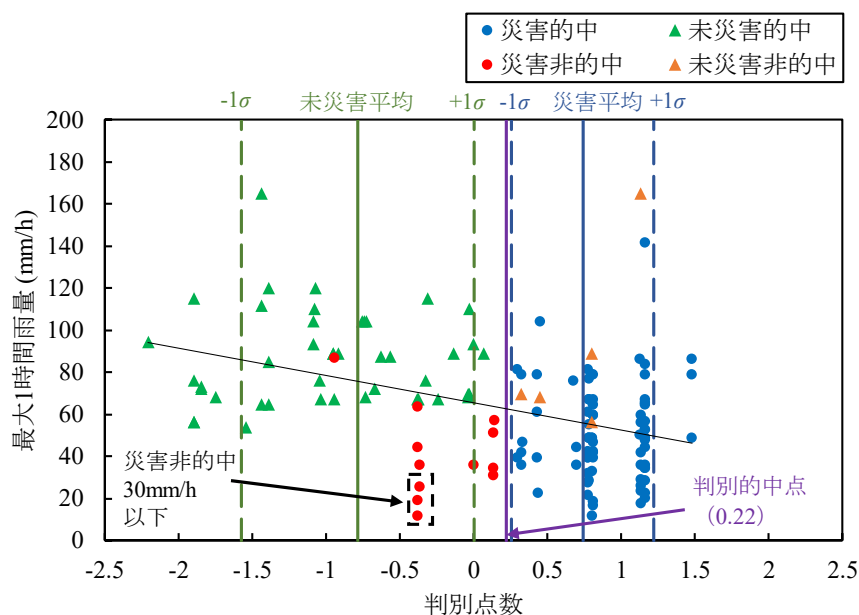


図-3.26 各溪流の判別点数と最大1時間雨量との関係

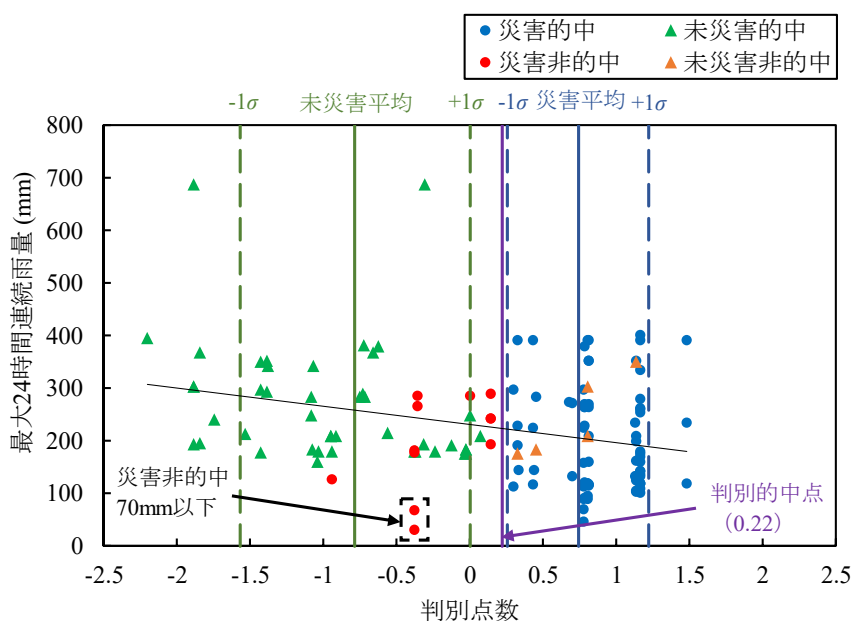


図-3.27 各溪流の判別点数と最大24時間連続雨量との関係

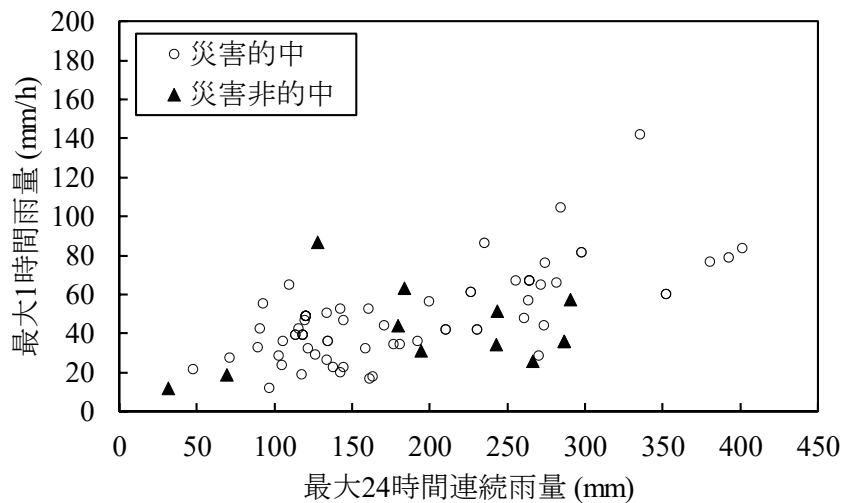


図-3.28 災害雨量（最大 1 時間雨量と最大 24 時間連続雨量）

### 3.3.3 危険度の高い要因を有する溪流を考慮した二次解析

#### (1) 危険度の高い要因の抽出

3.3.2 で述べたとおり，土砂流入に直接影響し，これにより溪流の危険度が明らかに高いと判断できる劣悪な要因が，溪流からの土砂等の流出のしやすさに大きな影響を与えている可能性がある．そこで，ここでは，この劣悪な要因を HRF（High Risk Factor）と定義し，HRF を考慮して，再度，評価手法を検討した．

表-3.9 および図-3.29～図-3.36 に，カルテ範囲における HRF の例を示す．これらの HRF は，不安定な溪床堆積物の分布，著しい荒廃，崩壊土砂等による閉塞および線路付近への土砂等流下である．図-3.29 に示すように溪床堆積物が不安定な状態で多量に分布している場合には，降雨時の流水によって，それらが流下してくる可能性が高い．図-3.30 に示すように，流水内に不安定な溪床堆積物が存在する場合には，降雨による増水等によってそれらが流下してくる可能性がある．また，図-3.31 に示すように溪床が大きく侵食されている場合，図-3.32 に示すように溪岸斜面に多数の崩壊が発生している場合，または図-3.33 に示すように荒廃が著しく進んでいる溪流では，土砂等が繰り返して供給されやすく，それに伴って流下してくる土砂等も多くなる．図-3.34 に示すように溪岸斜面の崩壊土砂等により溪流が閉塞されている場合には，上流からの流水が堰き止められて天然ダムが形成され，それが決壊した時には多量の土砂等が一気に線路に流入する．図-3.35 に示すように小規模な閉塞であっても，その状態が線路近傍にある場合には，決壊したときに土砂等が線路に流入してくる可能性は高い．図-3.36 に示すように，流水によって土砂等が線路付近まで流下してきている溪流では，少量の降雨による増水によっても，土砂等が線路に流入してくる可能性が高い．これらの HRF の

有無は、必ずしも斜面調査を専門とはしないものの、鉄道沿線の土工等設備を検査する能力をもつ現場技術者であれば、図-3.29～図-3.36 に示す概要図や写真を参考にするこ  
とで判断できる。

以降では、一次解析で分析対象とした溪流から、これらの HRF を有する溪流を除い  
た溪流を対象として二次解析を行い、溪流からの土砂等流出の危険度の評価手法を再度  
検討した。

表-3.9 HRF（著しく不安定な状態）の例

対象範囲	HRF (著しく不安定な状態) の例	
	状態	詳細内容
カルテ範囲	不安定な溪床堆積物の分布	<ul style="list-style-type: none"> <li>不安定な溪床堆積物が多量に分布している (図-3. 29)</li> <li>溪床堆積物が流水内に不安定な状態で存在している (図-3. 30)</li> </ul>
	著しい荒廃	<ul style="list-style-type: none"> <li>溪床が大きく侵食されている (図-3. 31)</li> <li>溪岸斜面に多数の崩壊が発生している (図-3. 32)</li> <li>過去の災害の形跡が確認できるなど、全体的に著しく荒廃している (図-3. 33)</li> </ul>
	崩壊土砂等による閉塞	<ul style="list-style-type: none"> <li>崩壊土砂等による大規模な閉塞が生じている (図-3. 34)</li> <li>線路近傍において、崩壊土砂等による小規模な閉塞が生じている (図-3. 35)</li> </ul>
	線路付近への土砂等流下	<ul style="list-style-type: none"> <li>流水により土砂等が線路付近まで流下している (図-3. 36)</li> </ul>

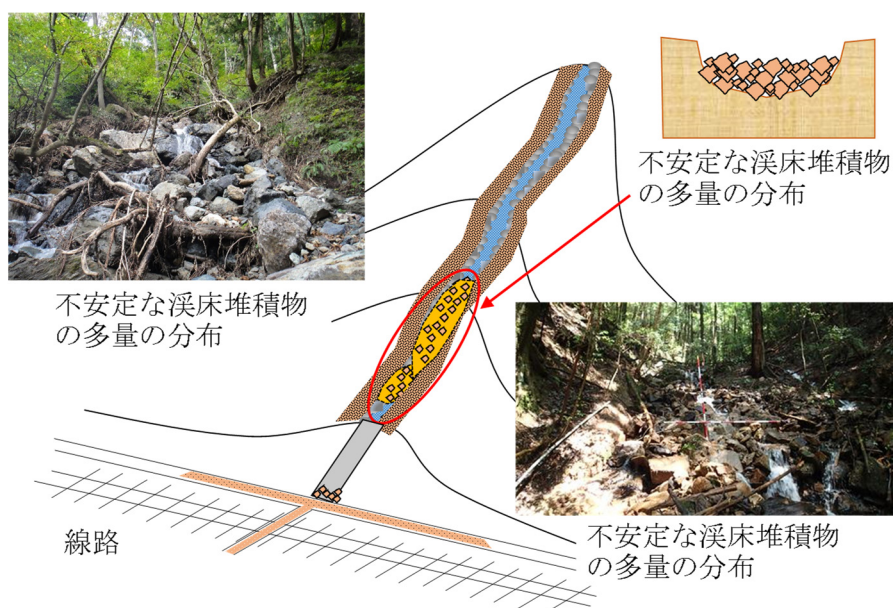


図-3.29 不安定な溪床堆積物の多量の分布 (HRF の例)

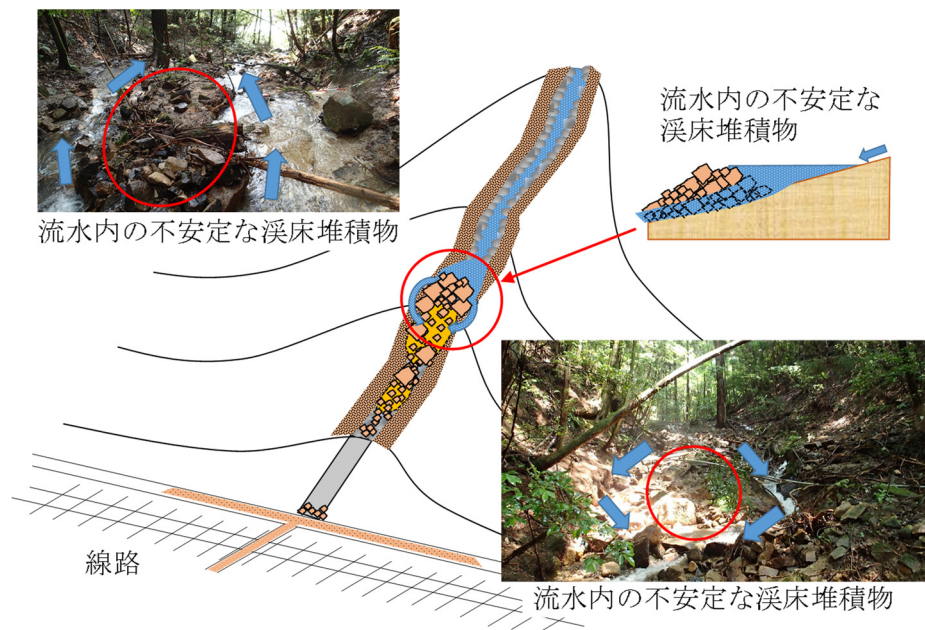


図-3.30 流水内の不安定な溪床堆積物の存在 (HRF の例)

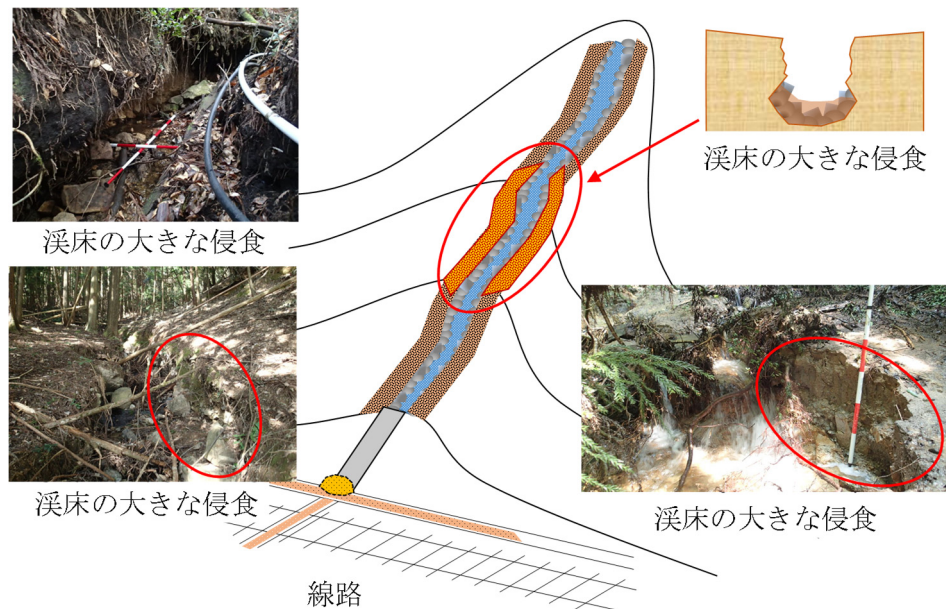


図-3.31 溪床の大きな侵食 (HRF の例)



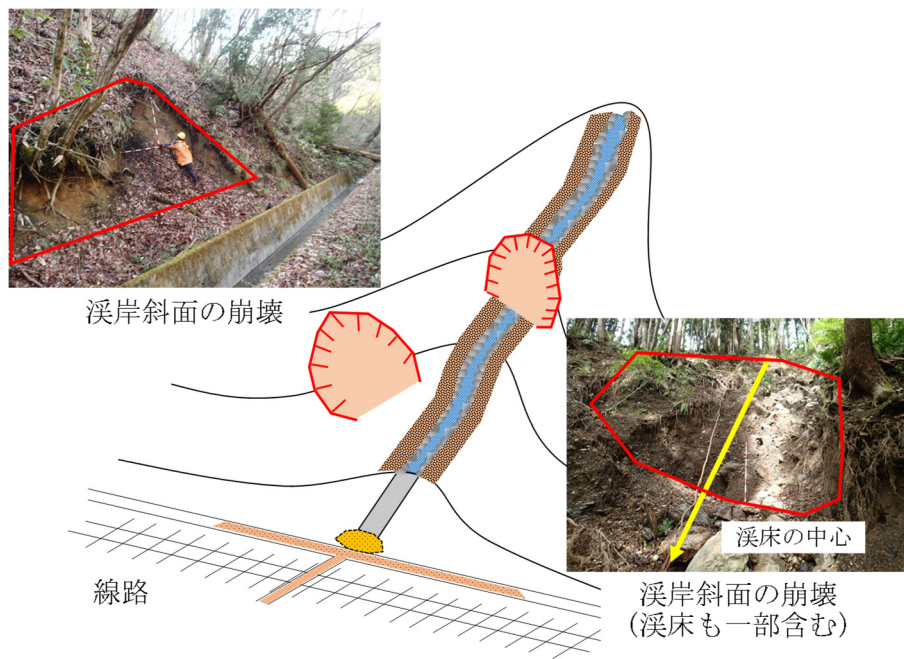


図-3.32 溪岸斜面における多数の崩壊（HRF の例）



図-3.33 溪流全体の著しい荒廃（HRF の例）

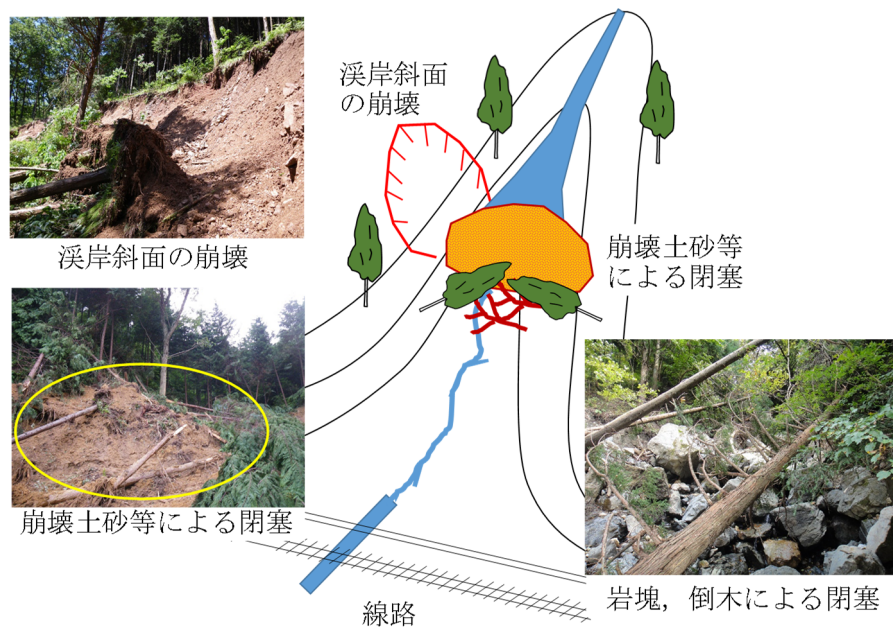


図-3.34 大規模な閉塞（HRF の例）

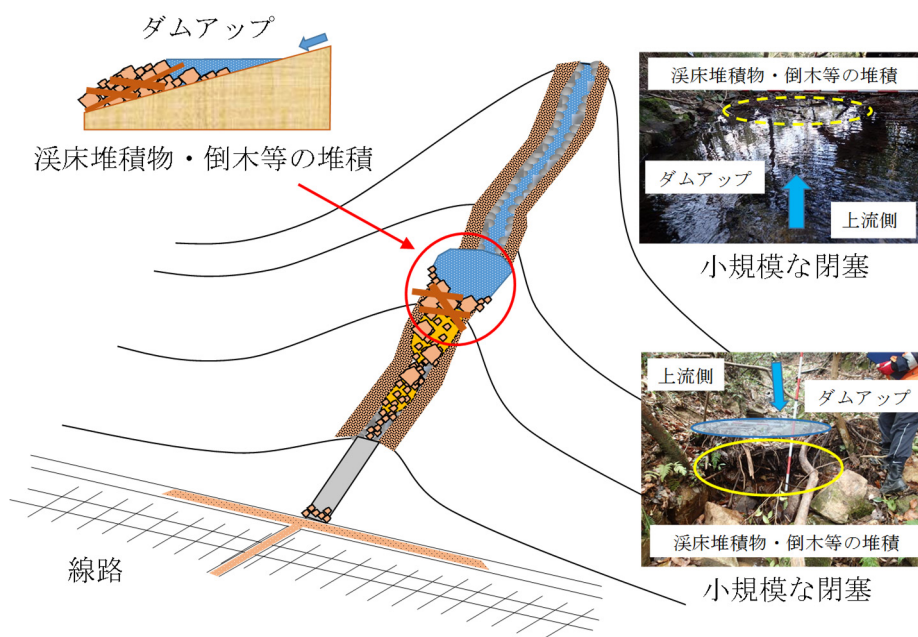


図-3.35 線路に近い位置における小規模な閉塞（HRF の例）

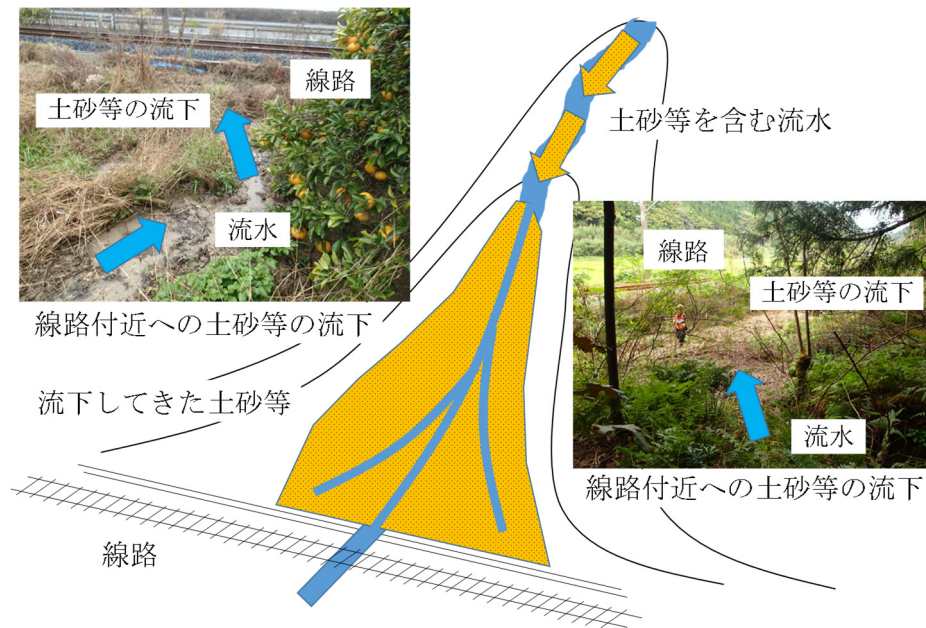


図-3.36 線路付近への土砂等流下（HRF の例）

## (2) HRF を除く溪流に関する条件の統計値

災害溪流 52 箇所，未災害溪流 49 箇所に対して，HRF を有する溪流を確認したところ，災害溪流では 19 箇所，未災害溪流では 4 箇所が該当した．そのため，ここでは，HRF を有する溪流を除外した災害溪流 33 箇所，未災害溪流 45 箇所の合計 78 箇所のデータにより，二次解析を行うことにした．

なお，78 箇所のデータにおける各条件の統計値を図-3.37～図-3.49 に示す．78 箇所のデータの統計値は，一次解析に用いた 3.2.2 のデータの統計値とほぼ同様であり，各条件が土砂流入の発生のしやすさを定性的に示している．具体的には，溪床，溪岸斜面が急勾配である場合，流域面積が大きい場合，溪床の植生量が少ない場合，溪床，溪岸斜面の荒廃が進んでいる場合および線路の上流側に土砂等を堆積させる平坦地が少ない場合等には，土砂流入が発生しやすい傾向となった．



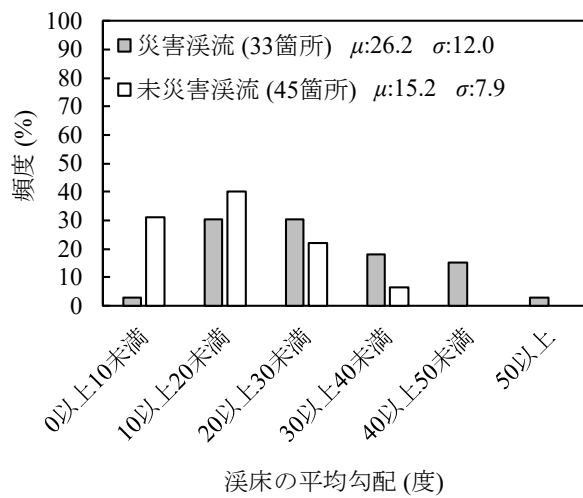


図-3.37 溪床の平均勾配の頻度分布

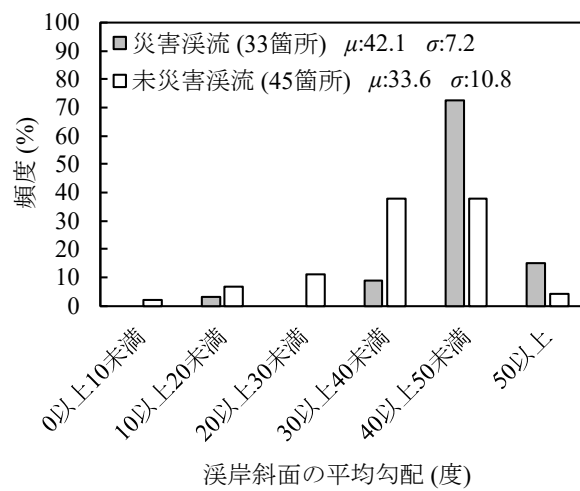


図-3.38 溪岸斜面の平均勾配の頻度分布

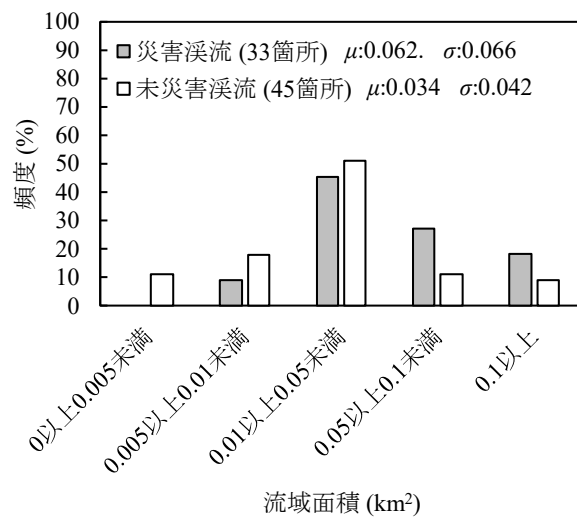


図-3.39 流域面積の頻度分布

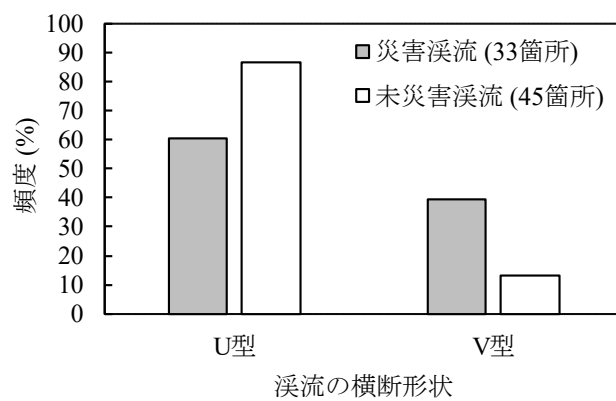


図-3.40 溪流の横断形状の頻度分布

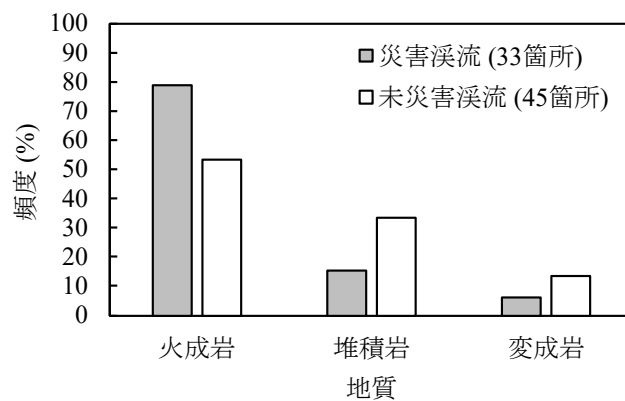


図-3.41 地質の頻度分布

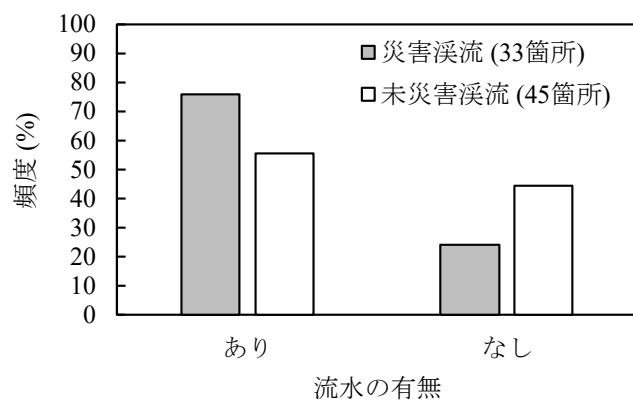


図-3.42 流水の有無の頻度分布

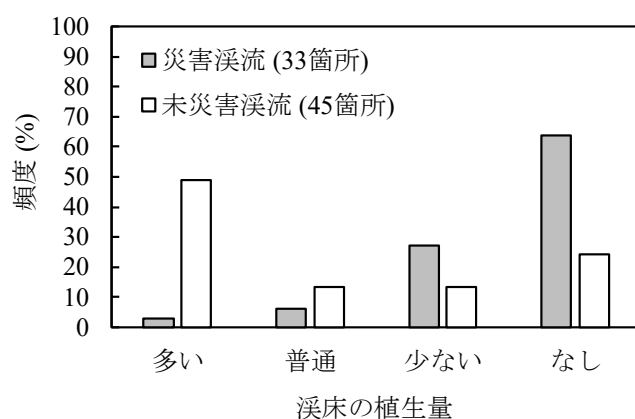


図-3.43 溪床の植生量の頻度分布

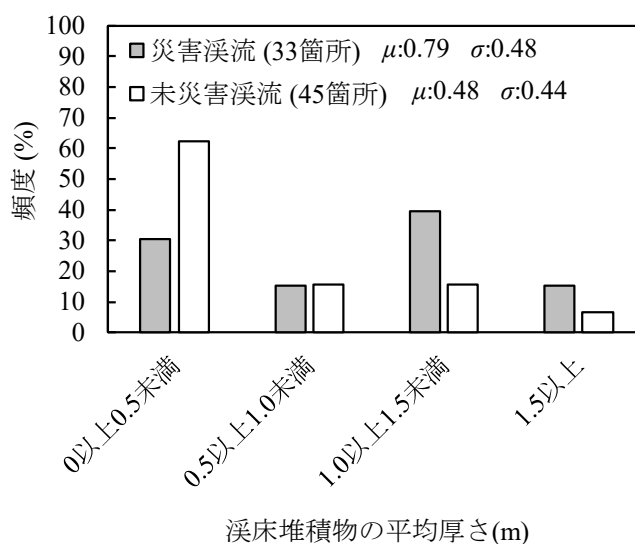


図-3.44 溪床堆積物の平均厚さの頻度分布

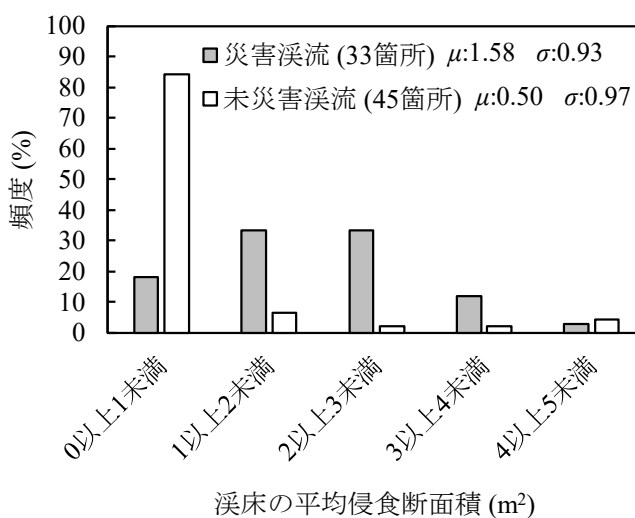


図-3.45 溪床の平均侵食断面積の頻度分布

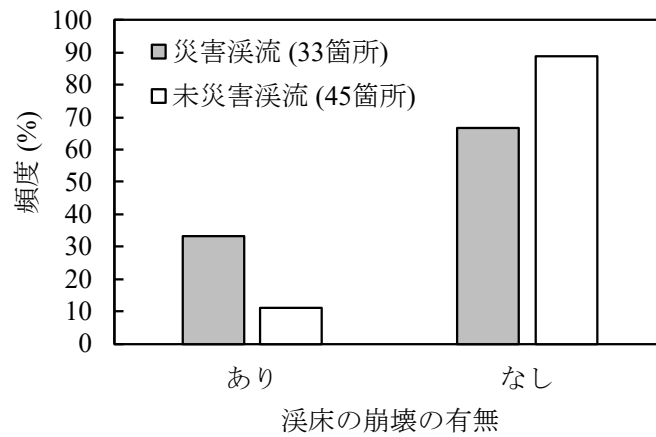


図-3.46 溪床の崩壊の有無の頻度分布

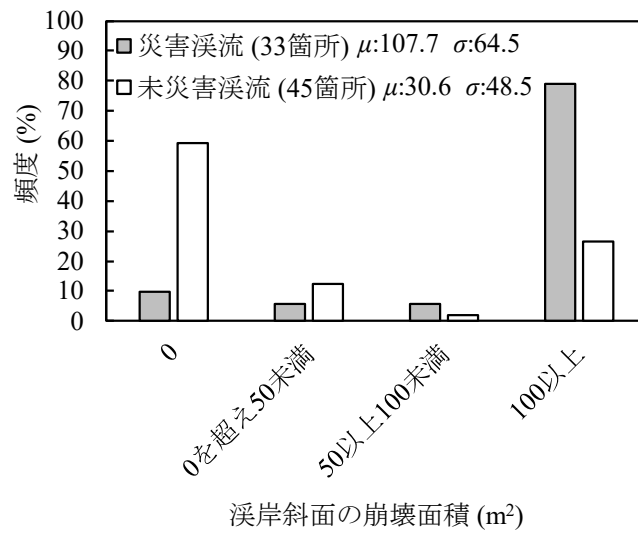


図-3.47 溪岸斜面の崩壊面積の頻度分布

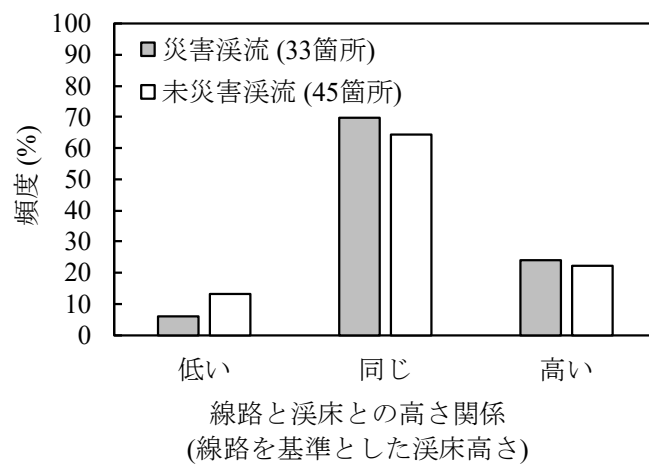


図-3.48 線路と溪床との高さ関係（線路を基準とした溪床高さ）の頻度分布

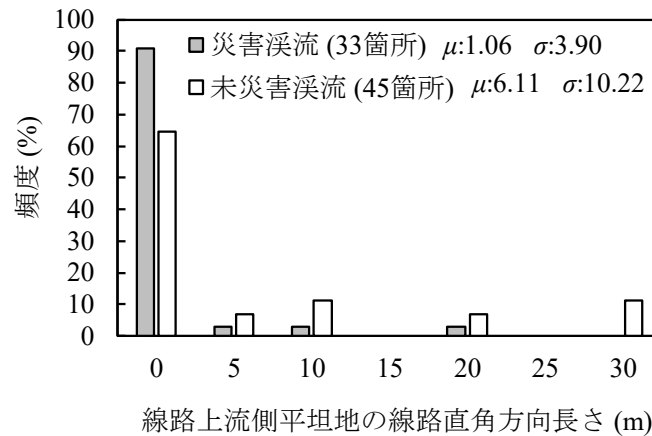


図-3.49 線路上流側平坦地の線路直角方向長さの頻度分布

### (3) 二次解析

二次解析は、一次解析で用いた表-3.5 の 13 条件とカテゴリー分類により、第四回まで行った。第四回の解析結果を表-3.10 に、解析結果から得た判別グラフを図-3.50 に示す。

図-3.50 に示すように、判別的中点は 0.33 である。表-3.11 に、表-3.10 の第四回の解析結果を用いて土砂流入の発生、非発生を判別した場合の精度を示す。災害的中率は約 91%、災害非的中率は約 9%であり、未災害的中率は約 93%、未災害非的中率は約 7%である。また、判別的中率は、約 93%、相関比は、0.61 である。

これらの結果から、HRF を有する溪流を除外して行った二次解析の精度は、HRF を有する溪流を除外しないで行った一次解析の精度よりもやや高いことがわかった。なお、安全側判別的中率は、約 96%である。

表-3.10 二次解析（第四回）の結果（HRF を有する溪流を除く）

条件		カテゴリー分類	データ数	点数	点数の範囲 (最大値と最小値の差分)	順位
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	$\theta_r < 10^\circ$	15	-0.47	0.95	1
		$10^\circ \leq \theta_r < 25^\circ$	41	-0.09		
		$25^\circ \leq \theta_r$	22	0.48		
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	$\theta_s < 40^\circ$	30	-0.35	0.57	2
		$40^\circ \leq \theta_s$	48	0.22		
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	$S_b < 0.05$	54	-0.12	0.39	7
		$0.05 \leq S_b$	24	0.27		
	地質	火成岩	50	0.10	0.40	6
		堆積岩	20	-0.12		
		変成岩	8	-0.30		
環境	溪床の植生量	少ない, なし	47	0.20	0.51	4
		多い, 普通	31	-0.31		
荒廃	溪床堆積物の平均厚さ (m)	$H_s < 1.0$	50	-0.05	0.14	8
		$1.0 \leq H_s$	28	0.09		
	溪床の平均侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	$S_r < 0.25$	26	-0.36	0.54	3
		$0.25 \leq S_r$	52	0.18		
	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	$S_s < 100$	42	-0.19	0.41	5
		$100 \leq S_s$	36	0.22		

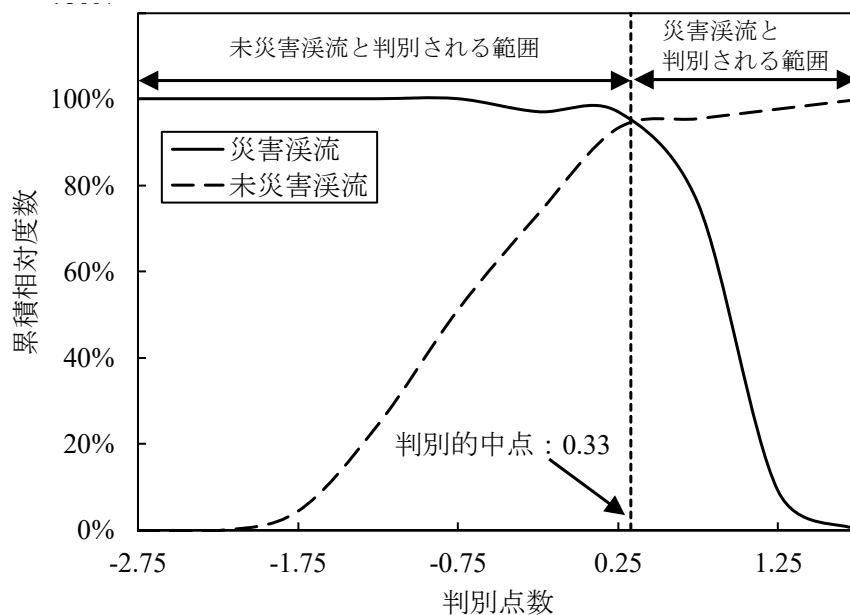


図-3.50 判別グラフ

（二次解析（第四回）の結果，HRF を有する溪流を除く）

表-3.11 解析精度

(二次解析 (第四回) の結果, HRF を有する溪流を除く)

	災害溪流 (判別)	未災害溪流 (判別)
災害溪流 (実績)	91%	9%
未災害溪流 (実績)	7%	93%

### 3.3.4 危険度の高い要因を有する溪流を考慮した二次解析の精度分析

表-3.10 の第四回の解析結果を用いて算出した各溪流の判別点数と、最大 1 時間雨量および最大 24 時間連続雨量との関係をそれぞれ図-3.51、図-3.52 に示す。なお、災害溪流 33 箇所における降雨量データは 54 データであり、未災害溪流 45 箇所における降雨量データは 45 データである。図-3.51、図-3.52 より、災害非的中の溪流の災害雨量は、最大 1 時間雨量が 40mm/h 以上、最大 24 時間連続雨量が 100mm 以上と大きい値である。つまり、土砂流入が発生しにくいと判別されたこれらの溪流において、土砂流入が発生した主たる原因は、大きい降雨量であると推察される。

なお、図-3.51、図-3.52 に示すように、災害溪流において危険度が高いと判別された溪流ほど、最大 1 時間雨量、最大 24 時間連続雨量ともに小さい降雨量で土砂流入が発生している傾向にあり、未災害溪流において危険度が低いと判別された溪流ほど、最大 1 時間雨量、最大 24 時間連続雨量ともに過去に大きい降雨量を経験しているにもかかわらず土砂流入が発生していない傾向にある。すなわち、危険度が高いと判別された溪流は、土砂流入が発生しやすく、危険度が低いと判別された溪流は、土砂流入が発生しにくい傾向にあるといえる。図-3.53 は、災害雨量を最大 1 時間雨量と最大 24 時間連続雨量の 2 つの雨量指標で示したものである。図-3.53 には、HRF を有する溪流の災害雨量および HRF を有しない溪流の災害雨量として、災害中の溪流の災害雨量、災害非的中の溪流の災害雨量を区分して示している。災害非的中の溪流の災害雨量は、最も小さいものでも最大 1 時間雨量が 47mm/h、最大 24 時間連続雨量が 128mm であり、このような降雨量が観測される場合には、基本的に、降雨時運転規制によって列車の安全走行の確保が図られている。なお、HRF を有する溪流のなかには、最大 1 時間雨量が 20mm/h 未満、最大 24 時間連続雨量が 100mm 未満といった比較的小さい降雨量で土砂流入が発生したものがある。

以上の結果より、HRF を有する溪流を除外して行った二次解析の結果は、HRF を有する溪流を除外しないで行った一次解析の結果よりも、溪流からの土砂流入の発生のしやすさを精度よく判別できることがわかった。

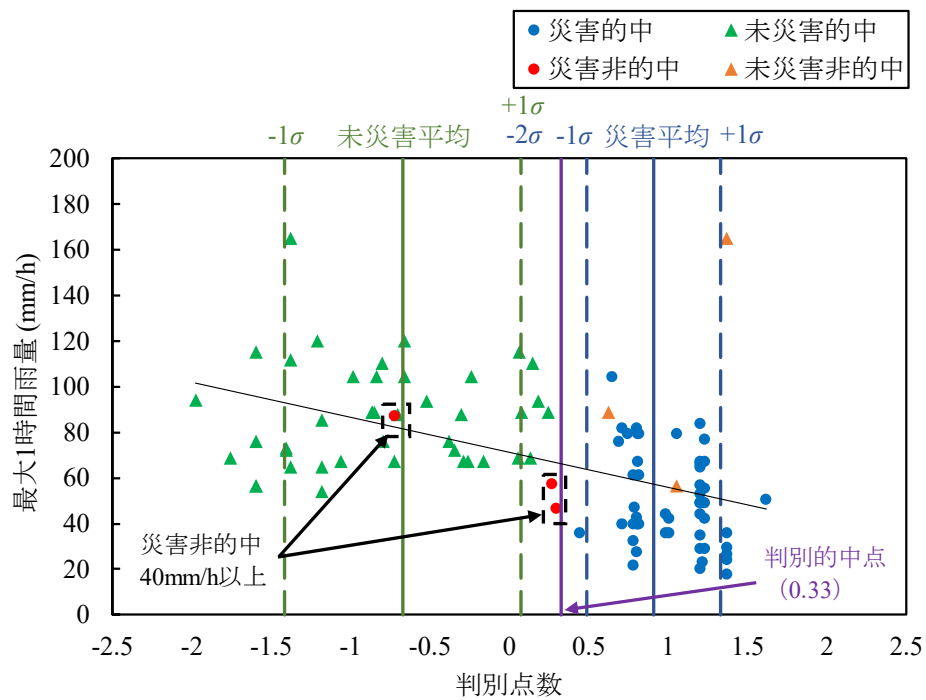


図-3.51 各溪流の判別点数と最大1時間雨量との関係（HRFを有する溪流を除く）

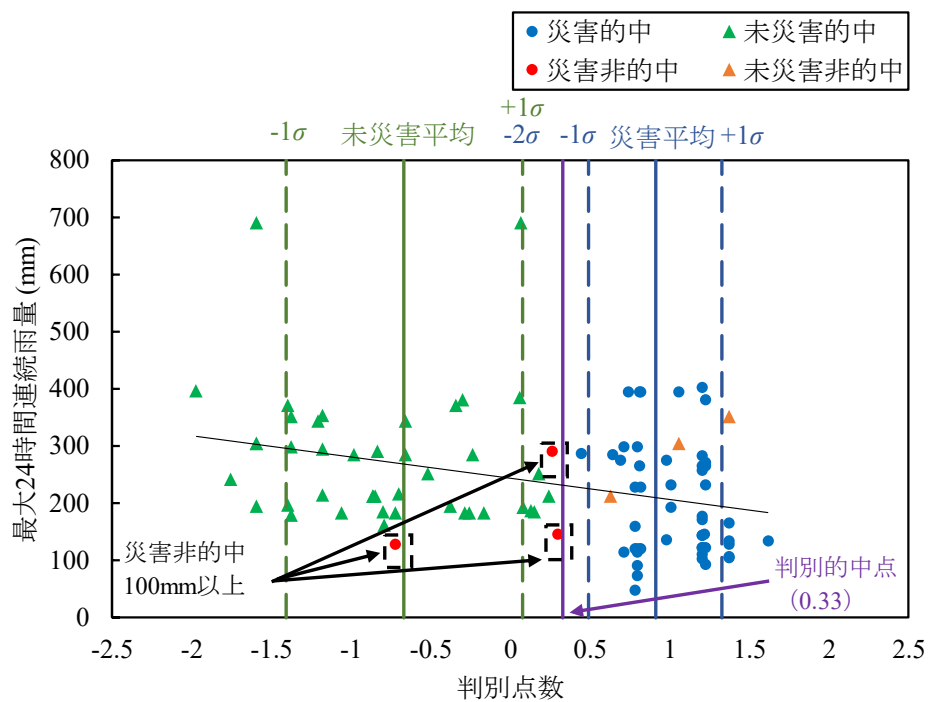


図-3.52 各溪流の判別点数と最大24時間連続雨量との関係  
（HRFを有する溪流を除く）



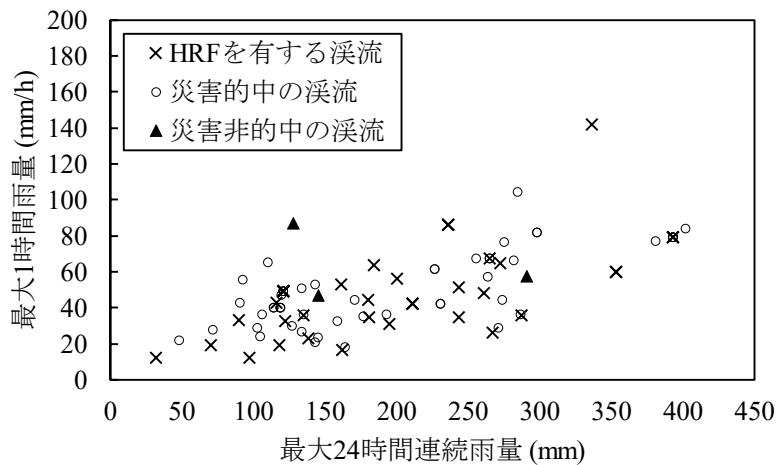


図-3.53 災害雨量（最大1時間雨量と最大24時間連続雨量）

### 3.3.5 危険度評価手法の提案

上述したように、二次解析の結果を用いて、土砂流入の発生のしやすさを精度よく判別できることがわかった。ただし、ここで判別したい危険度は、土砂流入の発生のしやすさではなく、溪流からの土砂等流出の危険度であるため、図-3.54の判別グラフの概略図に示すように、危険度をa, b, cランクの3ランクに区分する判別点数を新たに設定することを試みた。

なお、危険度評価のランクには、aaランクとsランクもあるが、aaランクと評価される状態とは、線路付近まで土砂等が到達している等、列車の運行を直ちに中止する必要がある危険度が非常に高い状態であり、調査を行う技術者でなくとも容易に判断できるものである。また、sランクと評価される状態とは、危険度が極めて低い状態のことであるが、水の集まりやすい地形条件にある溪流に対して、土砂流入が発生しないと判断することは基本的にはない。そのため、aaランクとsランクについては、解析結果に基づいて作成した評価手法による評価は行わない。

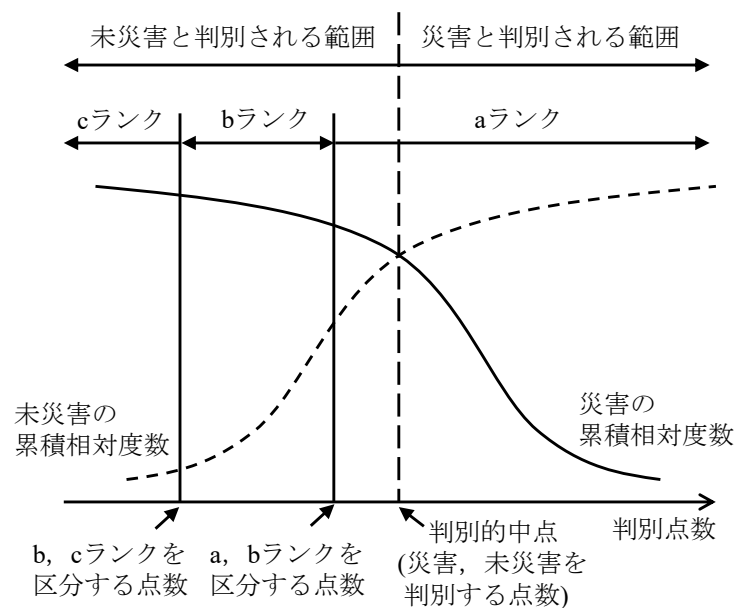


図-3.54 判別グラフの概略図

表-3.12 に、災害溪流と未災害溪流の判別点数の平均値および標準偏差等を示す。災害溪流の判別点数の平均値は 0.91、標準偏差は 0.42 であり、未災害溪流の判別点数の平均値は-0.67、標準偏差は 0.74 である。

a ランクと b ランクとを区分する判別点数には、災害溪流のデータが a ランクに含まれていることを基本とするために、災害溪流の判別点数の平均値- $2\sigma$  の値である 0.07 を仮の値として設定した。また、b ランクと c ランクとを区分する判別点数には、未災害溪流の判別点数の平均値- $1\sigma$  の値である-1.41 を仮の値として設定し、これらの区分による危険度評価手法が、実務に適用可能であるかを検討した。表-3.13 に、各ランクに含まれる災害溪流および未災害溪流のデータ数とその割合を示す。災害溪流のデータの約 97%が a ランクに含まれている。なお、災害溪流のデータの約 3%が b ランクに含まれているが、その割合は小さく、また、この災害は大きい降雨量により発生したものであるため、危険側の評価にはならないと考える。災害溪流のデータは、c ランクには含まれていない。未災害溪流のデータの約 18%が a ランクに含まれているが、これは安全側の評価である。未災害溪流のデータの約 69%が b ランクに、約 13%が c ランクに含まれている。このように、災害溪流のデータは基本的に a ランクに区分され、未災害溪流のデータの多くは b ランクまたは c ランクに区分されている。また、災害溪流のデータのなかに、危険側に評価されるデータもないことから、上述した区分による評価は、実務に適用可能であると考ええる。

表-3.12 災害溪流と未災害溪流の判別点数の平均値および標準偏差等

	平均値	標準偏差	平均値+1 $\sigma$	平均値-1 $\sigma$	平均値-2 $\sigma$
災害溪流 (実績)	0.91	0.42	1.33	0.49	0.07
未災害溪流 (実績)	-0.67	0.74	0.07	-1.41	-2.15

表-3.13 各ランクにおけるデータ数と割合

		データ数	判別結果 ( ) 内は割合		
			aランク	bランク	cランク
実績	災害溪流	33	32 (97%)	1 (3%)	0 (0%)
	未災害溪流	45	8 (18%)	31 (69%)	6 (13%)

すなわち、表-3.10 の第四回の解析結果を用いて、式(3.7)に示すように判別点数  $P$  を算出することで、溪流からの土砂等流出の危険度を a, b, c ランクに区分することができる。本論文では、表-3.10 の解析結果を、溪流からの土砂等流出の危険度を評価するための採点表として提案する。

$$P = \sum P_i \quad (3.7)$$

$0.07 \leq P$  のとき、a ランク

$-1.41 \leq P < 0.07$  のとき、b ランク

$P < -1.41$  のとき、c ランク

ここで、

$P_i$  : 表-3.10 による各条件の点数

$P$  : 表-3.10 により算出した判別点数

### 3.4 本章のまとめ

本章では、線路近傍の溪流からの土砂流入を防止するために、カルテ範囲における溪流からの土砂等流出の危険度と、列車運行への影響度を評価し、それらを組み合わせることで、溪流の危険度を総合的に評価する手法について検討した。

本章で得られた主な結果は、次のとおりである。

- 1) 単一あるいはごく少数の劣悪な要因を HRF と定義した。
- 2) 溪流からの土砂等流出の危険度を判別するために、災害溪流と未災害溪流の調査データに基づく解析を行った。解析は、HRF を有する溪流を除外しなかった場合と、除外した場合について行い、それらの解析精度を災害雨量および経験雨量との関係から分析、比較した。その結果、HRF を有する溪流を除外した場合の解析精度の方が、高いことがわかった。
- 3) HRF を有する溪流を除外して行った解析の結果を用いて、溪流からの土砂等流出の危険度を a, b, c ランクに区分する採点表を提案した。

### 第3章の参考文献

- 1) 佐々木良, 杉山友康: 鉄道線路への土砂流入に対応する降雨モニタリングに関する検証, 第52回地盤工学研究発表会, T-04, pp.1871-1872, 2017.7.
- 2) 森泰樹, 藤井昌隆, 佐々木良, 杉山友康: 鉄道沿線における溪流災害の防止に向けた取り組み, 土木学会第72回年次学術講演会, III-205, pp.409-410, 2017.9.
- 3) 森泰樹, 藤井昌隆, 木村元哉: JR西日本における斜面管理の現状と今後の取り組みー斜面防災カルテの利活用, 溪流災害の防止の取り組みー, 土木施工, Vol.58, No.9, pp.39-42, 2017.9.
- 4) 森泰樹, 藤井昌隆, 佐々木良, 杉山友康: 溪流災害の防止に向けた取り組み, 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術資料, Vol.6, 2017.10.
- 5) 森泰樹, 藤井昌隆, 佐々木良: 溪流災害の防止に向けた取り組み, 日本鉄道施設協会誌, Vol.56, No.3, pp.163-166. 2018.3.
- 6) 松田好史: 鉄道強靱化における JR西日本の斜面および土構造物の防災・減災の取り組み, 交通と統計, No.56, pp.80-100, 2019.7.
- 7) 森泰樹, 藤井昌隆, 杉山友康, 里深好文: 線路への小規模土砂流入の危険度評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.1, pp.31-48, 2019.5.
- 8) 有馬哲, 石村貞夫: 多変量解析のはなし, 東京図書, pp.211-242, 1987.10.
- 9) 岡田勝也, 杉山友康, 村石尚, 野口達雄: 統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法, 土木学会論文集, No.448/III-19, pp.25-34, 1992.6.
- 10) Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M.: STATISTICAL RISK ESTIMATING METHOD FOR RAINFALL ON SURFACE COLLAPSE OF A CUT SLOPE, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 34, No. 3, pp.49-58, Sept.1994.
- 11) Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M.: STATISTICAL RAINFALL RISK ESTIMATING METHOD FOR A DEEP COLLAPSE OF A CUT SLOPE, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 35, No. 4, pp.37-48, Dec.1995.
- 12) 杉山友康: 降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究, 鉄道総研報告, 特別第19号, 1997.
- 13) 布川修, 杉山友康, 森泰樹, 畑明仁: 鉄道沿線斜面の降雨時リスク評価に基づく防災対策の意思決定方法, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.1, pp.160-173, 2011.
- 14) 杉山友康, 森泰樹, 布川修, 太田直之: 降雨による盛土崩壊の形態と規模に関する統計的予測手法, 鉄道総研報告, Vol.22, No.1, 2008.1.
- 15) SUGIYAMA, T., MORI, T., NUNOKAWA, O. and OTA, N.: A Method of Predicting the

Shape and Scale of Rainfall-related Embankment Collapse, Quarterly Report of RTRI, Vol.49, No.3, Aug.2008.

- 16) 布川修, 杉山友康, 森泰樹, 太田直之, 岡田勝也: 統計的手法による鉄道盛土と切土の降雨による崩壊土量の概略予測手法, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.3, pp.728-744, 2009.9.
- 17) 森泰樹, 布川修, 杉山友康, 太田直之, 淵脇晃, 岡田勝也: 鉄道盛土の崩壊形状の予測に関する検討, 第 42 回地盤工学研究発表会, 988, E-06, pp.1969-1970, 2007.7.
- 18) 森泰樹, 布川修, 杉山友康, 太田直之, 淵脇晃, 岡田勝也: 鉄道盛土の崩壊規模の予測に関する検討, 第 43 回地盤工学研究発表会, 997, E-06, pp.1993-1994. 2007.7.
- 19) 岩本真由子, 森泰樹, 荒巻智, 杉山友康: 災害分析に基づいた斜面对策箇所の優先順位決定手法の提案, 土木学会第 69 回年次学術講演会, VI-134, 2014.9.
- 20) 野口達雄: 鉄道沿線岩石斜面の安定性評価に関する研究, 中央大学博士論文, 2002.3.
- 21) 外狩麻子, 友利方彦, 鈴木博人: なだれ斜面管理手法に関する検討, JR EAST Technical Review, No.45, pp.35-40, 2013.
- 22) 小橋澄治, 今井篤雄, 久保村圭助, 中山政一, 真砂祥之助: 航空写真判読による斜面の安全度解析 (1) -高山線での実施例-, 新砂防, Vol.84, pp.14-23, 1972.5.
- 23) 足立勝治, 徳山久仁夫, 中筋章人, 中山政一, 二宮寿男, 大八木俊治: 土石流発生危険度の判定について, 新砂防, Vol.106, pp.7-16, 1977.12.
- 24) 大石博之, 八木俊夫, 竹本大昭, 荒木義則, 榊原弘之, 古川浩平, 浦真: 統計手法を利用した 1999 年 6 月 29 日広島県西部における土砂災害発生状況と降雨・地形要因の関連についての考察, 砂防学会誌, Vol.58, No.6, pp.3-10, 2006.3.
- 25) 荒木義則, 古川浩平, 松永悟, 小笠原貴人, 石川芳治, 水山高久: 土石流危険渓流における地形特性を考慮した土砂崩壊の発生限界線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.574/VI-36, pp.33-47, 1997.9.
- 26) 鉄道総合技術研究所: 鉄道総研教育講座 斜面及び土構造物に対する鉄道防災 (降雨災害), pp.1-8, 1998.12.

## 第4章 現場技術者のための溪流調査方法と危険度評価手法の提案

### 4.1 目的と概要

鉄道では、土工等設備を検査する能力をもつ現場技術者が、定性的な判断により溪流の危険度を評価してきた。具体的には、溪床の緩急の程度および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等を目視や簡易な計測で確認し、過去に調査した他の溪流の状態と相対比較すること等により危険度を評価していた。しかしながら、溪流には、地形、地質等の様々な要因が複雑に混在していることから、必ずしも斜面の専門技術者ではない現場技術者にとって、溪流の危険度を精度よく評価することは容易でなく、また、個人の危険度判断能力や経験の差による評価結果のばらつきも生じやすかった。このことから、鉄道では、現場技術者が抛り所とできるような統一された溪流の危険度評価手法の作成が望まれてきた。

そこで、本章では、現場技術者が個人差なく同等に、かつ高い精度で溪流の危険度を評価できる手法について提案する。

図-4.1に、溪流に対する検査・調査の区分を示す。図-4.1に示す3つの区分は、線路から近い順番に、通常全般検査の対象範囲（以下、線路近傍範囲という）、カルテ範囲およびカルテ範囲よりもさらに上流の流域（以下、上流域という）である。ここでは、線路近傍範囲を対象として行う通常全般検査で用いる危険度評価手法として、現場技術者が比較的容易に使用できる写真やビジュアルを用いた評価手法を提案する。また、カルテ範囲を対象として行う調査で用いる危険度評価手法として、3章で作成した採点表等による評価手法を提案する。

なお、鉄道沿線の溪流には、上流域が鉄道管理用地を超えて、広く分布しているものが多い。また、時間的、労力的な制約条件等もあることから、鉄道事業者が上流域の調査を行うことは少ない。しかしながら、上流域に存在する荒廃状態等が、将来、土砂流入の発生に影響を与える可能性はあるため、上流域の危険度を把握しておくことも重要であるといえる。

そこで、本章では、上流域の危険度を、現地調査等に伴う時間や労力をかけずに、数値標高モデル（Digital Elevation Model）を用いて、可能な限り簡便に評価できる手法について提案する。

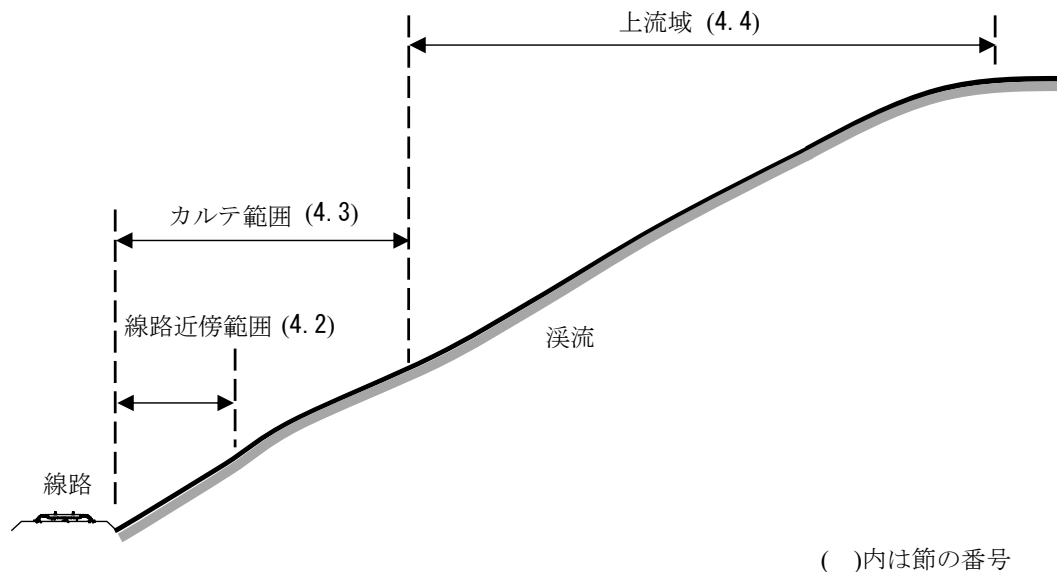


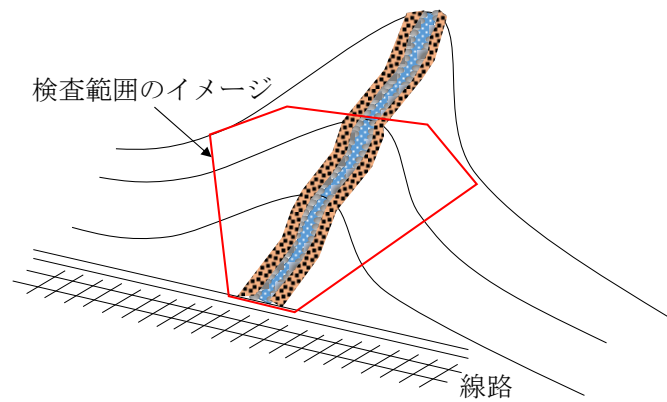
図-4.1 溪流の検査・調査における区分

## 4.2 通常全般検査のための調査方法と危険度評価

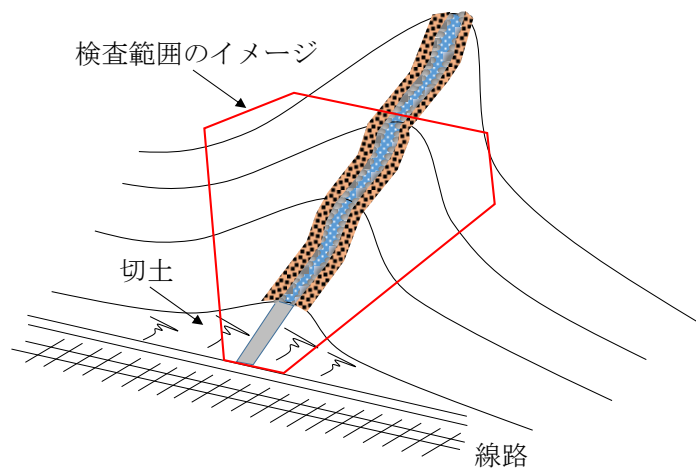
2.2.1 で述べたとおり，JR 西日本では，通常全般検査を巡回検査と巡回以外検査に区分している．巡回検査では，保線を担当する現場技術者が線路点検と合わせて主に線路付近の土工等設備の点検を行う．また，巡回以外検査では，土木を担当する現場技術者が鉄道管理用地内にある土工等設備とその周辺の斜面の状態を確認する．線路近傍範囲の概要を自然斜面，切土，盛土区間に分けて，図-4.2 に例示する．

通常全般検査は，現場技術者が線路付近を移動しながら，目視で土工等設備の状態を把握していく検査であるため，時間的，労力的な制約条件を考慮すると，溪流の危険度評価手法は，現場技術者が比較的容易に使用できるものであることが望ましい．そのため，通常全般検査における溪流の危険度評価は，写真やビジュアルを用いた手引き等を適用して行うことが有効である．

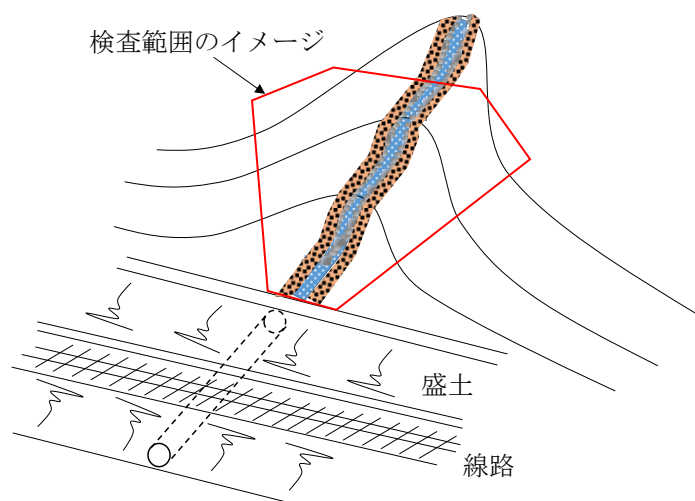




(a) 自然斜面の例



(b) 切土の例



(c) 盛土の例

図-4.2 線路近傍範囲（通常全般検査の対象範囲）の概要

表-4.1 に示すような著しく不安定な状態がある場合には、溪流からの土砂等流出の危険度を a ランクとする。これらは、3.3.3 の表-3.9 および図-3.29～図-3.36 に示した HRF の内容と同様のものである。

表-4.1 HRF（著しく不安定な状態，a ランク）の例

対象範囲	HRF (著しく不安定な状態) の例	
	状態	詳細内容
線路近傍範囲	不安定な溪床堆積物の分布	<ul style="list-style-type: none"> <li>不安定な溪床堆積物が多量に分布している (図-3.29)</li> <li>溪床堆積物が流水内に不安定な状態で存在している (図-3.30)</li> </ul>
	著しい荒廃	<ul style="list-style-type: none"> <li>溪床が大きく侵食されている (図-3.31)</li> <li>溪岸斜面に多数の崩壊が発生している (図-3.32)</li> <li>過去の災害の形跡が確認できるなど、全体的に著しく荒廃している (図-3.33)</li> </ul>
	崩壊土砂等による閉塞	<ul style="list-style-type: none"> <li>崩壊土砂等による大規模な閉塞が生じている (図-3.34)</li> <li>線路近傍において、崩壊土砂等による小規模な閉塞が生じている (図-3.35)</li> </ul>
	線路付近への土砂等流下	<ul style="list-style-type: none"> <li>流水により土砂等が線路付近まで流下している (図-3.36)</li> </ul>

溪流からの土砂等流出の危険度が b ランクである状態の例を図-4.3～図-4.7 に示す。図-4.3 は、侵食の程度が比較的小さい状態を示している。図-4.4 は、侵食が溪床の一部に分布している状態を示している。また、図-4.5 は、荒廃の程度が小さい状態を、図-4.6 は、侵食は確認できるが、溪流下部は緩勾配である状態を、図-4.7 は、侵食の程度が小さい等、全体的に荒廃が少ない状態を示している。

b ランクの状態とは、これらの例に示すように、不安定な状態はあるが、その程度が小さいものである。



図-4.3 b ランクの例（その1）（侵食の程度が比較的小さい）



図-4.4 b ランクの例（その2）（侵食が溪床の一部に分布している）



図-4.5 b ランクの例（その3）（荒廃の程度が小さい）



図-4.6 b ランクの例（その 4）（侵食は確認できるが溪流下部は緩勾配である）



図-4.7 b ランクの例（その 5）  
（侵食の程度が小さい等，全体的に荒廃が少ない）

溪流からの土砂等流出の危険度が c ランクである状態の例を図-4.8～図-4.10 に示す。図-4.8 は，溪床堆積物は存在しているが，その数が少ない状態を示している。また，図-4.9，図-4.10 は，溪床の侵食や溪岸斜面の崩壊等が存在せず，全体的に荒廃がみられない状態を示している。

c ランクの状態とは，これらの例に示すように，溪床堆積物が少ない，侵食や荒廃がみられない等，危険度が小さいため問題にならない状態である。





図-4.8 c ランクの例（その 1）（溪床堆積物が少ない）



図-4.9 c ランクの例（その 2）（全体的に荒廃等がみられない）



図-4.10 c ランクの例（その 3）（全体的に荒廃等がみられない）

溪流からの土砂等流出の危険度が aa ランクである状態の例を図-4.11、図-4.12 に示す。aa ランクの状態とは、列車の運行を直ちに中止しなくてはならないような非常に危険度が高い状態である。ここで挙げた例は、図-4.11 に示すように、縦下水が閉塞され、流水や土砂等が線路内に流入する危険度が高い例と、図-4.12 に示すように、流下してきた土砂等が線路際において著しく不安定な状態で留まり、防護設備が破損している例である。

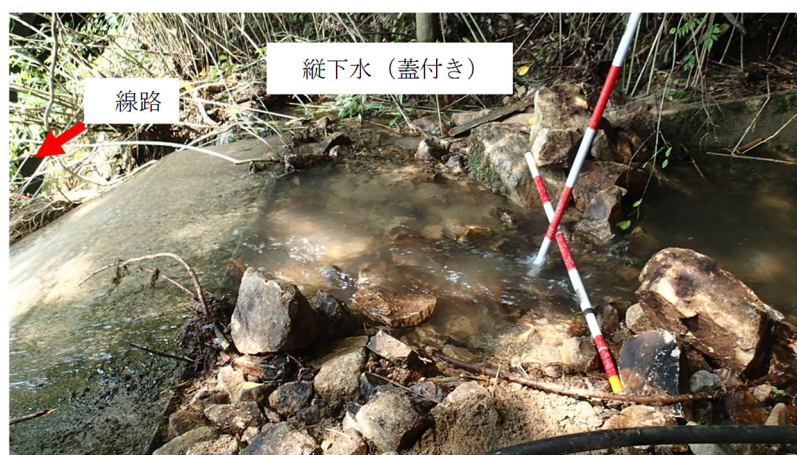


図-4.11 aa ランクの例（その 1）

（縦下水が閉塞され、土砂等が越流および流入する危険度が高い）



図-4.12 aa ランクの例（その 2）

（土砂等が線路付近まで到達している）

#### 4.3.1 危険度評価の流れ

```
graph TD; START([START]) --> D1{HRF (危険度が著しく  
高い要因)がある}; D1 -- "Yes (aランク)" --> B1[採点表による危険度評価  
(a, b, cランク)]; D1 -- "No" --> B1; B1 --> B2[列車運行への影響度評価 (1, 2, 3)]; B2 --> B3[溪流の危険度評価 (A, B, Cランク)]; B3 --> END([END]);
```

The flowchart illustrates the evaluation process for river flow danger degree. It begins with a 'START' terminal, leading to a decision diamond: 'HRF (危険度が著しく高い要因)がある' (Is there a significant factor for high danger degree?). If 'Yes (aランク)', it proceeds to a process box '採点表による危険度評価 (a, b, cランク)'. If 'No', it also proceeds to the same process box. This process box is enclosed in a dashed-line box labeled '溪流からの土砂等流出の危険度評価' (Evaluation of danger degree of sediment etc. outflow from the river flow). From the process box, the flow goes to '列車運行への影響度評価 (1, 2, 3)' (Evaluation of influence on train operation), then to '溪流の危険度評価 (A, B, Cランク)' (Evaluation of river flow danger degree), and finally to an 'END' terminal.

※AA(aa) , S(s)ランクは別途評価する

図-4.13 溪流の危険度評価の流れの概要（カルテ範囲）



#### 4.3.2 溪流からの土砂等流出の危険度評価

溪流からの土砂等流出の危険度評価については、3.3.3の表-3.9、図-3.29～図-3.36で示したHRFがあるかを確認し、HRFがある場合は、aランクとする。HRFがない場合は、3.3.3の表-3.10で示した溪流からの土砂等流出の危険度を評価するための採点表を用いることによって、溪流からの土砂等流出の危険度をa、b、cランクに区分する。なお、3.3.5で述べたとおり、aaランクとsランクについては、解析結果に基づいて作成した評価手法による評価は行わない。

#### 4.3.3 列車運行への影響度評価

列車運行への影響度については、線路と溪床との高さ関係やその高低差および線路上流側平坦地の線路直角方向長さといった線路への土砂等の流入のしやすさに関する条件と、防護設備の対策効果により評価することを検討した。

図-4.14に、線路と溪床との高さ関係やその高低差、線路上流側平坦地の線路直角方向長さおよび防護設備の対策効果を考慮して列車運行への影響度を評価するフローを示す。図-4.14に示すように、線路への土砂等の流入のしやすさに関する条件である線路と溪床との高さ関係を確認し、溪床が線路よりも高い位置にある場合には、土砂等が線路に直接流下する可能性が高いため、列車運行への影響度は、防護設備の対策効果を考慮して1もしくは2に区分する。また、線路と溪床との高さ関係が概ね同じか、もしくは溪床が線路よりも低い位置にある場合は、線路と溪床との高低差を確認し、その差が2m未満である場合には、列車運行への影響度は大きいと判断する。また、HRFを有する溪流や採点表による判別点数が大きく危険度が高いと評価された溪流が、排水管等により線路を横断している場合も同様に列車運行への影響度は大きいと判断する。ここで、危険度が高いと判断する判別点数は、3.3.5の表-3.12に示した災害溪流における判別点数の平均値+1 $\sigma$ の値を参考にして1.33とした。また、横断構造物が排水管等であれば、大雨による土砂等の堆積により通水不良が生じる可能性があると考えた。線路と溪床との高低差から影響度が大きいと判断した場合には、線路上流側平坦地の線路直角方向長さが20mあるかを確認し、その後、防護設備の対策効果を考慮して列車運行への影響度を1、2、3に区分する。

また、線路と溪床との高低差において、溪床が線路よりも2～5m程度低い位置にある場合には、列車運行への影響度は中くらいとし、防護設備の対策効果を考慮して列車運行への影響度を2もしくは3に区分する。線路と溪床との高低差において、溪床が線路よりも5m以上低い位置にある場合には、列車運行への影響度は小さいと考えて3とする。



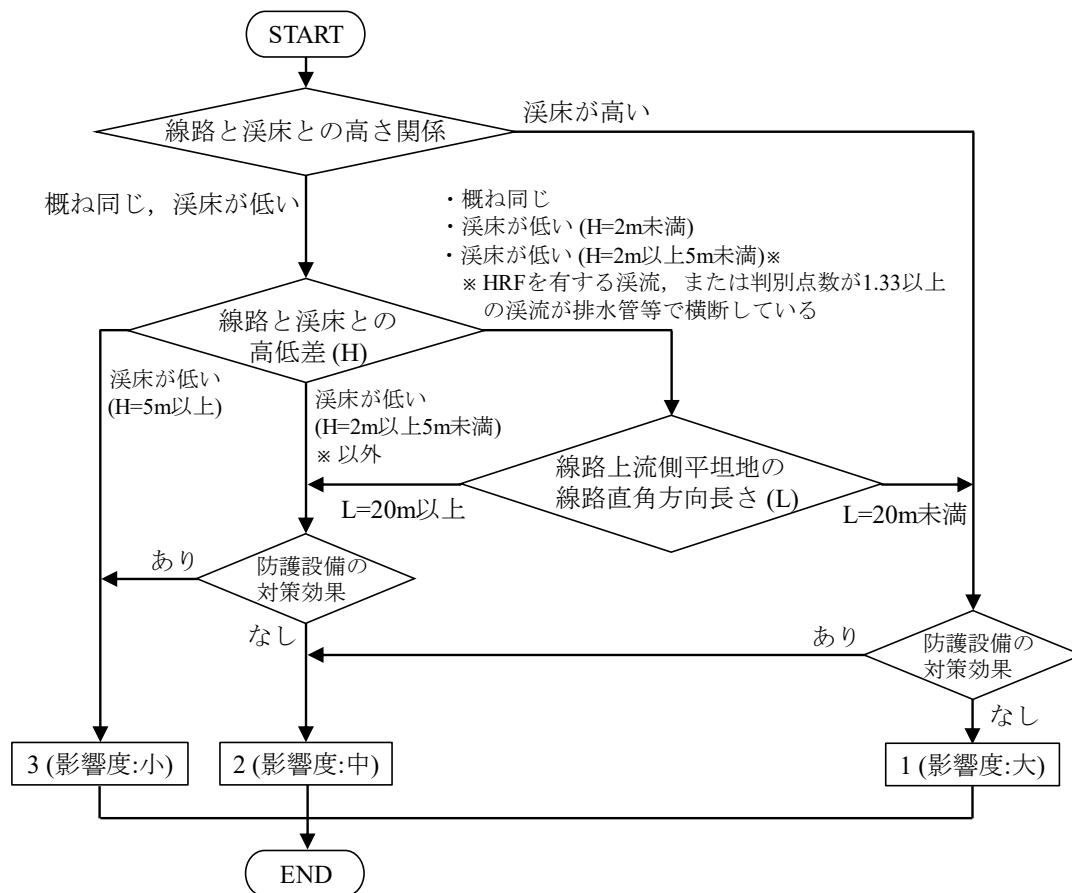


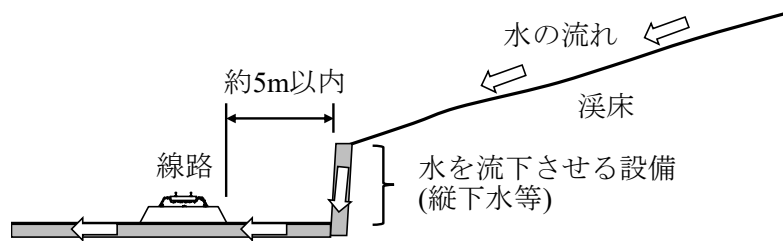
図-4.14 列車運行への影響度評価フロー

以下，（１）線路と溪流との交差部における高さ関係および高低差，（２）線路上流側平坦地の線路直角方向長さ，（３）防護設備の対策効果について，それぞれの項目の概要および図-4.14 のフローに適用した判断基準の根拠を示す．

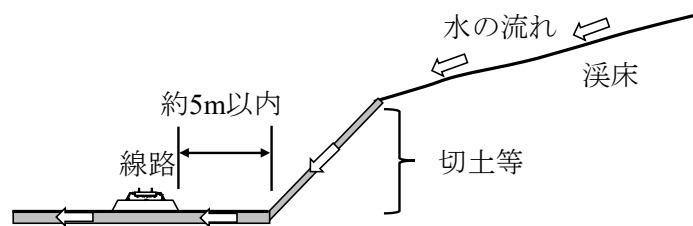
（１）線路と溪流との交差部における高さ関係および高低差

線路と溪床との高さ関係については，図-4.15 に示すように，線路から上流側に水平距離で約 5m 以内の範囲において，水を流下させる設備がある場合等には，線路よりも溪床が高い位置にあるとする．また，図-4.16 (a) の例に示すように，水を流下させる設備が線路から上流側に水平距離で約 5m 以上離れた位置にある場合，または図-4.16

(b) の例に示すように，溪流が開渠や伏び等の排水設備によって線路と概ね同じ高さの位置で横断している場合には，線路と溪床との高さは概ね同じであるとする．図-4.17 の例に示すように，線路と溪流の交差部が盛土や橋りょう（橋りょう延長 4m 未満）等になっている場合には，線路よりも溪床が低い位置にあるとする．なお，高低差については，盛土の場合は溪床から線路（施工基面）までの高さ，橋りょうの場合は溪床から桁下面までの高さ（空頭）とする．

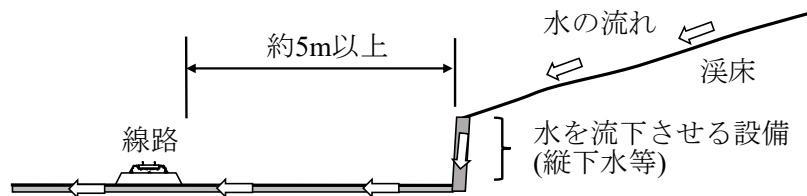


(a) 線路より溪床が高い場合の例 (その 1)

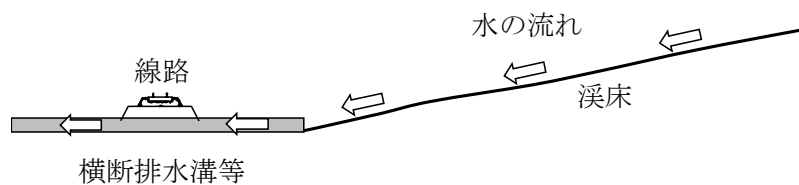


(b) 線路より溪床が高い場合の例 (その 2)

図-4.15 線路と溪床との高さ関係 (線路より溪床が高い場合)

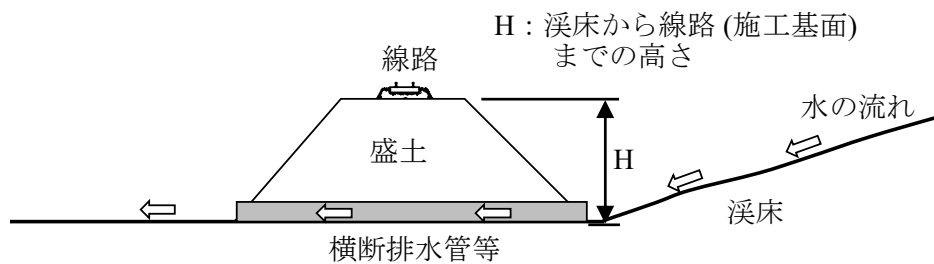


(a) 線路と溪床が概ね同じ高さの場合の例 (その 1)

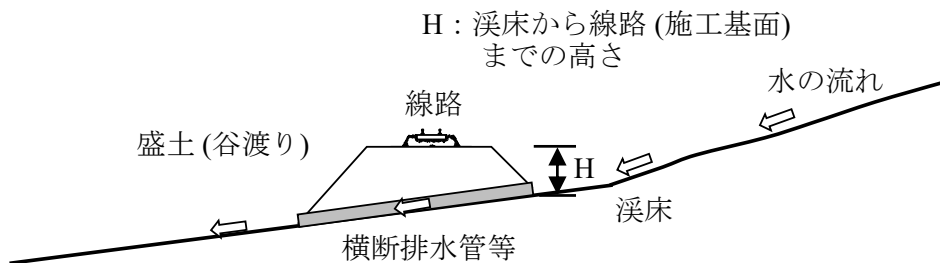


(b) 線路と溪床が概ね同じ高さの場合の例 (その 2)

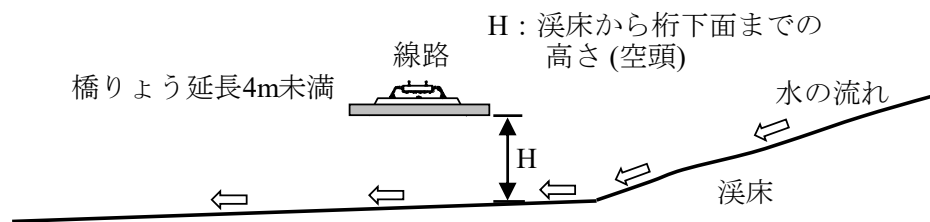
図-4.16 線路と溪床との高さ関係 (線路と溪床が概ね同じ高さの場合)



(a) 線路より溪床が低い場合 (盛土) の例 (その 1)



(b) 線路より溪床が低い場合 (盛土) の例 (その 2)



(c) 線路より溪床が低い場合 (橋りょう) の例

図-4.17 線路と溪床との高さ関係および高低差 (線路より溪床が低い場合)

(2) 線路上流側平坦地の線路直角方向長さ

線路上流側平坦地の線路直角方向長さの概要を図-4.18 に、現地における例を図-4.19 に示す。なお、ここでいう平坦地とは、溪床勾配が概ね0度となる箇所をいう。

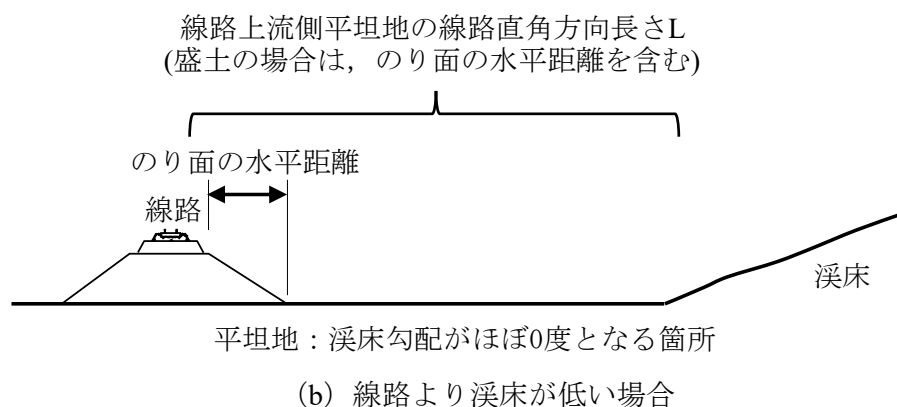
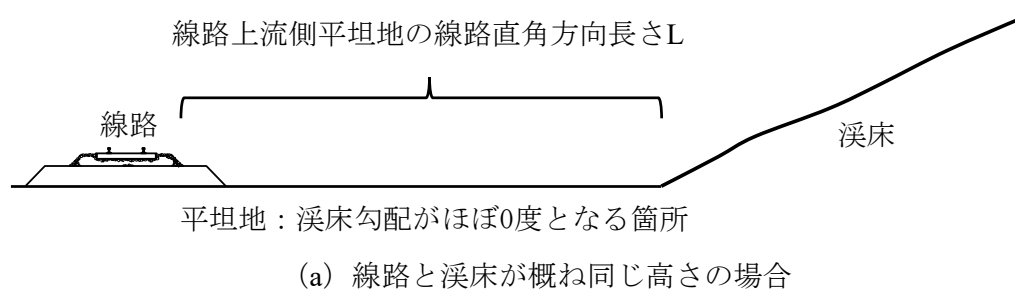


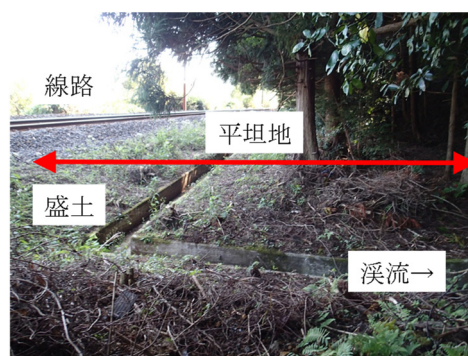
図-4.18 線路上流側平坦地の線路直角方向長さ



(a) 平坦地の例 (その 1)



(b) 平坦地の例 (その 2)



(c) 平坦地の例 (その 3)



(d) 平坦地の例 (その 4)

図-4.19 線路上流側平坦地の線路直角方向長さの例

図-4.20, 図-4.21 に, 一次解析に用いた災害溪流 52 箇所における線路と溪床との高低差および線路上流側平坦地の線路直角方向長さの頻度分布を示す. また, 表-4.2 に, これらのデータの平均値と標準偏差等を示す. 線路を基準とした場合の線路と溪床との高低差の平均値は約 0.67m, 標準偏差は約 2.77m である. また, 線路上流側平坦地の線路直角方向長さの平均値は約 0.67m, 標準偏差は約 3.14m である. 線路と溪床との高低差については, 平均値-1 $\sigma$  の値である-2.10m 以上において約 94%の災害が発生しており, -5.00m 以上において約 98%の災害が発生している. なお, 災害溪流 52 箇所のなかには, 線路と溪床との高低差が 1~4m の箇所はなかった. 高低差が 5m の箇所の多くは, 河川沿いにある急勾配の溪流を切土した箇所や流域のうち土砂等が流下すると推定される区間にトンネル坑口が存在する箇所であった.

線路上流側平坦地の線路直角方向長さの最大値は約 20m である. なお, 線路上流側平坦地の線路直角方向長さについては, 3.3.1 の一次解析 (第一回) の結果 (表-3.6) において, その延長が 10m 以上あれば, 土砂流入は発生しにくい傾向にあることを確

認したが、図-4.21 に示すように、災害溪流における最大値が約 20m であることから、ここでは、安全側である 20m をしきい値として採用した。

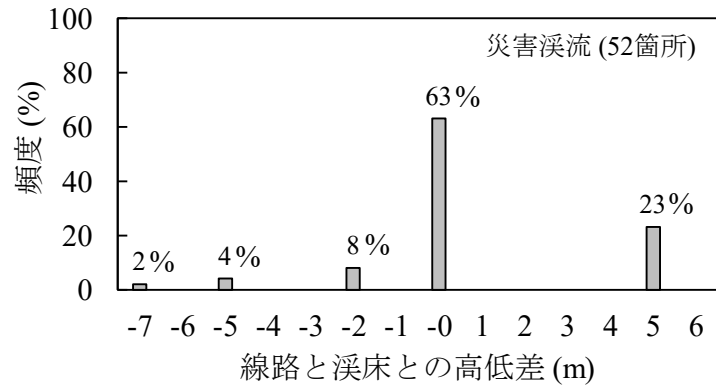


図-4.20 線路と溪床との高低差の頻度分布  
(線路を基準とした溪床高さ)

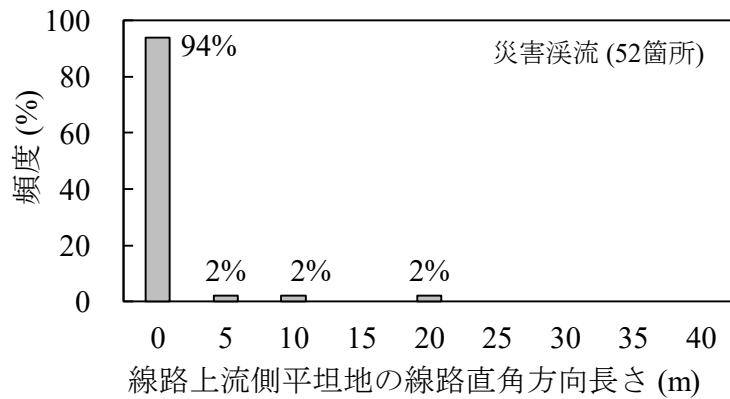


図-4.21 線路上流側平坦地の線路直角方向長さの頻度分布

表-4.2 線路と溪床との高低差および線路上流側平坦地の線路直角方向長さの  
平均値等

	溪流の 種別	平均値	標準偏差	平均値-1 $\sigma$	平均値+1 $\sigma$
線路と溪床との高低差 (m) (線路を基準とした溪床高さ)	災害溪流	0.67	2.77	-2.10	3.44
線路上流側平坦地の線路直角 方向長さ (m)	災害溪流	0.67	3.14	-2.47	3.81

### (3) 防護設備の対策効果

鉄道沿線の溪流に設置される防護設備の多くは待ち受け対策である。その代表的なものとして、図-4.22 に示すような砂防えん堤や土砂止擁壁がある。



(a) 砂防えん堤



(b) 土砂止擁壁



(c) 土砂止擁壁（土砂止柵あり）

図-4.22 鉄道沿線の溪流における代表的な防護設備（待ち受け対策）

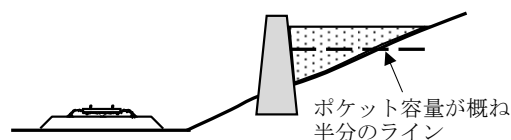
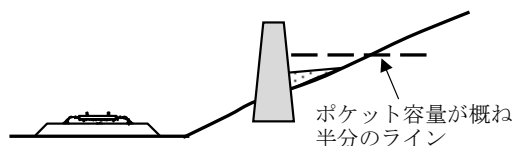


表-4.3 に、防護設備の対策効果の目安を示す。また、図-4.23 に、それらの例を示す。防護設備の対策効果については、待ち受け対策である砂防えん堤や土砂止擁壁等のポケットの残容量を確認して、その効果を判断する。具体的には、ポケット容量が概ね半分以上残っている場合には、対策効果があると判断し、一方でポケット容量が概ね半分未満しか残っていない場合には、対策効果はないと判断する。ただし、防護設備より上流側の溪流の荒廃状態または防護設備が施工されてからの土砂等の堆積速度等も勘案しながら対策効果を判断する必要がある。

なお、ここでは、土砂等がポケットに堆積することによる溪流の侵食防止効果および土砂等の流下速度の低減効果は考えないものとする。

表-4.3 防護設備の対策効果の目安

対策工の有無	ポケット残容量	効果
対策工なし	—	なし
対策工あり (待ち受け対策)	概ね半分未満	なし
	概ね半分以上	あり



(a) 対策効果あり  
(ポケット残容量が半分以上)

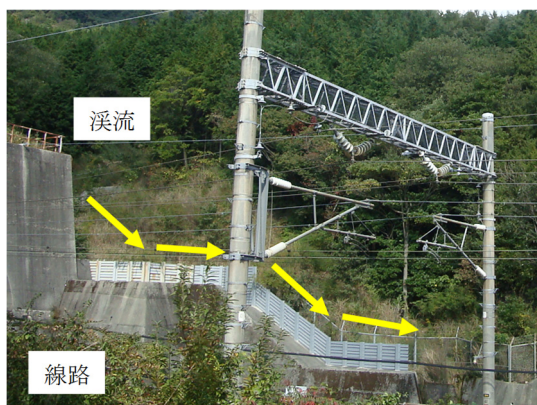


(b) 対策効果なし  
(ポケット残容量なし)

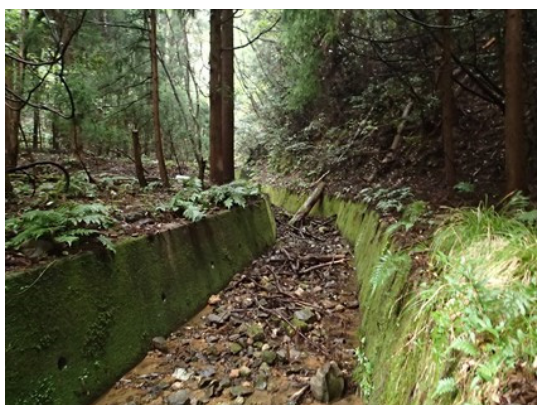
図-4.23 防護設備の対策効果の例



なお，図-4.24 に示すような待ち受け対策以外の導流柵，導流水路，沈砂池等の構造物に対しても機能を確認する必要がある．



(a) 導流柵



(b) 導流水路



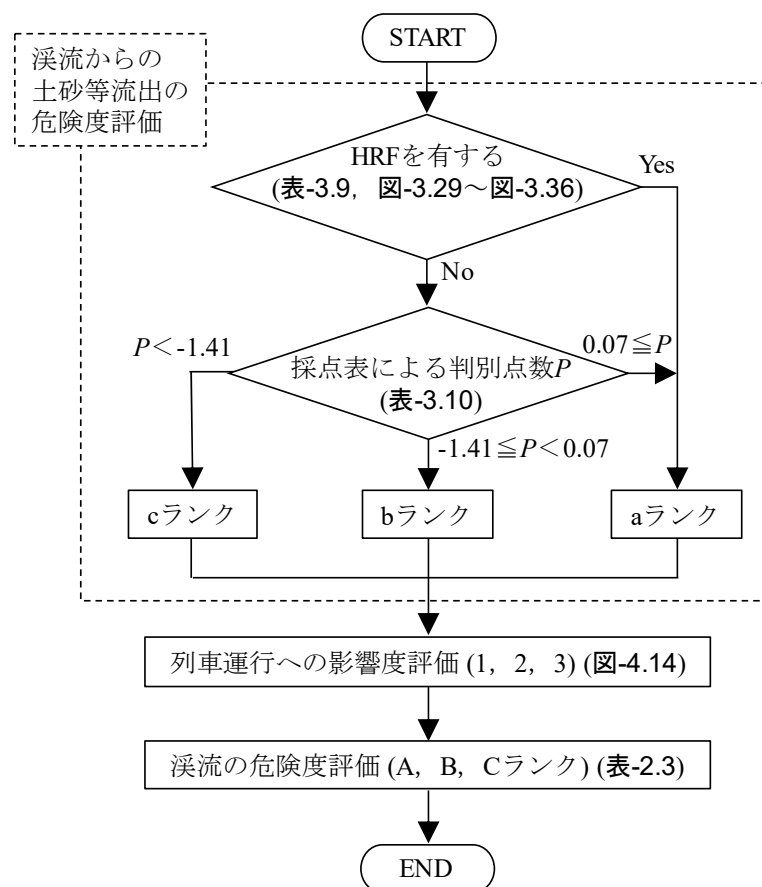
(c) 沈砂池

図-4.24 溪流付近に設置されている構造物の例

#### 4.3.4 カルテ範囲における調査のための危険度評価手法

4.3.2 では、溪流からの土砂等流出の危険度評価について、4.3.3 では、列車運行への影響度評価について述べた。ここでは、これらの評価を用いて、溪流の危険度を総合的に評価する手法について提案する。図-4.25 に、カルテ範囲における溪流の危険度評価の流れを示す。まず、3.3.3 の表-3.9 や図-3.29～図-3.36 に示した HRF を有する溪流であるかを判断し、HRF を有する溪流であれば a ランクに区分する。次に、HRF を有しない溪流を 3.3.3 の表-3.10 の採点表を用いて a, b, c ランクに区分する。この溪流からの土砂等流出の危険度と、図-4.14 で示した列車運行への影響度から、2.2.1 の表-2.3 に示す判定表を用いて溪流の危険度を総合的に評価する。

なお、AA (aa) ランクは、列車の運行を直ちに中止する必要がある等、非常に危険度の高い状態がある場合の評価であり、S (s) ランクは、集水地形である溪流において評価されることは、ほとんどないと考えられることから、溪流の危険度評価フローによる評価対象とはしない。



※AA(aa) , S(s)ランクは別途評価する

図-4.25 溪流の危険度評価の流れ（カルテ範囲）

#### 4.3.5 溪流の危険度評価手法の適用性の検証

(1) 斜面調査の専門技術者の評価との比較による検証

4.3.4 で提案した溪流の危険度評価手法を、危険度評価手法を作成するために分析対象とした溪流とは異なる溪流に適用し、適用性の検証を試みた。検証の対象箇所数は、JR 西日本管内の 19 箇所である。検証は、本論文で提案した危険度評価手法を用いた評価と、斜面調査の専門技術者が、危険度評価手法を用いずに定性的に判断した評価を比較することで行った。溪流の調査には、複数人の斜面調査の専門技術者が参加し、各専門技術者の技術的な見解を総合的に判断した上で、評価を決定した。

表-4.4 に、本論文で提案した危険度評価手法を用いた評価と、斜面調査の専門技術者による評価を比較した結果を示す。溪流からの土砂等流出の危険度評価について、危険度評価手法と斜面調査の専門技術者による評価結果を比較したところ、評価が一致した割合は約 89%と比較的高い。一致しなかった評価については、危険度評価手法の方が危険度を高く評価する、安全側の評価である。列車運行への影響度評価について、危険度評価手法と斜面調査の専門技術者による評価結果を比較したところ、一致した割合は約 89%と比較的高い。一致しなかった評価については、危険度評価手法の方が列車運行への影響度を大きく評価する、安全側の評価である。

溪流の危険度評価について、危険度評価手法と斜面調査の専門技術者による評価結果を比較したところ、一致した割合は約 95%と比較的高い。一致しなかった評価については、危険度評価手法の方が危険度を高く評価する、安全側の評価である。なお、列車運行への影響度評価が一致しなかった No.11 の溪流と、溪流からの土砂等流出の危険度評価が一致しなかった No.17 の溪流については、2.2.1 の表-2.3 の組み合わせによって、結果的に、溪流の危険度評価が一致したともいえる。そこで、これらの溪流の危険度評価は一致しなかったものと仮定した場合についても整合性の確認を行った。その結果、溪流の危険度評価が一致した割合は約 84%であり、この場合においても一致した割合が比較的高いことがわかった。

以上の検証結果から、本論文で提案した溪流の危険度評価手法を用いた評価は、斜面調査の専門技術者による評価とほぼ同等の精度を有し、やや安全側の評価になることが確認された。また、溪流の危険度は現地における簡易な調査と採点表等の活用によって効率的に評価できるため、多くの時間と労力を要しないことも確認できた。すなわち、必ずしも斜面調査を専門とはしないものの、鉄道沿線の土工等設備を検査する能力をもつ現場技術者であれば、本論文で提案した溪流の危険度評価手法を用いることで、多くの時間や労力を要せずに、斜面調査の専門技術者と同等の精度で溪流の危険度を評価できることがわかった。

表-4.4 本論文による危険度評価手法を用いた評価と斜面調査の専門技術者による評価との比較

検証対象 渓流No	本論文による危険度評価手法を用いた評価				斜面調査の専門技術者による評価				評価の比較			
	渓流からの土砂 等流出の危険度 評価	列車運行への 影響度評価	渓流の危険度 評価	渓流からの土砂 等流出の危険度 評価	列車運行への 影響度評価	渓流の危険度 評価	渓流からの土砂 等流出の危険度 評価	列車運行への 影響度評価	渓流からの土砂等 流出の危険度評価	列車運行への 影響度評価	渓流の危険度評価	渓流からの土砂等 流出の危険度評価
1	b	1	B	b	1	B			○		○	
2	b	1	B	b	1	B			○		○	
3	a (HRF)	1	A	a	1	A			○		○	
4	a	1	A	a	1	A			○		○	
5	c	1	C	c	1	C			○		○	
6	b	1	B	b	1	B			○		○	
7	a	1	A	a	1	A			○		○	
8	c	3	C	c	3	C			○		○	
9	a (HRF)	1	A	a	1	A			○		○	
10	b	1	B	b	1	B			○		○	
11	c	2	C	c	3	C			○	×	△	
12	b	1	B	c	2	C			×	×	×	
13	a (HRF)	1	A	a	1	A			○		○	
14	a (HRF)	2	B	a	2	B			○		○	
15	a	1	A	a	1	A			○		○	
16	b	3	C	b	3	C			○		○	
17	a	2	B	b	2	B			×		△	
18	a	2	B	a	2	B			○		○	
19	b	1	B	b	1	B			○		○	
一致した割合										89% (17/19)	○+△の割合:95% (18/19) ○の割合:84% (16/19)	

## (2) 土砂流入の発生・非発生に着目した検証

平成 30 年 7 月豪雨により，JR 西日本管内では，京都府から山口県までの複数の路線において，多くの土砂流入が発生した．これらの土砂流入をもたらした溪流のなかには，平成 30 年 7 月豪雨が発生する前に，本論文で提案した危険度評価手法による評価が行われていた溪流が 82 箇所あった．そこで，この 82 箇所を対象として，危険度評価手法による評価結果と平成 30 年 7 月豪雨による土砂流入の発生・非発生を比較することにより，危険度評価手法の精度を検証した．

表-4.5 に，検証結果を示す．82 箇所の溪流のうち，土砂流入をもたらした溪流は 13 箇所であり，全体の約 16%を占める．そのうち，A ランクと評価されていた溪流は 11 箇所，B ランクと評価されていた溪流は 2 箇所であり，土砂流入をもたらした溪流の多くは A ランクと評価されていた．なお，B ランクと評価されていた溪流から土砂流入が発生したことについては，危険側の評価との見方もある．しかしながら，この 2 箇所の溪流付近では，最も近くにあったアメダスで，最大 1 時間雨量が 35mm/h 以上，最大 24 時間連続雨量が 240mm 以上の豪雨が観測されていることから，非常に強い降雨が土砂流入の主たる原因であると考えると，一概に危険側の評価であるとはいえない．なお，C ランクと評価されていた溪流からの土砂流入はなかった．一方，A ランクと評価されていた溪流で災害が発生していない溪流もあるが，これは安全側の評価である．

上述したように，土砂流入をもたらした溪流の多くは，本論文で提案した危険度評価手法によって危険度が高い A ランクと評価された溪流であり，その他に危険側に評価された溪流はないことから，適切な評価がなされていたといえる．

表-4.5 検証結果（平成 30 年 7 月豪雨による土砂流入の発生・非発生に着目した検証）

		平成30年7月豪雨による土砂流入の発生・非発生		
		発生	非発生	合計
危険度評価手法による評価結果 (平成30年7月豪雨発生前の調査結果)	Aランク	11 (約13%)	26 (約32%)	37 (約45%)
	Bランク	2 (約3%)	34 (約41%)	36 (約44%)
	Cランク	0 (0%)	9 (約11%)	9 (約11%)
	合計	13 (約16%)	69 (約84%)	82

単位：箇所数 ( ) 内の数字は全数82箇所に対する割合

#### 4.4 数値標高モデルによるマクロな危険溪流抽出手法

##### 4.4.1 溪流上流域の危険度評価の必要性

4.3 では、カルテ範囲における溪流の危険度評価手法について述べた。土砂流入を防止するためには、この範囲における危険度評価が有効であると考ええる。一方、溪流のなかには、図-4.26 に示すように、カルテ範囲の危険度は低い状態であっても、上流域の危険度は高い状態である溪流も存在する可能性がある。このような溪流では、上流域から流下してきた土砂等によって、カルテ範囲の危険度が徐々に高まり、それに伴って土砂流入が発生する危険度も高まる。そのため、上流域に高い危険度を有する溪流を抽出することも重要であるといえる。しかしながら、広域的に分布する上流域の状態を現地調査により確認することは、時間的、労力的な制約条件があるなかで困難であり、また、調査者の危険度判断能力や経験の差による評価結果のばらつきが生じる可能性がある。

そこで、ここでは、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度を、現地調査を伴わない簡便な手法によって評価できる手法を検討する。

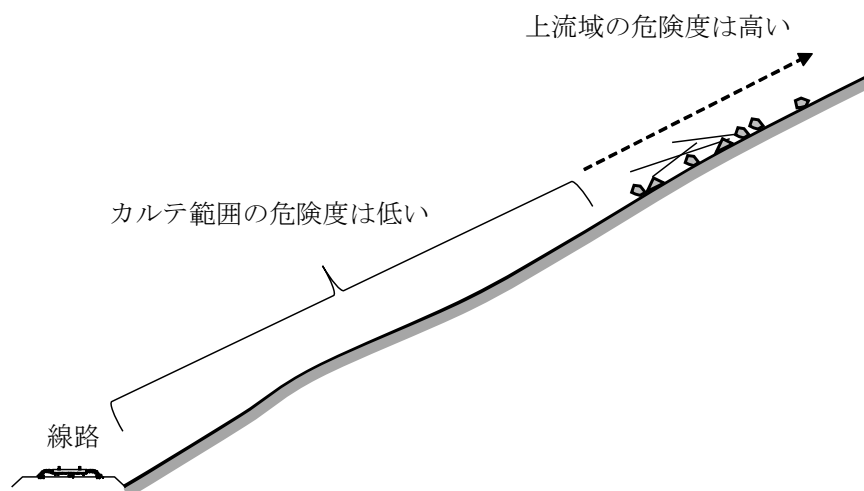


図-4.26 上流域の危険度が高い溪流のイメージ

##### 4.4.2 数値標高モデルの概要

近年、航空レーザ計測の技術の進展に伴って、地表面や地物に対する高密度な3次元座標データが得られるようになった<sup>1),2)</sup>。3次元座標データは、航空機から地上にむけてレーザパルス进行照射した際に、地表面や地物から反射してくるパルス（以下、反射パルスという）等を利用して取得されるものである。図-4.27 に、航空レーザ計測における反射パルスの種類を示す。レーザが発射された後、最初に反射するファーストパルスは、植生や構造物等、すべての地物をとらえる。一方、最後に反射するラストパルスは、地表面に到達している可能性が高い反射パルスである。

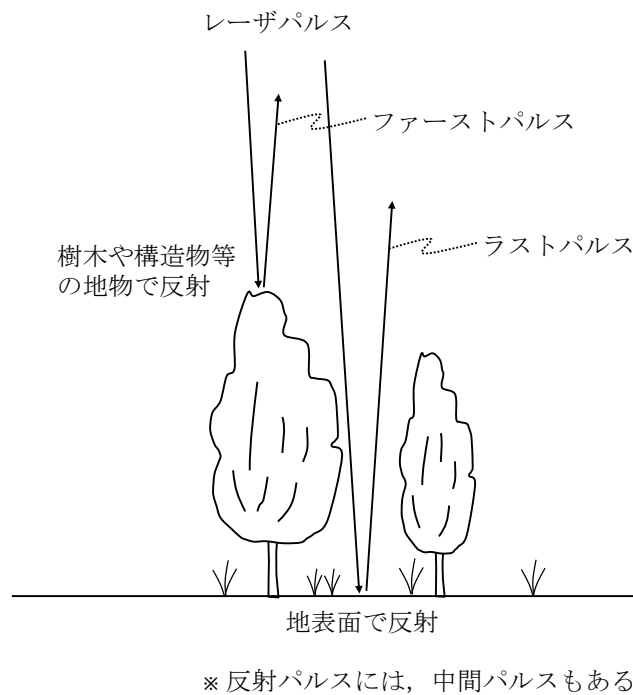


図-4.27 反射パルスの概要（文献 2）を一部修正・加筆）

航空レーザ計測で取得された 3 次元座標データは，図-4.28 に示すように，ランダムな点群データとなっているため，補間処理がなされて格子状の標高データであるメッシュデータに変換される。

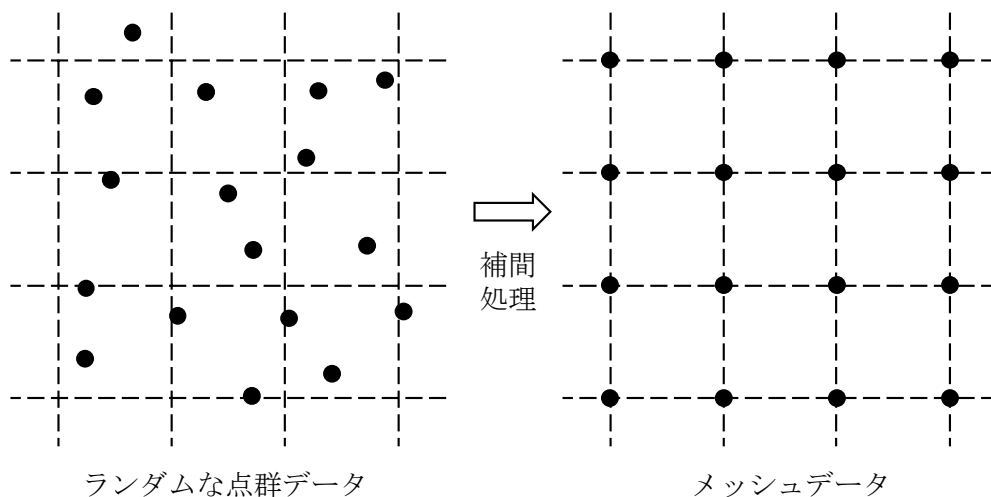


図-4.28 メッシュデータの作成（文献 2）を一部修正・加筆）

それらのメッシュデータのうち、主にファーストパルスを用いて作成される地表面と  
その上に存在する植生や構造物等の全ての地物を含むメッシュデータは、数値表層モデル  
(Digital Surface Model) (以下、DSM という) と呼ばれる。また、このメッシュデー  
タから、全ての地物を取り除いた地表面のみからなるメッシュデータは、数値標高モデ  
ル (Digital Elevation Model) (以下、DEM という) と呼ばれる。

本章では、主に DEM を利用して、広域的に分布する上流域における溪流からの土砂  
等流出の危険度を、効率的かつ効果的に評価する手法について提案する。なお、ここ  
では、計測点密度が 10 点/m<sup>2</sup> 以上および 20 点/m<sup>2</sup> 以上の航空レーザ計測データから作成  
した 0.5m 格子の DEM を利用する。

近年、DEM を使用して、視覚的に地形を把握しやすい、様々な立体地図 (以下、数  
値立体地図という) が作成されるようになった。図-4.29 に、数値立体地図の一例を示  
す。図-4.29 に示すように、数値立体地図を用いることにより、溪流の存在や斜面崩壊  
箇所等を判読により確認することができる。このように、数値立体地図は、従来の地形  
図と比較して、より詳細に地形情報等を取得できるものである。しかしながら、判読に  
は専門的な知識や技術が必要であり、個々の技術者によって判読結果が異なる場合もあ  
る。そのため、ここでは、判読に極力依存せず、DEM の定量データを利用して、溪流  
からの土砂等流出の危険度を評価できる手法の作成を目指した。具体的には、3.3.3 の  
表-3.10 の採点表に基づいて、DEM の定量データ等を利用して危険度を評価できる採点  
表 (以下、DEM-採点表という) を作成した。

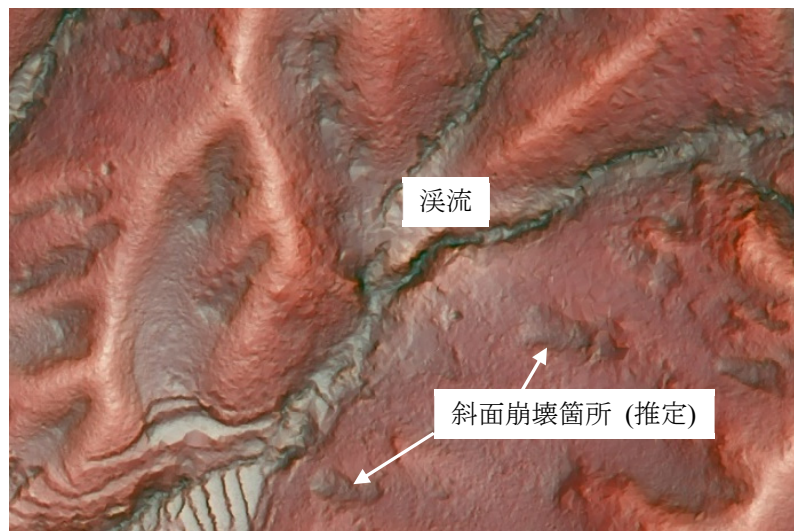


図-4.29 0.5m 格子の DEM による数値立体地図の例



#### 4.4.3 既往の研究

従来、地形の把握には、空中写真から作成した地形図が利用されることが一般的であった。しかし、近年では、航空レーザ計測から得られる DEM により、高精度に地形を把握することが可能となった。1990 年代以降、国土地理院より、日本全域の「数値地図 250m メッシュ（標高）」、「数値地図 50m メッシュ（標高）」が出版され、DEM を利用した地形解析とその応用に関する研究が行われるようになった<sup>3)</sup>。また、航空機やヘリコプターを用いた航空レーザ計測による DEM の取得技術も進んでおり、最近では無人飛行機を活用した事例<sup>4)</sup>も報告されている。

これまで、斜面崩壊や落石等の各種災害を防止することを目的として、DEM を利用した多くの研究がなされてきた。沖村ら<sup>5),6)</sup>は、DEM を用いて斜面における表層崩壊の危険度を予測する方法を提案した。布川ら<sup>7),8)</sup>は、降雨時において鉄道沿線で発生しやすい斜面表層部の崩壊に対する安定性を評価するために、DEM を用いて解析モデルの構築を行った。藤本ら<sup>9)</sup>は、地形条件の空間分解能の違いが、表層崩壊の発生予測に与える影響を異なるメッシュサイズの DEM を用いて明らかにした。坂井ら<sup>10)</sup>は、DEM を用いて地形量を解析し、現地の実測値と比較すること等により表層土厚を推定する方法を提案した。また、浦越ら<sup>11)</sup>は、DEM による地形特性値から重回帰モデルを作成することにより、表層土厚を推定する方法を提案した。長谷川、太田<sup>12)</sup>は、DEM を用いて斜面崩壊が懸念される箇所と落石の発生源となる露岩を抽出する方法を提案した。宮下ら<sup>13)</sup>は、高密度航空レーザデータを使用して落石発生源を抽出する方法を提案した。深田ら<sup>14)</sup>は、地形図と DEM を利用して鉄道沿線における落石リスクマップを作成した。その他にも、DEM は、荒廃地の推移<sup>15)</sup>、地すべり地形の発達形態のプロセスの推定<sup>16)</sup>、微地形判読<sup>17)</sup>、崩壊箇所履歴の抽出<sup>18)</sup>、地形変化と流出土砂量の把握<sup>19)</sup>、等の様々な土木分野で活用され、その有効性が示されてきた。

また、近年、DEM を利用した土石流に関する研究も報告されている。中山、隅元<sup>20)</sup>は、DEM を用いて流域単位で地形量を計測する手法を示した。里深ら<sup>21),22)</sup>は、DEM を用いて行った天然ダム決壊時の洪水予測等に関する研究成果を報告した。三浦、日朝<sup>23)</sup>は、DEM を用いた土石流の氾濫域の予測手法を提案した。中谷、里深<sup>24)</sup>は、DEM の解像度が土石流の到達範囲におよぼす影響について検討した。高山ら<sup>25)</sup>は、DEM による溪床堆積物の判読や地形量の算出によって、溪流の危険度を評価する方法を提案した。

布川ら<sup>26)</sup>は、DEM を用いた解析モデル<sup>7),8)</sup>を用いて、土石流の発生危険度を評価する手法を提案した。林<sup>27)</sup>らは、土石流の発生危険度をシミュレーションにより評価するために、DEM を利用した。また、航空写真と DEM を利用して、斜面表層土厚や樹木の根系による土の粘着力増分を推定し、降雨時における流域斜面の崩壊危険度を予測する手

法<sup>28)</sup>も提案されている。

なお、土石流の発生に直接関係する重要な素因の一つに、溪床堆積物の堆積量がある。従来から、現地調査や簡便法等の利用により、この堆積量の推定が行われてきたが、課題<sup>29)</sup>も多く、これまでDEMを用いた推定方法に関する研究が進められてきた。例えば、木下ら<sup>30),31)</sup>は、弾性波探査による溪床堆積物の深さと溪床堆積幅との間に相関傾向がみられることを示し、溪床堆積幅から溪床堆積深を推定することが可能であるとした。

以上のように、DEMを利用した土石流に関する様々な研究が行われ、その有効性が示されている。これらの研究には、特定の溪流を詳細に分析することに適しているものが多く、膨大な数の溪流を一律に評価することを目的としたものは少ない。

そこで、本研究では、鉄道沿線にある膨大な数の溪流の危険度を効率的かつ効果的に評価できる手法の作成を目指した。

#### 4.4.4 DEMを用いた評価手法の概要

検討対象とした溪流は、JR西日本管内に存在する40箇所の溪流である。これらの溪流は、航空レーザ計測が行われた線区において、斜面調査の専門技術者が、溪流からの土砂等流出の危険度評価を実施した箇所から選定したものである。

DEMを用いた溪流からの土砂等流出の危険度評価の検討フローを図-4.30に示す。ここでは、まず、現地調査等のデータと同等の精度のデータが、DEMから取得可能であるかを試みた。次に、3.3.3で提案した表-3.10の採点表に基づき、DEM-採点表を作成し、DEM-採点表の有効性を確認するために、採点表とDEM-採点表を用いた溪流からの土砂等流出の危険度評価を比較した。

それらの結果を踏まえた上で、DEM-採点表を用いて、上流域に危険度の高い状態を有する溪流を抽出することを試みた。また、合わせて全流域を対象とした評価について試行した。

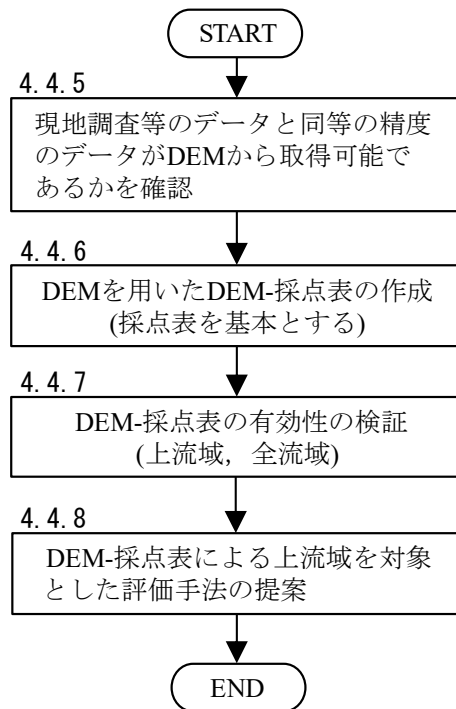


図-4.30 DEM を用いた溪流からの土砂等流出の危険度評価の検討フロー

表-3.10 採点表 (3.3.3 で示した二次解析(第四回)の結果の再掲)

条件		カテゴリー 分類	データ数	点数	点数の範囲 (最大値と最小値 の差分)	順位
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	$\theta_r < 10^\circ$	15	-0.47	0.95	1
		$10^\circ \leq \theta_r < 25^\circ$	41	-0.09		
		$25^\circ \leq \theta_r$	22	0.48		
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	$\theta_s < 40^\circ$	30	-0.35	0.57	2
		$40^\circ \leq \theta_s$	48	0.22		
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	$S_b < 0.05$ $0.05 \leq S_b$	54 24	-0.12 0.27	0.39	7
環境	溪床の植生量	火成岩	50	0.10	0.40	6
		堆積岩 変成岩	20 8	-0.12 -0.30		
荒廃	溪床の堆積物の平均厚さ (m)	少ない, なし	47	0.20	0.51	4
		多い, 普通	31	-0.31		
	溪床の平均侵食断面面積 (m <sup>2</sup> )	$H_s < 1.0$	50	-0.05	0.14	8
		$1.0 \leq H_s$	28	0.09		
	溪床の平均侵食断面面積 (m <sup>2</sup> )	$S_r < 0.25$	26	-0.36	0.54	3
		$0.25 \leq S_r$	52	0.18		
荒廃	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	$S_s < 100$	42	-0.19	0.41	5
		$100 \leq S_s$	36	0.22		

#### 4.4.5 現地調査と DEM から取得したデータの比較

図-4.31 には、線路から流路延長で 100m の位置を基準点にして、線路と平行に引いた線を示している。この線と線路との間の流域の範囲を、以下では、「線路上流 100m 範囲」という。また、この線よりも上流の流域の範囲が上流域となる。

DEM を用いた溪流からの土砂等流出の危険度評価手法を作成するにあたり、線路上流 100m 範囲において、現地調査等と DEM から取得したデータを比較し、DEM から取得したデータを、現地調査等から取得したデータと同等に扱うことができるかを確認した。

ここでは、谷地形において、線路付近から尾根まで引いた線を「流路」という。また、流路の縦断方向に対して直角方向に水平片幅 2.5m までの範囲を「溪床付近」という。水平片幅の値は、40 箇所の溪流を対象として判読により抽出した溪床堆積物の分布範囲に基づき算出した、平均値+1 $\sigma$  の値 (2.6m) を参考に設定した。

なお、全流路延長が 100m 未満の溪流については、全流域を対象としてデータの比較を行った。

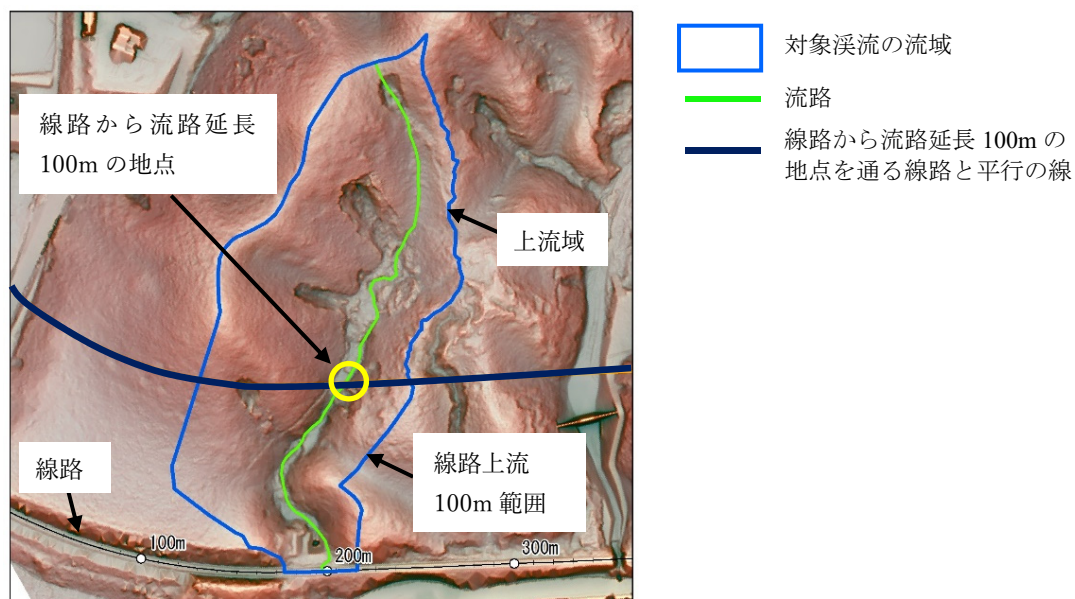


図-4.31 線路上流 100m 範囲と上流域のイメージ

以下に、採点表の 8 つの条件である「溪床の平均勾配」、「溪岸斜面の平均勾配」、「流域面積」、「地質」、「溪床の植生量」、「溪床堆積物の平均厚さ」、「溪床の平均侵食断面積」、「溪岸斜面の崩壊面積」における検討結果を示す。

# (1) 溪床の平均勾配

溪床の平均勾配は、図-4.32 に示すように、縦断方向に 10m 単位に区分された各流路区間の勾配の平均値とした。

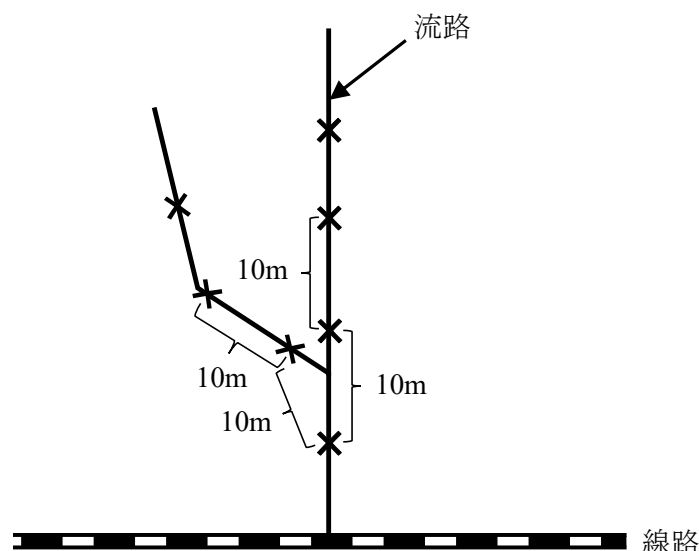


図-4.32 溪床の平均勾配のデータ

表-4.6 に、現地調査と DEM から取得した溪床の平均勾配のデータを、カテゴリごとに比較した結果を示す。表-4.6 に示すように、現地調査および DEM から取得したデータがともに、10 度以上 25 度未満であった箇所が、17 箇所 (42.5%) と最も多い。一方で、現地調査から取得したデータでは、溪床勾配が 10 度以上 25 度未満であるが、DEM から取得したデータでは、溪床勾配が 25 度以上または 10 度未満となっているものもある。このように、現地調査と DEM から取得したデータには、カテゴリが一致するものと、一致しないものがある。

表-4.7 には、現地調査と DEM から取得したデータのカテゴリが一致した割合（以下、一致率という）、一致率に、DEM から取得したデータのカテゴリが、現地調査から取得したデータのカテゴリよりも安全側となる割合を加えた割合（以下、適合率という）、および DEM から取得したデータのカテゴリが、現地調査から取得したデータのカテゴリよりも危険側となる割合（以下、不適合率という）を示す。表-4.7 に示すように、溪床の平均勾配については、一致率は 65.0% である。また、適合率は 75.0%、不適合率は 25.0% である。このように、一致率はやや低い、適合率は比較的高い。

以上の結果から、溪床の平均勾配については、DEM から取得したデータを、現地調査から取得したデータと同等に扱うことは可能であると考えられる。

表-4.6 データの比較結果（溪床の平均勾配）

		溪床の平均勾配 (DEMから取得したデータ)		
		25度以上	10度以上 25度未満	10度未満
溪床の平均勾配 (現地調査から取得 したデータ)	25度以上	6 (15.0%)	8 (20.0%)	1 (2.5%)
	10度以上 25度未満	2 (5.0%)	17 (42.5%)	1 (2.5%)
	10度未満	0 (0.0%)	2 (5.0%)	3 (7.5%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

表-4.7 データの比較結果の集計  
(溪床の平均勾配)

項目	箇所数
一致率	26 (65.0%)
適合率	30 (75.0%)
不適合率	10 (25.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

## (2) 溪岸斜面の平均勾配

溪岸斜面の平均勾配については、図-4.33 に示すように、流路から水平片幅 20m の範囲のうち、溪床付近を除いた範囲（水平幅 17.5m）の勾配の平均値とした。なお、水平片幅 20m の値は、現地において、調査者が溪床付近から溪岸斜面を見とやすことが可能な範囲をイメージして設定した。

表-4.8 に、現地調査と DEM から取得した溪岸斜面の平均勾配のデータを、カテゴリーごとに比較した結果を示す。表-4.8 に示すように、現地調査から取得したデータでは、40 度以上であるが、DEM から取得したデータでは、40 度未満である箇所が、20 箇所（50.0%）と多い。次いで、現地調査と DEM から取得したデータがともに、40 度未満

である箇所が、16箇所（40.0%）と比較的多い。表-4.9 に示すように、適合率は 50.0% と低い。これは、現地調査では、斜面調査の専門技術者が、専門的な知見や経験から、代表的な勾配を選定できるのに対して、DEM では、図-4.33 に示すように、流路の周辺の溪岸斜面の勾配を全て計測し、その平均値を算出しているためであると推察される。ただし、DEM から代表的な勾配を選定することは難しく、技術者の個人差なく DEM から同じ値の勾配を取得するためには、図-4.33 で示すような DEM からのデータ取得がよいと考える。

これらの理由も踏まえて、溪岸斜面の平均勾配については、適合率は低いものの、DEM から取得したデータを、現地調査から取得したデータと同等に扱うこととする。

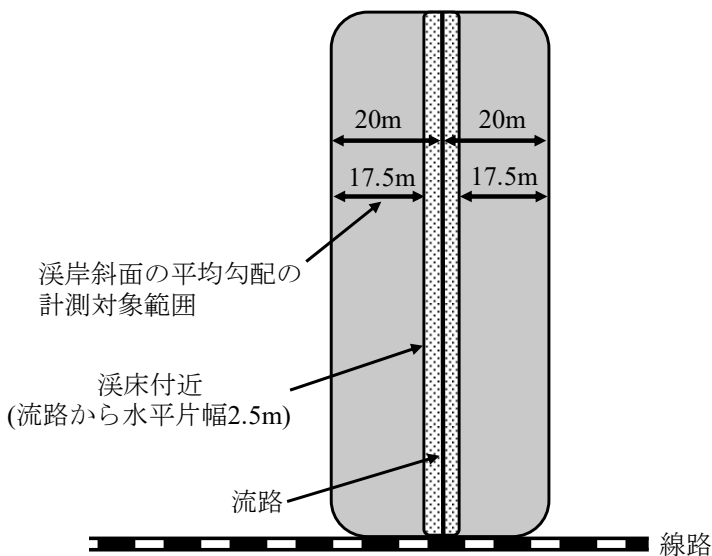


図-4.33 溪岸斜面の平均勾配のデータ

表-4.8 データの比較結果（溪岸斜面の平均勾配）

		溪岸斜面の平均勾配 (DEMから取得したデータ)	
		40度以上	40度未満
溪岸斜面の平均勾配 (現地調査から取得したデータ)	40度以上	3 (7.5%)	20 (50.0%)
	40度未満	1 (2.5%)	16 (40.0%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

表-4.9 データの比較結果の集計  
(溪岸斜面の平均勾配)

項目	箇所数
一致率	19 (47.5%)
適合率	20 (50.0%)
不適合率	20 (50.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

### (3) 流域面積

流域面積は、図-4.34 に示すように、流路を設定した流域の面積とした。ここで、流域の範囲は、数値立体地図から判読により抽出した。流域の範囲を数値立体地図から判読により抽出することは、比較的容易であり、技術者による個人差は少ないと考えられる。

表-4.10 に、1/25000 の地形図と DEM から取得した流域面積のデータを、カテゴリーごとに比較した結果を示す。1/25000 の地形図と DEM から取得したデータがともに、0.05km<sup>2</sup>未満である箇所が、36 箇所（90.0%）と最も多い。表-4.11 に示すように、一致率および適合率は 97.5%と高い。

このように、1/25000 の地形図と DEM から取得したデータはほぼ一致している。なお、0.5m 格子の DEM から取得したデータは、1/25000 の地形図から取得したデータよりも、詳細に流域面積を計測できると考えられる。

以上の結果から、流域面積については、DEM から取得したデータを、1/25000 の地形図から取得したデータと同等に扱うことは可能であると考ええる。

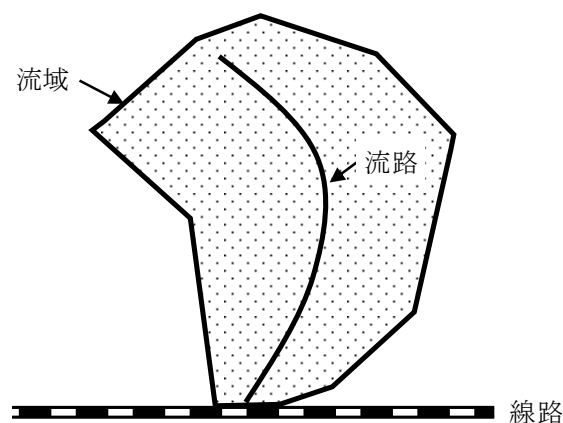


図-4.34 流域面積のデータ



表-4.10 データの比較結果（流域面積）

		流域面積 (DEMから取得したデータ)	
		0.05km <sup>2</sup> 以上	0.05km <sup>2</sup> 未満
流域面積 (1/25000地形図から取得した データ)	0.05km <sup>2</sup> 以上	3 (7.5%)	1 (2.5%)
	0.05km <sup>2</sup> 未満	0 (0.0%)	36 (90.0%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

表-4.11 データの比較結果の集計  
(流域面積)

項目	箇所数
一致率	39 (97.5%)
適合率	39 (97.5%)
不適合率	1 (2.5%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

#### (4) 地質

採点表の8つの条件のうち、地質については、DEMにより得られるデータではない。そのため、後述するDEMのデータを利用した溪流からの土砂等流出の危険度評価手法においては、3.2.2の表-3.3で示した主な岩石の分類を参考にして、地質を火成岩、堆積岩、変成岩の3つのカテゴリーに分類する。

#### (5) 溪床の植生量

ここでは、図-4.35に示すように、DSMとDEMの標高差を樹高と仮定し、植生量の確認に利用することを試みた。具体的には、樹高0mの箇所がある場合には、植生量は、採点表のカテゴリーの少ない・なしと同等に扱い、一方で、樹高0mの箇所がない場合には、植生量は、採点表のカテゴリーの多い・普通と同等に扱うことができるかを試みた。なお、植生量の計測範囲は、図-4.36に示すように、溪床付近とした。

表-4.12 に、現地調査と DEM から取得した植生量のデータを、カテゴリーごとに比較した結果を示す。表-4.12 に示すように、現地調査から取得したデータにおいては、植生量が少ない・なしであるが、DEM から取得したデータにおいては、植生量が多い・普通である箇所が、17 箇所 (42.5%) と最も多い。表-4.13 に示すように、適合率は 57.5% とやや低い。しかしながら、膨大な数の溪流の広域的な範囲の植生量を簡便に推定する手法として、この方法を用いることは有効であると考えられるため、ここでは、DEM から取得したデータを、現地調査から取得したデータと同等に扱うこととする。

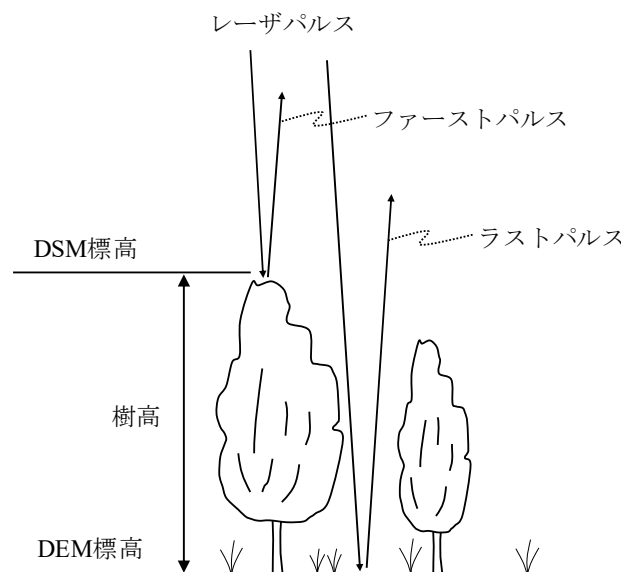


図-4.35 樹高の算出方法の概要

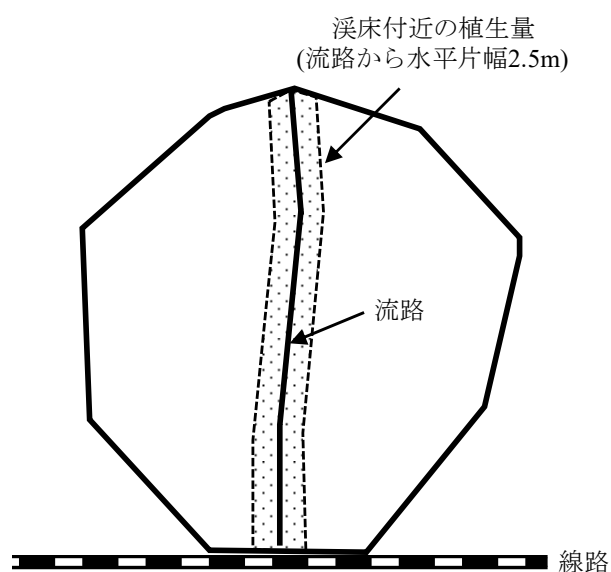


図-4.36 渓床の植生量のデータ

表-4.12 データの比較結果（溪床の植生量）

		溪床の植生量 (DEMから取得したデータ)	
		少ない・なし (樹高0mの箇所がある)	多い・普通 (樹高0mの箇所がない)
溪床の植生量 (現地調査から取得したデータ)	少ない・なし	9 (22.5%)	17 (42.5%)
	多い・普通	7 (17.5%)	7 (17.5%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

表-4.13 データの比較結果の集計  
(溪床の植生量)

項目	箇所数
一致率	16 (40.0%)
適合率	23 (57.5%)
不適合率	17 (42.5%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

#### (6) 溪床堆積物の平均厚さ

採点表における溪床堆積物の平均厚さについては、図-4.37 に示すように、DEM から取得した溪床付近における溪床堆積物の最大厚さを利用することを試みた。ここで、最大厚さとした理由は、DEM からの抽出が比較的容易であったためである。なお、最大厚さによる評価は、平均厚さによる評価よりも安全側の評価である。

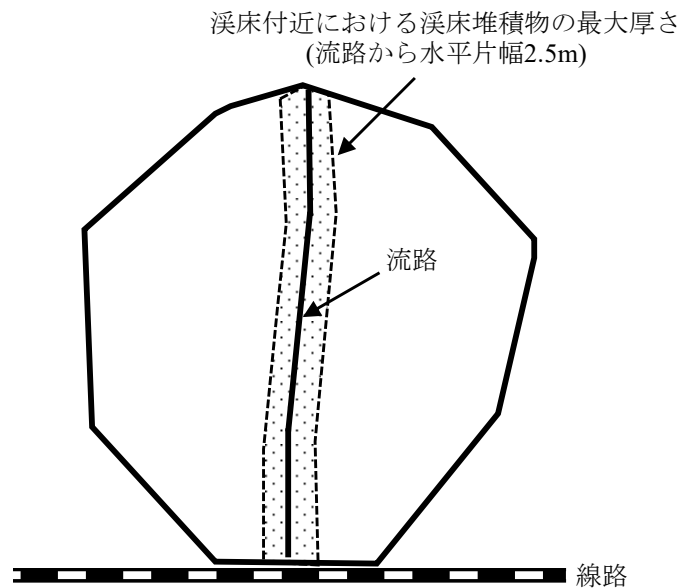


図-4.37 渓床堆積物の最大厚さのデータ

なお、地形学では、侵食が進んだ状態の仮想面を示す接谷面という概念がある。DEMを用いて算出した接谷面高度と現地形高度との差は、未侵食高との相関が高いとされている<sup>20)</sup>。そこで、ここでは、DEMから接谷面高度を算出し、現地形高度との差を求めることにより、渓床の未侵食高と考えられる渓床堆積物の最大厚さを推定した。

接谷面高度は、中山、隅元<sup>20)</sup>の方法で算出した。図-4.38に、接谷面高度の算出の概要を示す。すなわち、窓領域内の標高の平均値と着目点の標高を比較し、平均値の方が小さい場合に着目点に平均値を代入するという処理を、着目点を順番にスライドさせながら繰り返す。さらに、計算対象範囲のすべての点を着目点として算出し終えた新たな地形データを基に、同様の処理を複数回繰り返し、最終的な接谷面の標高データを算出した。なお、ここでは、繰り返し回数を50回とした。

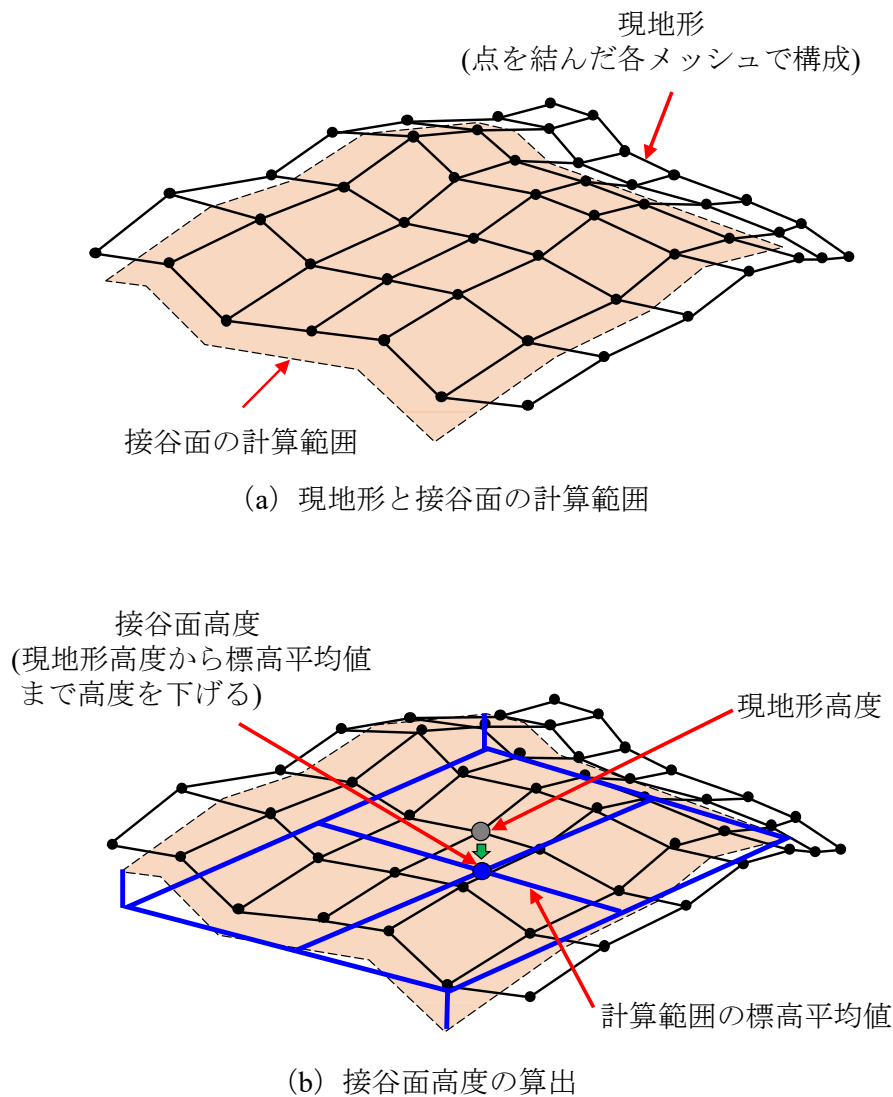


図-4.38 接谷面高度の算出方法の概念図 (文献 32)を一部修正・加筆)

ここで、接谷面を算出して溪床堆積物の厚さを推定した事例<sup>32)</sup>を示す。この事例では、計測点密度が 20 点/m<sup>2</sup> の航空レーザ計測データから作成した 0.5m 格子の DEM を用いている。図-4.39 に示す No.1～No.3 の横断位置における現地形高度と接谷面高度を図-4.40～図-4.42 に示す。図-4.40 に示す No.1 のように、溪床堆積物が凸型に堆積している場合、接谷面高度は現地形高度より小さくなり、両者の差が未侵食高、すなわち溪床堆積物の厚さと推定される。また、図-4.41 に示す No.2 のように、溪床に堆積した土砂の一部が流水によって侵食され、兩岸あるいは片岸に溪床堆積物が残存している場合、その部分の接谷面高度は小さくなるため、No.1 と同様に両者の差をとることにより溪床堆積物の厚さが推定される。一方、図-4.42 に示す No.3 のように、V 次谷の場合、溪床における両者の差はほとんどみられず、谷底に堆積する溪床堆積物の厚さの推定は難

しい。このように、溪床内あるいは両岸に明瞭に土砂が堆積している場合は、上記の方法で溪床堆積物の厚さを推定できる可能性があるが、V次谷における溪床堆積物の厚さの推定には課題がある。

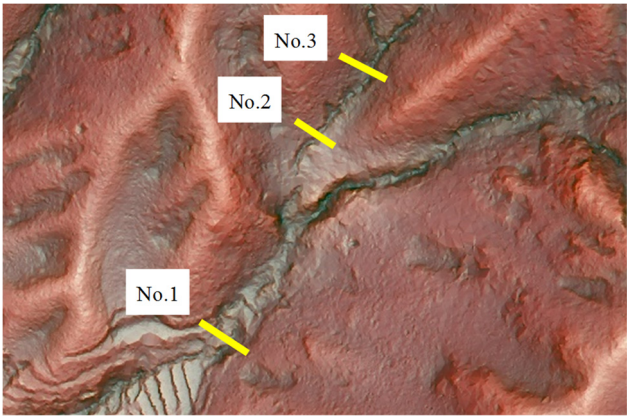


図-4.39 溪床堆積物の厚さを推定した断面位置

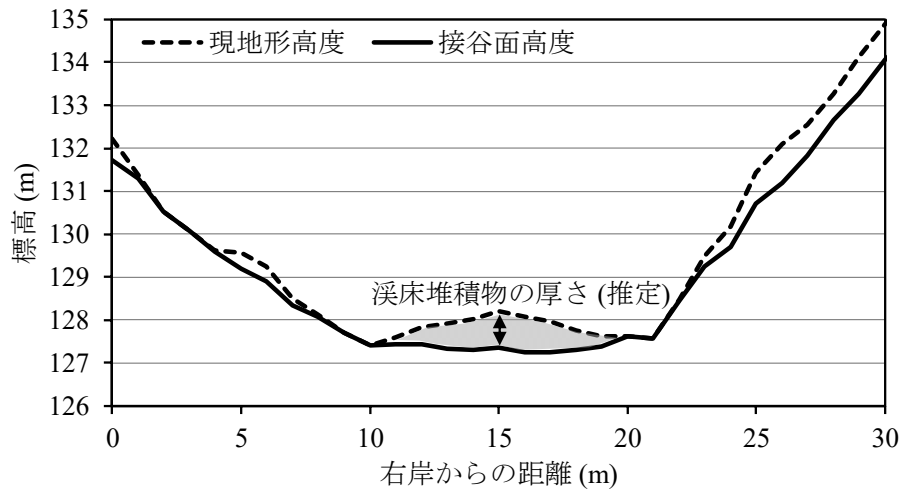


図-4.40 接谷面高度と現地地形高度の横断比較 (No.1)

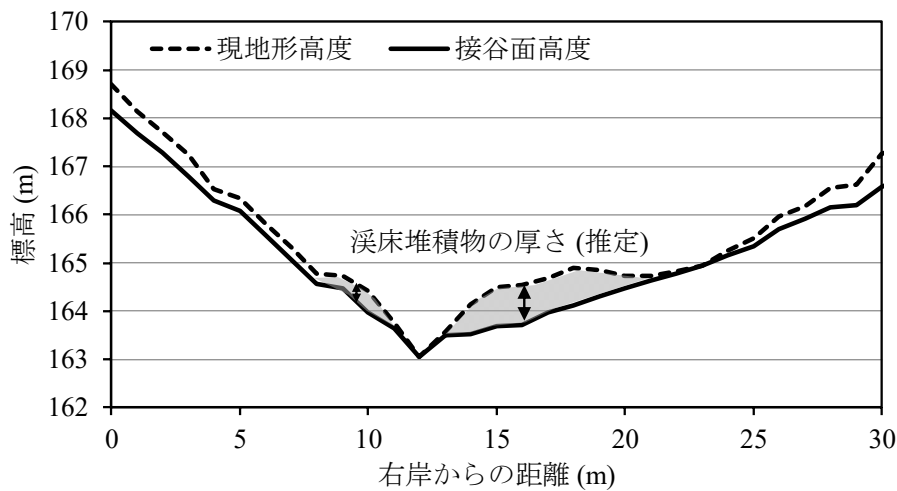


図-4.41 接谷面高度と現地地形高度の横断比較 (No.2)

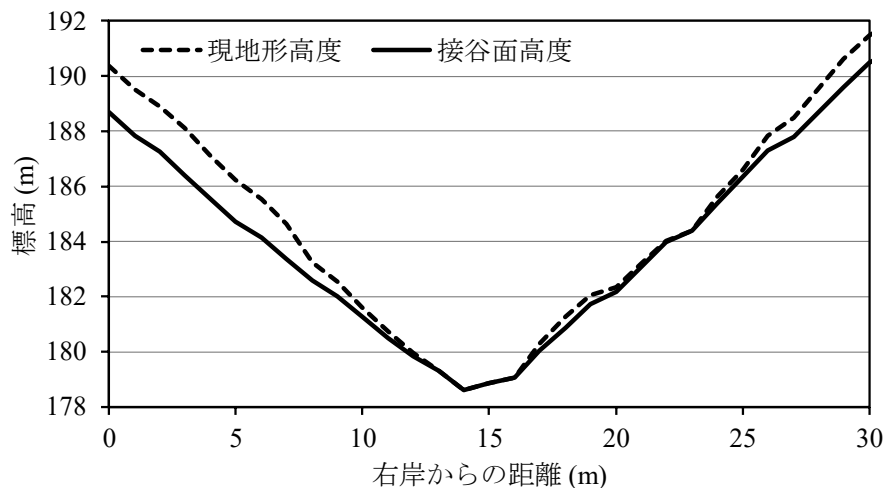


図-4.42 接谷面高度と現地地形高度の横断比較 (No.3)

表-4.14 に、現地調査から取得した渓床堆積物の平均厚さのデータと、DEM から取得した渓床堆積物の最大厚さのデータを、カテゴリーごとに比較した結果を示す。表-4.14 に示すように、現地調査から取得したデータにおいて、渓床堆積物の平均厚さが 1.0m 以上であり、DEM から取得したデータにおいて、渓床堆積物の最大厚さが 1.0m 以上であった箇所が、23 箇所 (57.5%) と最も多い。次いで、現地調査から取得したデータにおいては、渓床堆積物の平均厚さが 1.0m 未満であるが、DEM から取得したデータにおいては、渓床堆積物の最大厚さが 1.0m 以上である箇所が、14 箇所 (35.0%) と比較的多い。表-4.15 に示すように、一致率は 60.0%とやや低い、適合率は 95.0%と高い。

以上の結果から、DEM から取得した渓床堆積物の最大厚さのデータを、現地調査から取得した渓床堆積物の平均厚さのデータと同等に扱うことは可能であるとする。

た，膨大な数の溪流の広域的な範囲の溪床堆積物の厚さを簡便に推定する手法として，接谷面を用いることは有効であると考える．

表-4.14 データの比較結果

(現地調査：溪床堆積物の平均厚さ，DEM：溪床堆積物の最大厚さ)

		溪床堆積物の最大厚さ (DEMから取得したデータ)	
		1.0m以上	1.0m未満
溪床堆積物の平均厚さ (現地調査から取得したデータ)	1.0m以上	23 (57.5%)	2 (5.0%)
	1.0m未満	14 (35.0%)	1 (2.5%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

表-4.15 データの比較結果の集計

(現地調査：溪床堆積物の平均厚さ，  
DEM：溪床堆積物の最大厚さ)

項目	箇所数
一致率	24 (60.0%)
適合率	38 (95.0%)
不適合率	2 (5.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

#### (7) 溪床の平均侵食断面積

DEM を利用して，溪床の平均侵食断面積を算出することを試みたが，0.5m 格子のDEM では，採点表のしきい値である  $0.25\text{m}^2$  程度の侵食断面積を精度よく抽出することが困難であった．そこで，ここでは，図-4.43 に示すように，溪床付近におけるガリ侵食の有無を，数値立体地図を用いて判読で確認し，それらのデータを，溪床の平均侵食断面積と同等に扱うことができるかを確認した．なお，ガリ侵食の有無を数値立体地図から判読により確認することは，比較的容易であり，技術者による個人差は少ないと考えられる．



表-4.16 に、現地調査から取得した溪床の平均侵食断面積のデータと、数値立体地図から判読により確認した溪床のガリ侵食の有無のデータを、カテゴリーごとに比較した結果を示す。表-4.16 に示すように、現地調査から取得したデータにおいて、溪床の平均侵食断面積が  $0.25\text{m}^2$  以上であり、数値立体地図の判読により、溪床のガリ侵食があると確認された箇所が、23 箇所（57.5%）と最も多い。次いで、現地調査から取得したデータにおいては、溪床の平均侵食断面積が  $0.25\text{m}^2$  未満であるが、数値立体地図の判読により、溪床のガリ侵食があると確認された箇所が、15 箇所（37.5%）と比較的多い。表-4.17 に示すように、一致率は 62.5%とやや低い、適合率は 100.0%と高い。

以上の結果から、数値立体地図から判読で確認した溪床のガリ侵食の有無のデータを、現地調査から取得した溪床の平均侵食断面積のデータと同等に扱うことは可能であるとする。

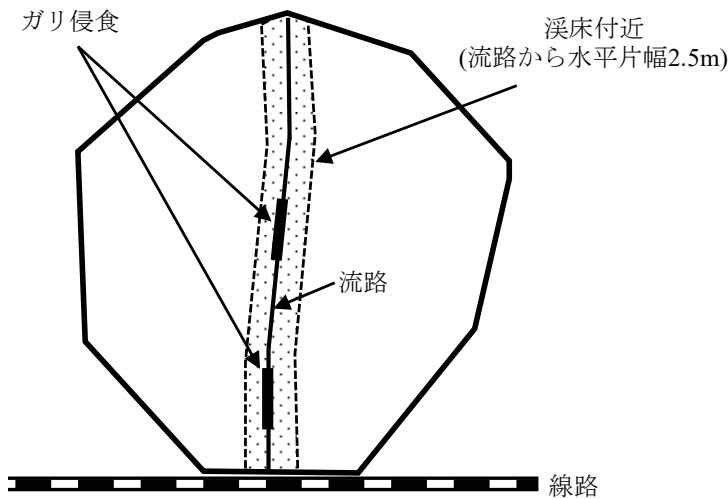


図-4.43 溪床付近におけるガリ侵食のデータ

表-4.16 データの比較結果

（現地調査：溪床の平均侵食断面積，数値立体地図：ガリ侵食の有無）

		溪床のガリ侵食の有無 (数値立体地図から判読により確認したデータ)	
		あり	なし
溪床の平均侵食断面積 (現地調査から取得したデータ)	$0.25\text{m}^2$ 以上	23 (57.5%)	0 (0.0%)
	$0.25\text{m}^2$ 未満	15 (37.5%)	2 (5.0%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

**表-4.17** データの比較結果の集計

(現地調査：溪床の平均侵食断面積，  
数値立体地図：ガリ侵食の有無)

項目	箇所数
一致率	25 (62.5%)
適合率	40 (100.0%)
不適合率	0 (0.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

#### (8) 溪岸斜面の崩壊面積

溪岸斜面の崩壊面積は，**図-4.44** に示すように，流路から水平片幅 20m の範囲に一部でも重なる崩壊箇所の面積の合計値とした．なお，水平片幅 20m の値は，溪岸斜面の平均勾配で述べたように，現地において，調査者が溪床から溪岸斜面を見とのおすことが可能な範囲をイメージして設定した．ここで，溪岸斜面の崩壊箇所は，数値立体地図から判読により抽出した．溪岸斜面の崩壊箇所を数値立体地図から判読により抽出することは，比較的容易であり，技術者による個人差は少ないと考えられる．

**表-4.18** に，現地調査と DEM から取得した溪岸斜面の崩壊面積のデータを，カテゴリーごとに比較した結果を示す．**表-4.18** に示すように，現地調査から取得したデータにおいては，溪岸斜面の崩壊面積が 100m<sup>2</sup> 未満であるが，DEM から取得したデータにおいては，溪岸斜面の崩壊面積が 100m<sup>2</sup> 以上である箇所が，23 箇所 (57.5%) と最も多い．次いで，現地調査と DEM から取得したデータがともに，100m<sup>2</sup> 以上である箇所が，10 箇所 (25.0%) と比較的多い．**表-4.19** に示すように，一致率は 37.5%と低い，適合率は 95.0%と高い．

以上の結果から，溪岸斜面の崩壊面積については，DEM から取得した溪岸斜面の崩壊面積のデータを，現地調査から取得した溪岸斜面の崩壊面積のデータと同等に扱うことは可能であると考えられる．

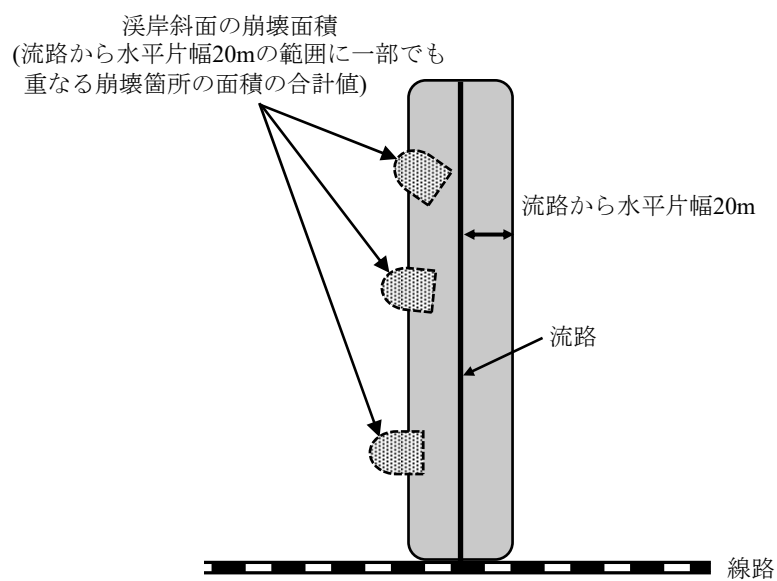


図-4.44 溪岸斜面の崩壊面積のデータ

表-4.18 データの比較結果（溪岸斜面の崩壊面積）

		溪岸斜面の崩壊面積 (DEMから取得したデータ)	
		100m <sup>2</sup> 以上	100m <sup>2</sup> 未満
溪岸斜面の崩壊面積 (現地調査から取得したデータ)	100m <sup>2</sup> 以上	10 (25.0%)	2 (5.0%)
	100m <sup>2</sup> 未満	23 (57.5%)	5 (12.5%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

表-4.19 データの比較結果の集計  
(溪岸斜面の崩壊面積)

項目	箇所数
一致率	15 (37.5%)
適合率	38 (95.0%)
不適合率	2 (5.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

上述したように、採点表の 8 つの条件のうち、地質以外の条件については、DEM から取得したデータや数値立体地図から判読により確認したデータを、現地調査等から取得したデータと同等に扱うことは可能であると考えられる。表-4.20 に、各条件における DEM のデータを示す。これらの DEM のデータは、技術者による個人差が少なく、かつ比較的容易に抽出できるものである。

なお、ここでは、採点表の「溪床堆積物の平均厚さ」を、「溪床堆積物の最大厚さ」に、「溪床の平均侵食断面積」を、「溪床のガリ侵食の有無」に変更している。

表-4.20 各条件における DEM のデータ

条件		DEM のデータ
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	縦断方向に 10m 単位に区分された各流路区間の勾配の平均値
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	流路から水平片幅 20m の範囲のうち、溪床付近を除いた範囲の勾配の平均値
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流路を設定した流域の面積 (流域は、数値立体地図から判読により確認)
	地質	—
環境	溪床の植生量	樹高 0m の箇所の有無
荒廃	溪床堆積物の最大厚さ (m) (採点表：溪床堆積物の平均厚さ)	溪床付近における溪床堆積物の最大厚さ (接谷面高度と現地地形高度の差)
	溪床のガリ侵食の有無 (採点表：溪床の平均侵食断面積)	溪床付近におけるガリ侵食の有無 (数値立体地図から判読により確認)
	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	流路から水平片幅 20m の範囲に一部でも重なる崩壊箇所の面積の合計値 (崩壊箇所は、数値立体地図から判読により確認)

#### 4.4.6 DEM を利用した採点表の提案

4.4.5 の検討結果を踏まえて作成した DEM-採点表を表-4.21 に示す。3.3.3 の表-3.10 に示した採点表の条件のうち、「溪床堆積物の平均厚さ」を「溪床堆積物の最大厚さ」に、「溪床の平均侵食断面積」を「溪床のガリ侵食の有無」に変更した。なお、カテゴリー分類、カテゴリーに対応する点数および点数の範囲は、採点表と同様である。

表-4.21 DEM-採点表

条件		カテゴリー分類	データ数	点数	点数の範囲 (最大値と最小値の差分)	順位
地形 地質	溪床の平均勾配 (度)	$\theta_r < 10^\circ$	15	-0.47	0.95	1
		$10^\circ \leq \theta_r < 25^\circ$	41	-0.09		
		$25^\circ \leq \theta_r$	22	0.48		
	溪岸斜面の平均勾配 (度)	$\theta_s < 40^\circ$	30	-0.35	0.57	2
		$40^\circ \leq \theta_s$	48	0.22		
	流域面積 (km <sup>2</sup> )	$S_b < 0.05$	54	-0.12	0.39	7
		$0.05 \leq S_b$	24	0.27		
	地質	火成岩	50	0.10	0.40	6
		堆積岩	20	-0.12		
		変成岩	8	-0.30		
環境	溪床の植生量	少ない, なし	47	0.20	0.51	4
		多い, 普通	31	-0.31		
荒廃	溪床堆積物の最大厚さ (m)	$H_s < 1.0$	50	-0.05	0.14	8
		$1.0 \leq H_s$	28	0.09		
	溪床のガリ侵食の有無	なし	26	-0.36	0.54	3
		あり	52	0.18		
	溪岸斜面の崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	$S_s < 100$	42	-0.19	0.41	5
		$100 \leq S_s$	36	0.22		

表-4.21 の DEM-採点表を用いて, 式(4.1)に示すように判別点数  $P_D$  を算出することで, 溪流からの土砂等流出の危険度を a, b, c ランクに区分することができる。本論文では, 表-4.21 を DEM-採点表として提案する。

$$P_D = \sum P_{Di} \quad (4.1)$$

$$0.07 \leq P_D \quad \text{のとき, a ランク}$$

$$-1.41 \leq P_D < 0.07 \quad \text{のとき, b ランク}$$

$$P_D < -1.41 \quad \text{のとき, c ランク}$$

ここで,

$P_{Di}$  : 表-4.21 による各条件の点数

$P_D$  : 表-4.21 により算出した判別点数

#### 4.4.7 DEM を利用した評価手法の有効性の検証

##### (1) 採点表と DEM-採点表の評価の比較

4.4.6 で提案した表-4.21 の DEM-採点表の有効性を確認するために、線路上流 100m 範囲を対象として、表-4.22 に示すように、採点表と DEM-採点表を用いた溪流からの土砂等流出の危険度評価を比較した。なお、対象とした溪流は、4.4.5 の検討で用いた 40 箇所である。

表-4.22 に示すように、採点表と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価がともに b ランクである箇所が、18 箇所 (45.0%) と最も多い。次いで、ともに a ランクである箇所が、11 箇所 (27.5%) と比較的多い。表-4.23 に示すように、採点表と DEM-採点表の評価が一致した箇所の割合は、72.5%と比較的高い。また、一致した割合に、DEM-採点表による評価が、採点表による評価よりも安全側となる箇所の割合を加えた割合は 85.0%である。一方で、DEM-採点表による評価が、採点表による評価よりも危険側となる箇所の割合は、15.0%である。このように、採点表と DEM-採点表の評価は、概ね一致しているが、若干のばらつきがある。

表-4.22 採点表と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較結果（線路上流 100m 範囲）

		DEM-採点表による評価 (DEM等データ)		
		a	b	c
採点表による評価 (現地調査)	a	11 (27.5%)	6 (15.0%)	0 (0.0%)
	b	3 (7.5%)	18 (45.0%)	0 (0.0%)
	c	0 (0.0%)	2 (5.0%)	0 (0.0%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

**表-4.23** 採点表と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の  
危険度評価の比較結果の集計（線路上流 100m 範囲）

採点表とDEM-採点表の評価比較	箇所数
一致	29 (72.5%)
一致またはDEM-採点表が安全側評価	34 (85.0%)
DEM-採点表が危険側評価	6 (15.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

(2) DEM-採点表による上流域の危険度の抽出等

表-4.24 は、採点表を用いて、線路上流 100m 範囲における溪流からの土砂等流出の危険度を評価した結果と、DEM-採点表を用いて、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度を評価した結果を比較したものである。ここで対象とした溪流数は、上述した 40 箇所から、全流路延長が 100m 未満であった 7 箇所を除いた 33 箇所である。

表-4.24 より、線路上流 100m 範囲の評価が a ランクであり、同様に上流域の評価が a ランクである溪流、すなわち溪流全域として溪流からの土砂等流出の危険度が高い溪流の割合は全体の約 39.4%である。

一方、線路上流 100m 範囲の評価が b ランクであるが、上流域の評価が a ランクである溪流は全体の約 18.2%である。これらの溪流は、線路上流 100m 範囲の危険度は低いと評価された一方で、上流域の危険度は高いと評価された溪流である。すなわち、線路上流 100m 範囲の危険度が低い溪流において、上流域に残存する高い危険度が、DEM-採点表により抽出されたものである。

表-4.25 に、線路上流 100m 範囲と上流域における溪流からの土砂等流出の危険度評価を比較した場合の集計結果を示す。表-4.25 に示すように、線路上流 100m 範囲と上流域の評価が同じである割合は約 60.6%と最も多い。また、線路上流 100m 範囲よりも上流域の危険度が高いと評価された箇所の割合は約 21.2%、線路上流 100m 範囲よりも上流域の危険度が低いと評価された箇所の割合は約 18.2%である。このように、検証に用いた 33 箇所の溪流においては、線路上流 100m 範囲と上流域の評価が同じであった箇所、すなわち、溪流全域が同程度の危険度であった溪流が多い。

**表-4.24** 線路上流 100m 範囲（採点表，現地調査）と上流域（DEM-採点表）  
の溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較結果

		上流域の評価 (DEM-採点表, DEM等データ)		
		a	b	c
線路上流100m範囲 の評価 (採点表, 現地調査)	a	13 (39.4%)	4 (12.1%)	0 (0.0%)
	b	6 (18.2%)	7 (21.2%)	2 (6.1%)
	c	0 (0.0%)	1 (3.0%)	0 (0.0%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数33箇所に対する割合

**表-4.25** 線路上流 100m 範囲（採点表，現地調査）と上流域（DEM-採点表）  
の溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較結果の集計

線路上流100m範囲と上流域の評価の比較	箇所数
危険度評価が同じ	20 (60.6%)
線路上流100m範囲よりも上流域の危険度評価が高い	7 (21.2%)
線路上流100m範囲よりも上流域の危険度評価が低い	6 (18.2%)

( )内の数値は全数33箇所に対する割合

### (3) DEM-採点表による全流域の危険度の抽出

DEM-採点表により，40 箇所の溪流の全流域を対象として，溪流からの土砂等流出の危険度評価を試行した結果を表-4.26 に示す．表-4.26 に示すように，a ランクは 23 箇所（57.5%），b ランクは 17 箇所（42.5%），c ランクは 0 箇所（0.0%）である．

このように，DEM-採点表によって，全流域における溪流からの土砂等流出の危険度を評価することも可能である．ただし，実務においては，線路上流 100m 範囲（カルテ範囲のイメージ）は，現地において比較的精度の高い調査が行われることから，DEM-採点表は，(2) で示したように，上流域に存在する危険度を簡便に抽出する場合に適している．



表-4.26 DEM-採点表による全流域を対象とした  
溪流からの土砂等流出の危険度評価

DEM-採点表による全流域を 対象とした溪流からの土砂等 流出の危険度評価	箇所数
aランク	23 (57.5%)
bランク	17 (42.5%)
cランク	0 (0.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

#### 4.4.8 上流域に対する溪流からの土砂等流出の危険度評価手法の提案

図-4.45 に、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度評価フローを示す。通常全般検査およびカルテ範囲における調査による溪流の危険度評価が、A ランクと高い箇所については、上流域の危険度にかかわらず、対策を検討することになる。

一方で、通常全般検査およびカルテ範囲における調査による溪流の危険度評価が、B, C ランクと低い箇所については、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度を評価し、a ランクの箇所があるかを確認することが重要となる。すなわち、4.4.6 で提案した表-4.21 の DEM-採点表を用いて、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度を評価する。ここで、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度評価が、a ランクとなった箇所については、検査および調査の着眼点に追加する等、維持管理に反映させる必要がある。

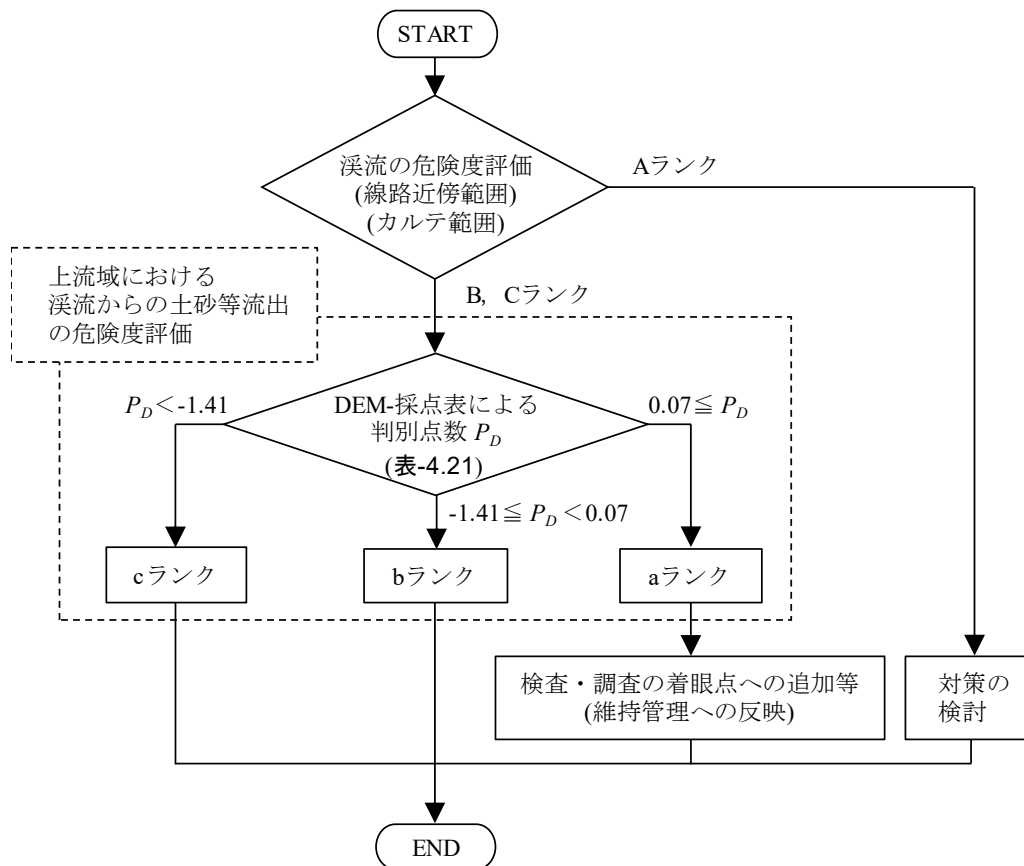


図-4.45 上流域における溪流からの土砂等流出の危険度評価フロー

## 4.5 採点表および DEM を利用した採点表の適用性の検証

### 4.5.1 採点表の適用性の検証

4.3.5 (1) では、採点表の適用性を検証するために、78 箇所の溪流を対象として、採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価を、斜面調査の専門技術者が、採点表を用いずに専門的な知見や経験に基づいて定行的に行った評価と比較した。ここでは、4.4.5 の検討で用いた 40 箇所の溪流を対象として、同様の方法で、採点表の精度を検証した。なお、溪流調査には、複数人の斜面調査の専門技術者が参加し、各専門技術者の技術的な見解を総合的に判断した上で、評価を決定した。

表-4.27 に、斜面調査の専門技術者による評価と採点表を用いた評価を比較した結果を示す。表-4.27 に示すように、斜面調査の専門技術者と採点表による評価がともに b ランクである箇所が、19 箇所 (47.5%) と最も多い。次いで、ともに a ランクである箇所が、15 箇所 (37.5%) と比較的多い。

表-4.28 に、斜面調査の専門技術者と採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較の集計結果を示す。表-4.28 に示すように、斜面調査の専門技術者と採点表に

よる評価が一致した箇所の割合は 90.0%である。また、一致した割合に、斜面調査の専門技術者の評価よりも採点表の評価の方が安全側である箇所の割合を加えた割合は 100.0%である。

以上の結果から、採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価は、斜面調査の専門技術者の評価とほぼ同等の精度を有し、やや安全側の評価になることが確認された。なお、この結果は、4.3.5 (1) で実施した、斜面調査の専門技術者の評価との比較による採点表の適用性の検証結果とほぼ一致している。

**表-4.27** 斜面調査の専門技術者と採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較結果（線路上流 100m 範囲）

		採点表による評価 (採点表, 現地調査)		
		a	b	c
斜面調査の専門技術者 による評価 (現地調査)	a	15 (37.5%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
	b	2 (5.0%)	19 (47.5%)	0 (0.0%)
	c	0 (0.0%)	2 (5.0%)	2 (5.0%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

**表-4.28** 斜面調査の専門技術者と採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較結果の集計（線路上流 100m 範囲）

斜面調査の専門技術者と 採点表の評価比較	箇所数
一致	36 (90.0%)
一致または採点表が安全側評価	40 (100.0%)
採点表が危険側評価	0 (0.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

#### 4.5.2 DEM を利用した採点表の適用性の検証

ここでは、DEM-採点表の適用性を検証するために、DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価を、斜面調査の専門技術者が定性的に行った評価と比較した。

表-4.29 に、斜面調査の専門技術者と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価を比較した結果を示す。表-4.29 に示すように、斜面調査の専門技術者と DEM-採点表による評価がともに b ランクである箇所が、18 箇所（45.0%）と最も多い。次いで、ともに a ランクである箇所が、11 箇所（27.5%）と比較的多い。

表-4.30 に、斜面調査の専門技術者と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較の集計結果を示す。表-4.30 に示すように、斜面調査の専門技術者と DEM-採点表による評価が一致した箇所の割合は 72.5%である。また、一致した割合に、斜面調査の専門技術者の評価よりも、DEM-採点表の評価の方が安全側である箇所の割合を加えた割合は 90.0%である。

以上の結果から、DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の精度は、斜面調査の専門技術者による評価の精度よりも、若干劣るものの、比較的高いといえる。

表-4.29 斜面調査の専門技術者と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較結果（線路上流 100m 範囲）

		DEM-採点表による評価結果 (採点表, DEM等データ)		
		a	b	c
斜面調査の専門技術者 による評価結果 (現地調査)	a	11 (27.5%)	4 (10.0%)	0 (0.0%)
	b	3 (7.5%)	18 (45.0%)	0 (0.0%)
	c	0 (0.0%)	4 (10.0%)	0 (0.0%)

単位：箇所 ( )内の数値は全数40箇所に対する割合

**表-4.30** 斜面調査の専門技術者と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価の比較結果の集計  
(線路上流 100m 範囲)

斜面調査の専門技術者と DEM-採点表の評価比較	箇所数
一致	29 (72.5%)
一致または DEM-採点表が安全側評価	36 (90.0%)
DEM-採点表が危険側評価	4 (10.0%)

( )内の数値は全数40箇所に対する割合

#### 4.5.3 採点表および DEM を利用した採点表の適用性に関する考察

上述したように、4.5.1 では、斜面調査の専門技術者の評価との比較による採点表の精度検証を、4.5.2 では、斜面調査の専門技術者の評価との比較による DEM-採点表の精度検証を行った。その結果、採点表による評価は、斜面調査の専門技術者の評価の精度とほぼ同等の精度が得られることが確認された。一方で、DEM-採点表による評価は、比較的精度が高いものの、斜面調査の専門技術者の評価よりも、若干劣ることが確認された。

すなわち、採点表は、斜面調査の専門技術者と同等の精度で、溪流からの土砂等流出の危険度を評価できるため、現地調査で用いることに適している。一方で、DEM-採点表は、精度が若干劣るものの、現地調査を伴わず簡便に溪流からの土砂等流出の危険度を評価することに適しており、特に、現地調査が、時間的、労力的に困難である上流域を対象として、溪流からの土砂等流出の危険度を評価することに適している。

#### 4.6 本章のまとめ

本章では、現場技術者が、通常全般検査やカルテ範囲の調査において、溪流の危険度を、効率的かつ効果的に評価できる手法について提案した。加えて、DEM を利用して、溪流からの土砂等流出の危険度を簡便に評価する手法について提案した。

本章で得られた主な結果は、次のとおりである。

- 1) 通常全般検査は、現場技術者が線路付近を移動しながら、目視で土工等設備の危険度を把握していく検査であり、時間的、労力的な制約条件を考慮すると、危険度を比較的容易に判断できるものが望ましい。そのため、事例写真やビジュアルに基づきまとめた手引き等を適用して危険度を評価する手法とした。
- 2) カルテ範囲における溪流からの土砂等流出の危険度については、溪流に危険度が著しく高い要因があるかを確認し、そのような要因がある場合には a ランクとし、ない場合には採点表を用いて a, b, c ランクに区分する手法とした。
- 3) カルテ範囲における列車運行への影響度については、線路と溪床との高さ関係やその高低差および線路上流側平坦地の線路直角方向長さといった線路への土砂等の流入のしやすさに関係する条件と、防護設備の対策効果により評価する手法とした。
- 4) カルテ範囲における溪流の危険度評価手法の適用性を確認するために、危険度評価手法による評価と斜面調査の専門技術者の評価との比較を行った。また、平成 30 年 7 月豪雨による土砂流入の発生・非発生の事例を利用した検証を行った。その結果、本論文で提案した溪流の危険度評価手法を用いることで、斜面調査の専門技術者と同等の精度で溪流の危険度を評価できることがわかった。
- 5) 採点表の 8 つの条件のうち、地質以外の条件については、DEM から取得したデータや数値立体地図から判読により確認したデータを、現地調査等から取得したデータと同等に扱うことが可能であることを確認した。
- 6) 採点表に基づいて、DEM のデータを利用した DEM-採点表を作成した。
- 7) 線路上流 100m 範囲を対象として、採点表と DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価を比較し、その結果から、採点表と DEM-採点表の評価は、概ね一致するが、若干のばらつきがあることを確認した。
- 8) DEM-採点表を用いて、上流域に危険度の高い状態を有する溪流を抽出できることがわかった。
- 9) DEM-採点表によって、全流域からの土砂等流出の危険度を評価することは可能であることがわかった。
- 10) 採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価を、斜面調査の専門技術者が行った評価と比較した結果、採点表による評価は、斜面調査の専門技術者の評価とほぼ

同等の精度を有し、やや安全側の評価になることが確認された。すなわち、採点表は、現地調査において、溪流からの土砂等流出の危険度を精度よく評価する場合に適しているといえる。

- 11) DEM-採点表による溪流からの土砂等流出の危険度評価を、斜面調査の専門技術者の評価と比較した結果、DEM-採点表による評価の精度は、斜面調査の専門技術者による評価の精度よりも、若干劣るものの、比較的高いことを確認した。すなわち、DEM-採点表は、現地調査を伴わず簡便に溪流からの土砂等流出の危険度を評価することに適しており、特に、現地調査が、時間的、労力的に困難である上流域を対象として、溪流からの土砂等流出の危険度を評価することに適している。
- 12) 通常全般検査およびカルテ範囲における調査による溪流の危険度評価が、B, C ランクと低い溪流に対して、DEM-採点表を用いて、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度を評価する手法を提案した。

#### 第4章の参考文献

- 1) 日本測量調査技術協会：図解 航空レーザ計測 基礎から応用まで，2008.1.
- 2) 日本測量調査技術協会：航空レーザ計測による災害対策事例集，2013.12.
- 3) 太田岳洋，八戸昭一：数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例，応用地質，Vol. 46, No.6, pp.347-360, 2006.2.
- 4) Adams, M. S., Fromm, R. and Lechner, V.: HIGH-RESOLUTION DEBRIS FLOW VOLUME MAPPING WITH UNMANNED AERIAL SYSTEMS (UAS) AND PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, July.2016.
- 5) 沖村孝，市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法，土木学会論文集，Vol.358, III-3, pp.69-75, 1985.6.
- 6) 沖村孝，鳥居宣之，中川渉，原口勝則：土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順，建設工学研究所論文報告集，Vol.56, pp.67-83, 2014.11.
- 7) 布川修，杉山友康，太田直之：地形を考慮した斜面表層部の地下水変動予測モデル，鉄道総研報告，Vol.22, No.1, pp.23-28, 2008.1.
- 8) 布川修，杉山友康，太田直之：地形を考慮した斜面表層部の地下水変動と安定性評価，鉄道総研報告，Vol.24, No.5, pp.17-22, 2010.5.
- 9) 藤本将光，小杉賢一郎，林祐妃，谷誠，水山高久：数値標高モデル（DEM）の空間分解能の違いが斜面安定解析に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.64, No.3, pp.3-10, 2011.9.
- 10) 坂井佑介，木下篤彦，小川紀一郎，中田慎：航空レーザ計測データを用いた地形解析による表層土層厚の推定，砂防学会誌，Vol.64, No.6, pp.38-42, 2012.3.
- 11) 浦越拓野，長谷川淳，太田岳洋，中原毅：航空レーザ測量データを用いた表層土厚推定の試み，日本応用地質学会 研究発表会講演論文集，No.41, pp.81-82, 2013.
- 12) 長谷川淳，太田岳洋：航空レーザ測量データによる斜面災害要注意箇所の抽出，第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.85-90, 2016.9.
- 13) 宮下征士，今西将文，宮田真考，西山哲：高密度航空レーザデータを使用した微地形強調図による落石発生源抽出の検証，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.73, No.2, pp.I\_92-I\_108, 2017.
- 14) 深田隆弘，森泰樹，澁谷啓：線路への影響評価に基づく落石リスクマップの作成手法，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.68, No.1, pp.199-212, 2012.
- 15) 木本秋津，水山高久，岡野和行，日下慎二：空中写真と数値地形モデルを用いた田



- 上山地における荒廃地の推移, 砂防学会誌, Vol.54, No.3, pp.14-22, 2001.9.
- 16) 笠井美青, 池田学, 藤澤和範, 松田昌之, 鈴木雄介: 航空レーザー測量データから作成された DEM の解析に基づく地すべり地形発達プロセスの推定, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.2, pp.118-124, 2008.7.
- 17) 佐々木寿, 向山栄: 地形判読を支援する新しい地形表現方法の開発とその利用 — 航空機レーザスキャナ DEM を用いたカラー標高傾斜図 (ELSAMAP) —, 応用地質, Vol.49, No.6, pp.318-330, 2009.2.
- 18) 末続真依, 北園芳人, 平川泰之, 佐藤秀文: 斜面崩壊危険度評価における赤色立体地図の利用, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.121-126, 2014.9.
- 19) 小竹利明, 菅原寛明, 田中健貴, 木下篤彦, 船越和也, 柏原佳明, 岡野和行, 吉野弘祐, 井之本信: 紀伊山系栗平地区における地形変化と流出土砂量について (その 2), 第 68 回 2019 年度砂防学会研究発表会概要集, R6-027, pp.363-364, 2019.5.
- 20) 中山大地, 隈元崇: 細密 DEM に関する研究展望, デジタル観測手法を統合した里山の GIS 解析 空間情報科学研究センターシンポジウム, pp.31-34, 2000.
- 21) 里深好文, 吉野弘祐, 小川紀一郎, 森俊勇, 水山高久, 高濱淳一郎: 高磯山天然ダム決壊時に発生した洪水の再現, 砂防学会誌, Vol.59, No.6, pp.32-37, 2007.3.
- 22) 里深好文, 吉野弘祐, 小川紀一郎, 水山高久: 天然ダムの決壊時のピーク流量推定に関する一考察, 砂防学会誌, Vol.59, No.6, pp.55-59, 2007.3.
- 23) 三浦弘之, 日朝健太: 数値標高モデルによる経験的な土石流氾濫域の予測手法の都市域に対する適用性の検討, 地域安全学会論文集, No.31, pp.309-318, 2017.11.
- 24) 中谷加奈, 里深好文: 土石流の規模と地形データの解像度が到達範囲に及ぼす影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I\_1201-I\_1206, 2018.
- 25) 高山陶子, 小野田敏, 藤田浩司, 内田純二: 航空レーザによる詳細地形データの土石流危険度把握への活用, 平成 24 年度建設コンサルタント業務・研究発表会 第 12 回論文集, pp.49-52, 2012.7.
- 26) 布川修, 太田直之, 石川智史: 地形を考慮した土石流の発生危険性評価, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.35-40, 2013.11.
- 27) 林宏樹, 新海英昌, 大木基裕, 五百旗頭弘憲: レーダ雨量を活用した土石流発生危険度評価手法に関する検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-878, 2019.9.
- 28) Mori, T., Sugiyama, T., Hosooka, I., Nakata, M., Okano, K. and Satofuka, Y.: SLOPE FAILURE RISK ASSESSMENT MODELING USING TOPOGRAPHIC DATA AND NUMERICAL CALCULATION OF SOIL CONSERVATION BY TREE ROOT SYSTEMS, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,

Volume IV-2/W5, ISPRS Geospatial Week 2019, Enschede, The Netherlands, pp.217-222, June.2019.

- 29) 池谷浩：土石流発生に関係する溪床堆積物，建設省土木研究所 土木技術資料，Vol.22, No.3, pp.31-36, 1980.3.
- 30) 木下篤彦，神野忠広，内田太郎，山口和也，船越和也，中島達也，岡野和行，細見温子，水山高久：六甲山系における過去の豪雨・地震災害による崩壊地の土砂移動に関する研究，第 61 回平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，Pb-27, pp.598-599, 2012.5.
- 31) 木下篤彦，関根隆好，神野忠広，内田太郎，水山高久，小杉賢一朗，船越和也，岡野和行，山口和也：六甲山系における地形特性を考慮した斜面・溪床の不安定土砂量の推定手法に関する研究，第 62 回平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集，Pb-33, pp.B-330-B-331, 2013.5.
- 32) 森泰樹，細岡生也，岡野和行，牧澄枝，杉山友康，里深好文：鉄道沿線小規模溪流における溪床堆積厚さの数値地形データからの推定，土木学会第 74 回年次学術講演会，III-98, p.III-98, 2019.9.

## 第5章 土砂流入災害による列車事故防止を対象とした降雨モニタリングに関する研究

### 5.1 目的と概要

鉄道事業者は、土工等設備の検査による健全度判定の結果等を踏まえ、事前対策として、のり面防護工等のハード対策を講じるとともに、鉄道沿線に存在するすべての斜面にハード対策を施すことは、労力や資金の制約条件があるなかで現実的ではないことから、ソフト対策として降雨時運転規制を併せて行っている。

従来から、降雨時運転規制は、鉄道雨量計で計測した降雨量に基づいて行われてきた。しかしながら、近年になって、鉄道雨量計ではとらえられない可能性のある局地的な大雨が増加してきたことから、鉄道事業者は、解析雨量を降雨時運転規制に導入することを進めている。なお、この解析雨量を用いた降雨時運転規制は、いずれも線路直上メッシュの雨量情報を利用するものであり、対象とする主な災害は、線路沿線の盛土や切土等の鉄道構造物の不安定化に起因するものである。

一方、降雨災害には、鉄道構造物の不安定化に起因するものだけでなく、線路から離れた鉄道管理用地外の自然斜面が崩壊し、土砂流入・土石流となるものがある。2.1.2で示したとおり鉄道施設が被る降雨災害のなかで、土砂流入・土石流の占める割合が近年増加傾向にあることから、今後は、これらの災害の発生源を含めた降雨量もモニタリングして、降雨時運転規制に反映させることも必要といえる。しかしながら、現在のところ、鉄道沿線の広域的な斜面を対象として降雨モニタリングの範囲を検討した研究はなされていない。

そこで、ここでは、過去に発生した土砂流入・土石流のうち発生源が溪流であったものの事例を用いて、以下の2点について分析し、これらの結果に基づいて解析雨量を鉄道の降雨時運転規制に利用する場合、線路からどの程度離れた範囲まで降雨量をモニタリングする必要があるかを明らかにした<sup>1)</sup>。

- ① 過去に土砂流入・土石流をもたらした溪流の流域面積と線路から流域の最遠部までの距離
- ② 自己相関係数を用いた災害発生時における降雨量の距離依存性

なお、3.2.2において、過去に土砂流入をもたらした溪流を「災害溪流」と表現したが、本章でも同様に、過去に土砂流入・土石流をもたらした溪流を「災害溪流」と表現する。

## 5.2 降雨量に基づく運転規制方法

### 5.2.1 鉄道における降雨時運転規制

降雨時運転規制とは、降雨災害から列車事故を未然に防ぐために、降雨量があらかじめ定めた運転規制値を超えたときに速度規制や運転中止を行うものである。

鉄道における降雨時運転規制の歴史は古く、明治から昭和初期にかけて、自然災害の発生が懸念される際の職員の行動や、雨量計設置の目安等が示された<sup>2)</sup>。なお、鉄道における降雨量の把握は、線路を保守する現場機関に設置された雨量枡に溜まった雨水を計測することによって行われ、その結果を現場機関の責任者が独自に判断して、列車の運行を規制していた<sup>3)</sup>。1965年頃より自記式の雨量計が順次整備されたが、その規制基準については、各鉄道管理局で異なっていた<sup>3)</sup>。1968年8月18日、岐阜県加茂郡白川町の国道41号線において、観光バス2台が、集中豪雨によって発生した土石流に巻き込まれて飛驒川へ転落し、乗客乗員107名のうち104名が死亡するという惨事が発生した。このとき、並走する国鉄高山線も多くの被害を受けていたが、降雨時運転規制により列車の運行が中止されていたため、事故を未然に防ぐことができた。国鉄は、降雨時運転規制の重要性を改めて認識し、各機関でばらついていた運転規制基準を統一するために、1972年に「降雨に対する運転規制基準作成要領（国鉄運輸局、施設局）<sup>4)</sup>」を制定した。この要領に基づき、降雨時運転規制に用いる雨量指標は、図-5.1に示すように、1時間雨量と、降雨が12時間以上の中断を伴わずに継続した時間の降雨量の合計である連続雨量（以下、連続雨量という）の組み合わせに統一された。なお、国鉄九州総局では災害実態を踏まえ、この降雨の中断時間を24時間としていた<sup>5)</sup>。なお、運転規制値は、災害雨量等を考慮して決定された。その後、降雨が48時間以上の中断を伴わずに継続した期間の降雨量の合計である累積雨量が雨量指標に追加された<sup>6)</sup>。

なお、JR移行後は、JR各社において様々な雨量指標の導入が行われた<sup>7)</sup>。JR西日本は、ある時点から過去120時間の降雨量を積算する5日間積算雨量<sup>8)</sup>を導入した。東日本旅客鉄道株式会社は、降った雨が時間の経過とともに浸透または流出することで変化する土中の水分に相当する実効雨量<sup>9)</sup>を導入した。九州旅客鉄道株式会社は、雨の降り始めから過去1週間を遡ってその期間の降雨量を反映させる指標や3時間雨量を導入した<sup>10)</sup>。新幹線ではJR全社において、1時間雨量と24時間連続雨量の組み合わせが採用されている<sup>7)</sup>。

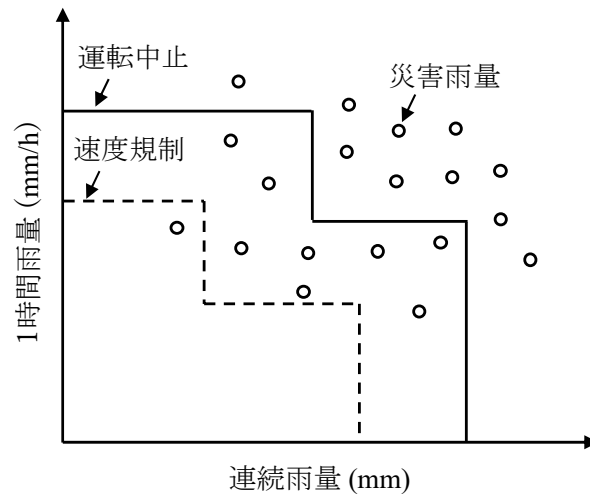


図-5.1 降雨時運転規制の概念図

### 5.2.2 JR 西日本における降雨時運転規制の現状

JR 西日本では、降雨に対する運転規制基準作成要領や災害時の運転取扱いに関する社内規定等によって降雨時運転規制を実施<sup>11)</sup>し、線区の特性を考慮して必要の都度、一部線区の運転規制値の変更等を行っていた。しかしながら、近年になって、局地的な大雨の頻発や降雨強度の増大等、降雨形態そのものが大きく変化してきたことから、2008年頃より、JR 西日本は、国鉄の考え方を踏襲して実施してきた在来線の降雨時運転規制方法の見直しに着手した。具体的には、降雨災害の発生のしやすさを地形条件等で分類した区間（以下、運転規制区間という）、運転規制値、雨量指標および規制解除の方法等<sup>12)~15)</sup>の見直しを実施し、2015年度に在来線全線の見直しを完了した。

#### (1) 運転規制区間

JR 西日本は、1989年に、災害の発生のしやすさ等に基づいて運転規制区間を設定した。具体的には、高架橋、トンネル、平地部の素地路盤等の構造物で降雨災害が考えられない区間を基本的に運転規制を実施しない「甲区間」、盛土、切土等の一般土工区間で、軽微な災害のおそれがある区間を「乙区間」、盛土、切土等の一般土工区間で、大規模な災害の可能性が考えられる区間を「丙区間」に設定した。しかしながら、軽微な災害のおそれがある乙区間と大規模な災害が考えられる丙区間との区分が定性的で明確でないこと等の課題があったため、JR 西日本は、「甲区間」、「乙区間」、「丙区間」の3区分をあらためて、表-5.1に示すように、「規制なし区間（従来の甲区間に相当）」、「規制あり区間（従来の乙区間および丙区間に相当）」の2つの区分に見直した。

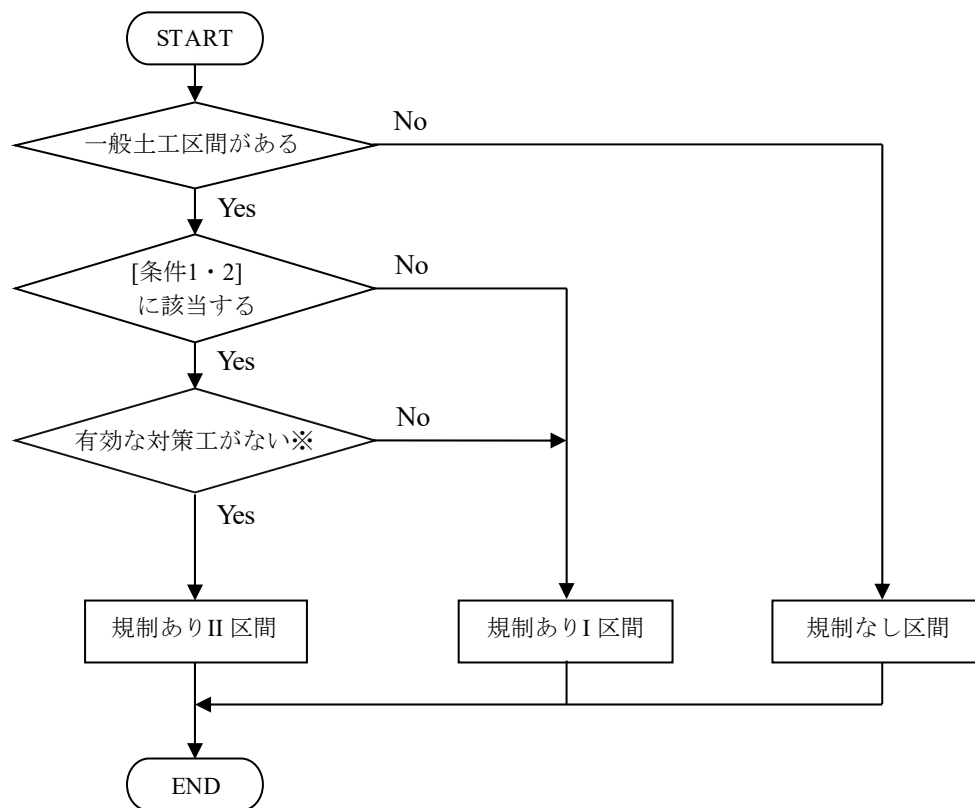
なお、運転規制は、表-5.1に示すように、「警戒（警備）」、「速度規制（徐行）」、「運転中止」の3つとした。

表-5.1 JR 西日本における運転規制区間の考え方

区分	対象区間	運転規制		警戒 (警備)
		運転中止	速度規制 (徐行)	
規制なし	高架橋，トンネル，平地部の素地路盤等の構造物で降雨災害が考えられない区間	—	—	○
規制あり	I 盛土，切土等の一般土工区間のうち，列車の運行に支障のおそれがある大規模な災害が考えられない区間	○	○	○
	II 盛土，切土等の一般土工区間のうち，列車の運行に支障のおそれがある大規模な災害が考えられる区間			

運転規制区間を設定するためのフローを図-5.2 に示す。規制なし区間は，降雨時にのり面崩壊等が考えられない区間である。具体的には，平地部の素地路盤や土留め擁壁上部にのり面がなく，土留め擁壁に顕著な変状や盛土内の水圧が増加するおそれが少ない箇所とした。ただし，土留め擁壁上部にのり面がない場合であっても土留め擁壁に傾斜や沈下等の顕著な変状が発生している場合，水抜き孔の機能が低下し，盛土内の水圧が増大するおそれがある場合には，規制あり区間とした。なお，規制なし区間における土留め擁壁の構造は，鉄筋コンクリートや補強盛土等とし，石積み壁等の旧式構造物は対象としていない。

規制あり区間は，盛土，切土の高さや斜面勾配，地形・地質，災害歴および有効な対策工の有無等を確認して，「列車の運行に支障のおそれがある大規模な災害が考えられない区間（規制あり I）」，「列車の運行に支障のおそれがある大規模な災害が考えられる区間（規制あり II）」の 2 つに区分した。



※有効な対策工とは格子枠工や張コンクリート等の防護工が適切な範囲に施工されていることをいう

【条件1：盛土、切土の高さや斜面勾配等】

- ① 盛土高さが3m以上の純盛土
- ② 切土高さが3m以上、または、切土に続く上部の自然斜面の勾配が30°以上、または、切土下部が土留壁になっており、この土留壁を含む切土高さが5m以上
- ③ 自然斜面の勾配が30°以上

【条件2：地形・地質、災害歴等】

- ① 谷渡り盛土
- ② 切盛境界
- ③ 災害歴あり（対策済は除く）
- ④ 重点警備箇所
- ⑤ カルテに基づく検査によりAランクとなった箇所
- ⑥ 部外からの災害（土砂流入等）の可能性がある箇所

図-5.2 運規規制区間の設定フロー

## (2) 雨量指標

JR 西日本における在来線および新幹線の雨量指標を表-5.2 に示す。従来、JR 西日本では、降雨に対する運転規制基準作成要領に基づき、在来線の雨量指標に連続雨量を用いていた<sup>11)</sup>。また、過去に発生した長雨による災害や事故を教訓として、累積雨量や5日間積算雨量を導入してきた。一方、山陽新幹線では、在来線の連続雨量に対して、24時間連続雨量を用いていた。そのため、JR 西日本は、在来線と新幹線の雨量指標を統一すること等を目的として、24時間連続雨量を在来線に適用した。

表-5.2 JR 西日本における在来線および新幹線の雨量指標

雨量指標	概要	適用
1 時間雨量	任意の時間に対して、1 時間前からその時刻までの降雨量の合計	在来線 新幹線
24 時間連続雨量	任意の時間に対して、24 時間前からその時刻までの降雨量の合計	在来線 新幹線
累積雨量	任意の時間に対して、降雨が 48 時間以上の中断を伴わず、その時刻まで連続した降雨量の合計	在来線
5 日間積算雨量	雨の降り始めから 5 日間（120 時間）の総雨量	在来線

## (3) 運転規制値

降雨に対する運転規制基準作成要領によると、運転規制値は、災害雨量から統計的に決定するとされている。JR 西日本においては国鉄が設定した運転規制値を踏襲するとともに、線区の特性を考慮して、必要により、一部線区の運転規制値の見直しを行っていた。しかしながら、運転規制値を設定した当時から近年までに、斜面防災対策が行われ、防災強度が向上した区間があることや、一方で周辺環境の変化、のり面の風化、荒廃等により防災強度が低下してきた区間があること、また、近年の降雨形態の変化を運転規制値に十分に反映できていないこと等から、JR 西日本は在来線全線を対象として運転規制値の見直しを実施した。

JR 西日本は、それぞれの路線の防災強度の違いを運転規制値の設定に反映させるために、路線を「都市近郊線」、「幹線」、「ローカル線」の3つに区分し、線区ごとの再現期間に基づいて運転規制値を設定している。今後、防災対策が実施されて線区の耐降雨強度が向上した場合やカルテの A ランク箇所が解消された場合等には、運転規制区間や運転規制値を随時見直すこととしている。また、運転規制値は、概ね5年を目安に再計算された再現期間に基づいて見直しを行う。



### 5.3 面的雨量情報を利用した降雨モニタリングの実態

#### 5.3.1 局地的な大雨の発生状況

近年、全国的に局地的な大雨が増加する傾向にある。そのため、離散的に配置された鉄道雨量計では、これらの局地的な大雨をとらえられない可能性がでてきた。鉄道雨量計の設置間隔は、積乱雲の水平方向の広がりがある程度という定性的な理由等から、多くの在来線において10km<sup>16),17)</sup>が標準とされた。なお、JR西日本における鉄道雨量計の設置間隔の平均値は約11.4km、標準偏差は約4.9kmである。

JR西日本は、2004年6月から2008年12月までの解析雨量を用いて、局地的な大雨が鉄道沿線でどの程度発生しているかを調査<sup>18)</sup>した。ここでは、1時間雨量が45mm/h以上かつ降雨の面的な分布範囲が12km以下の降雨を局地的な大雨と定義した。1時間雨量の45mm/hは、当時運転中止の基準として比較的多く用いられていた値であり、降雨の面的な分布範囲の上限値とした12kmは、JR西日本における鉄道雨量計の設置間隔の平均値である約11.4kmと同程度の値である。

図-5.3に調査結果を示す。この期間において、JR西日本管内では、局地的な大雨が約3200回発生している。なお、そのうち、局地的な大雨が鉄道雨量計間で発生した回数は760回である。

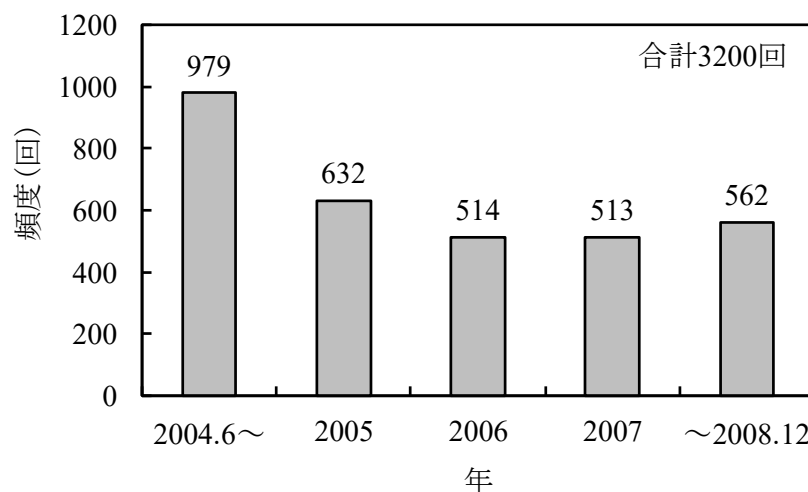


図-5.3 JR西日本管内における局地的な大雨の頻度（2004年6月～2008年12月）

（文献18）を一部修正）

### 5.3.2 解析雨量の利用に向けた検討

降雨時運転規制においては、鉄道雨量計の設置箇所での観測雨量を超える大雨が鉄道雨量計間で発生する可能性があることを前提に、経験的に超過分だけ運転規制値を小さく設定することで、受け持ち区間全体の安全を確保していると考えられる。このような場合には、鉄道雨量計間の降雨実態をきめ細かく把握できるようになれば、運転規制値や運転規制区間を変更して、さらなる安全・安定輸送を実現できることになる。しかしながら、鉄道雨量計を増設して受け持ち区間を短くすることで、降雨量をきめ細かく把握することは、合理的ではなく、解析雨量を利用することが有効な手段の一つである。鈴木<sup>7)</sup>は、解析雨量を補完的に用いることにより、鉄道雨量計では観測できない場合がある局地的な大雨をとらえる降雨時運転規制を提案している。

また、JR 西日本は、解析雨量を利用した降雨時運転規制のシステム開発を行うとともに、解析雨量の有用性等の検証<sup>11),18)~21)</sup>を進め、一部線区に導入した。以下に、JR 西日本が実施した(1)解析雨量の有用性の検証、(2)降雨時運転規制シミュレーションによる局地的な大雨の補完状況の確認について示す。

#### (1) 解析雨量の有用性の検証

解析雨量の有用性を検証するために、鉄道雨量計で観測した降雨量(以下、鉄道雨量という)と鉄道雨量計を包含するメッシュの解析雨量を比較し、解析雨量が持つばらつきを確認した<sup>18)</sup>。

対象とした降雨量は1時間雨量であり、JR 西日本管内において任意に選定した31駅の鉄道雨量とそれらの駅を包含するメッシュの解析雨量を比較した。一例として、図-5.4に、A駅の鉄道雨量とA駅を包含するメッシュの解析雨量との相関関係を示す。ここでは、2004年10月から2008年9月までの4年間のデータを用いており、降雨量が比較的小さい10mm/h以下のデータは除外している。鉄道雨量と解析雨量には、若干のばらつきがみられるものの、相関係数は0.84であり比較的高い。

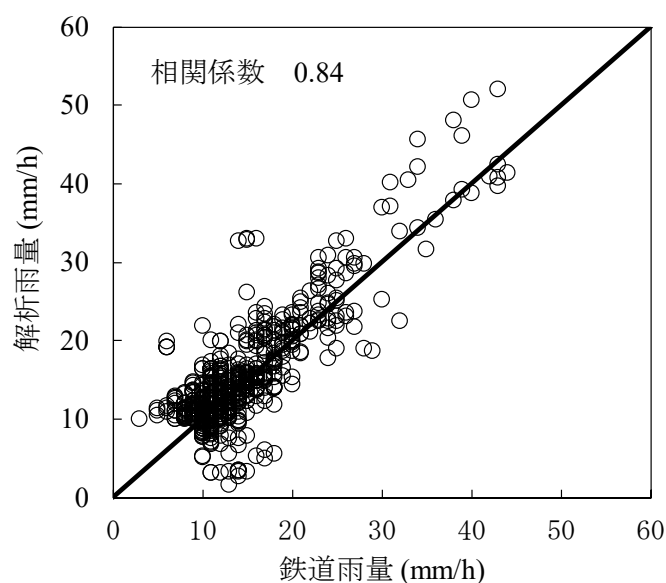


図-5.4 鉄道雨量と解析雨量との相関関係（A 駅）（文献 18)を一部修正）

解析雨量の算出には、アメダスで観測された降雨量が利用される．図-5.5 は、31 箇所における鉄道雨量と解析雨量との相関係数と、鉄道雨量計とアメダスとの距離との関係を示したものである．2 地点間の距離が離れるほど相関は低くなる傾向にあるが、3km 以内であれば相関係数は概ね 0.7～0.9 と比較的高い．解析雨量を算出するために利用されるアメダスが鉄道雨量計に近いほど、鉄道雨量と解析雨量との相関は高くなる傾向にある．

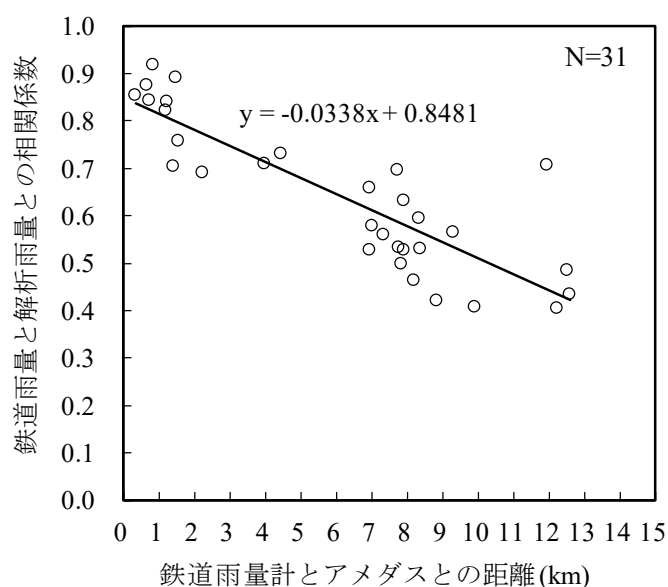


図-5.5 同一メッシュ内での鉄道雨量と解析雨量の相関係数と 2 地点間距離との相関関係（文献 18)を一部修正・加筆）

## (2) 降雨時運転規制シミュレーションによる局地的な大雨の補完状況の確認

JR 西日本の地方主要線区および地方ローカル線区から、5 線区を選び、鉄道雨量のみで降雨時運転規制を行った場合と、鉄道雨量および解析雨量で降雨時運転規制を行った場合の運転規制シミュレーションを実施し、それぞれの規制回数を比較した<sup>18)</sup>。対象期間は、2004 年 6 月から 2008 年 12 月までである。その結果を図-5.6 に示す。図-5.6 には、1 年間の平均的な運転規制回数を示している。鉄道雨量のみで降雨時運転規制を行った場合の規制回数に対して、鉄道雨量および解析雨量で降雨時運転規制を行った場合の規制回数は、1 年間において最大で約 0.5 回増加している。一方で、規制回数の差がみられない区間がある。これは一部線区による結果ではあるが、解析雨量を利用することによる安定輸送への影響は比較的小さいといえる。

なお、JR 西日本では、地震、雨、風等の気象にかかわるデータを一元的に管理でき、各種運転規制に活用できる「気象災害対応システム<sup>22)</sup>」を整備した。

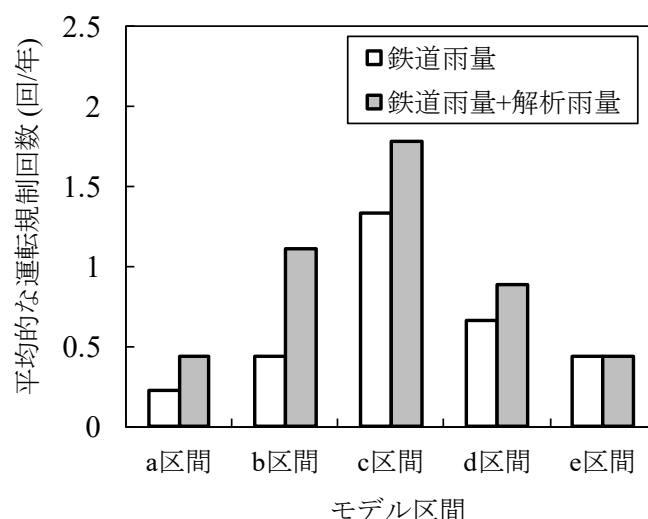


図-5.6 解析雨量を降雨時運転規制に適用したときの規制回数の増加傾向  
(文献 18)を一部修正・加筆)

## 5.4 災害溪流における流域の大きさと線路から流域最遠部までの距離

### 5.4.1 分析概要

JR 西日本では、鉄道沿線における広域的な斜面を対象とした降雨モニタリングの分析<sup>1),20),21)</sup>を進めてきた。ここでは、過去に発生した土砂流入・土石流の事例を用いて、土砂流入・土石流の発生源となった災害溪流の流域面積と線路から流域の最遠部までの距離を分析した結果を示す。

災害溪流が、線路からどの程度離れた所まで流域を持つのかを分析するために、流域のうち、線路から直角方向に最も距離が離れる箇所までの直線距離（以下、最遠距離  $L$  という）を算出した。最遠距離  $L$  の概要を図-5.7 に示す。また、災害溪流の流域の大きさを確認するために、流域面積  $A$  についても算出した。ここで、最遠距離  $L$  および流域面積  $A$  は、国土地理院発行の 1/25000 地形図を用いてプラニメータにより算出した。なお、DEM の利用も検討したが、すべての箇所のデータが揃わなかったことから、算出の精度を統一するために若干の誤差は許容した上で 1/25000 地形図を用いた。

分析対象とした土砂流入・土石流の事例は、JR 西日本管内で 1976 年度から 2017 年度までの 42 年間に発生した事例である。なお、橋りょうで横断する流域の大きな溪流は、河川水位による規制が別途設定されていることから分析対象から除くとともに、線路上における災害発生位置が不明確な災害等も除き、179 事例を対象として分析した。

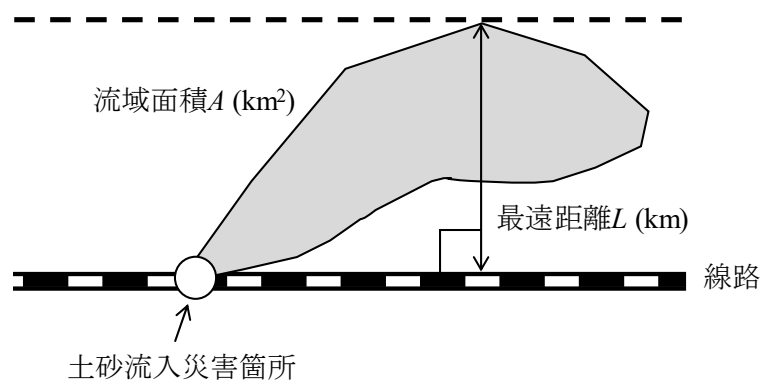


図-5.7 線路から流域までの最遠距離  $L$  および流域面積  $A$

#### 5.4.2 分析結果

最遠距離  $L$  の頻度と累積比率を図-5.8 に示す。最遠距離  $L$  が、0.1km 以上 0.2km 未満の災害溪流は 37 箇所、0.2km 以上 0.3km 未満の災害溪流は 46 箇所であり頻度が比較的高い。また、最遠距離  $L$  が 0.5km 未満である災害溪流は、145 箇所であり、全体の割合の約 81%を占める。また、最遠距離  $L$  が 1.0km 未満の災害溪流は、175 箇所であり、全体の割合の約 98%を占める。つまり、大多数の災害溪流の流域が、線路から直角方向に 1.0km 未満の範囲内に存在している。

なお、最遠距離  $L$  の平均値は約 0.36km、最大値は約 1.29km、標準偏差は約 0.24km である。その最大値より、全ての災害溪流の流域が、線路から直角方向に 1.3km 未満の範囲内に存在していることがわかる。

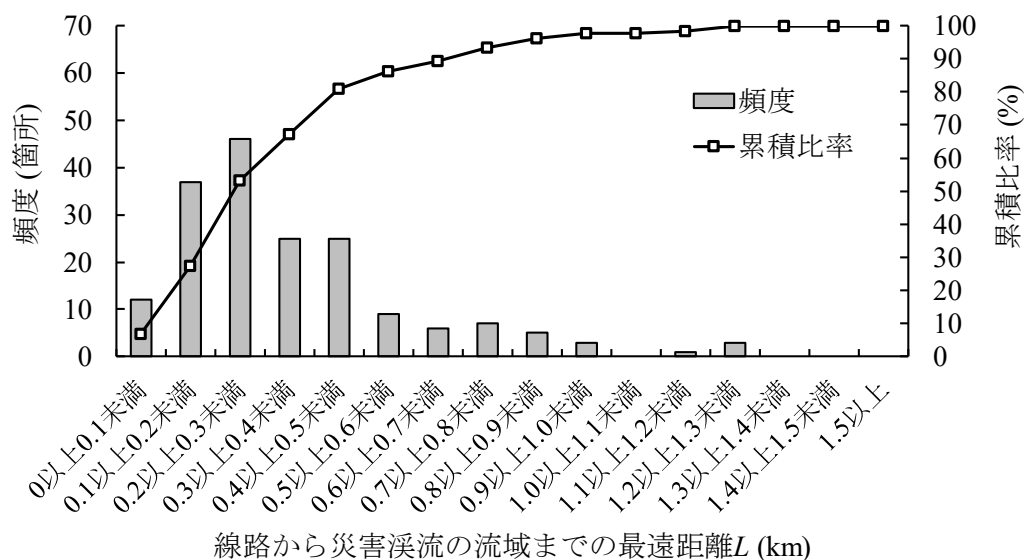


図-5.8 線路から災害溪流の流域までの最遠距離  $L$

流域面積  $A$  の頻度分布を図-5.9 に示す。流域面積  $A$  が 0.1km<sup>2</sup> 未満の災害溪流は、139 箇所であり、全体の約 78%を占める。このことから、多くの災害溪流の流域が、0.1km<sup>2</sup> の範囲内にいることがわかる。流域面積  $A$  が 0.5km<sup>2</sup> 未満の災害溪流は、177 箇所であり、全体の約 99%を占める。また、図-5.10 に示すように、0.1km<sup>2</sup> 未満の流域面積  $A$  に着目すると、0.03km<sup>2</sup> 未満の流域の頻度が比較的高い。

なお、災害溪流の流域面積  $A$  の平均値は約 0.08km<sup>2</sup>、最大値は約 0.99km<sup>2</sup>、標準偏差は約 0.13km<sup>2</sup> である。その最大値より、全ての災害溪流の流域は 1.0km<sup>2</sup> 未満であることがわかる。

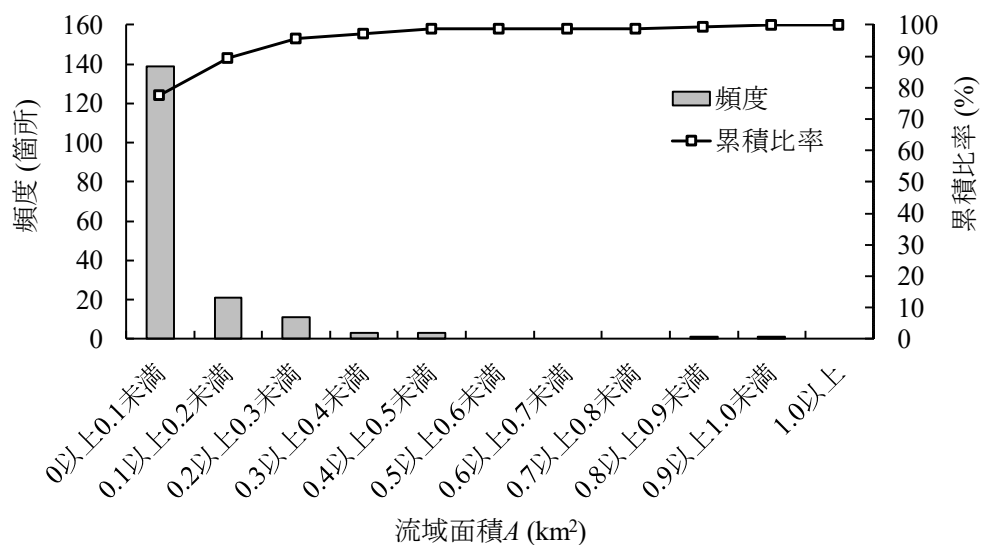


図-5.9 災害溪流の流域面積  $A$

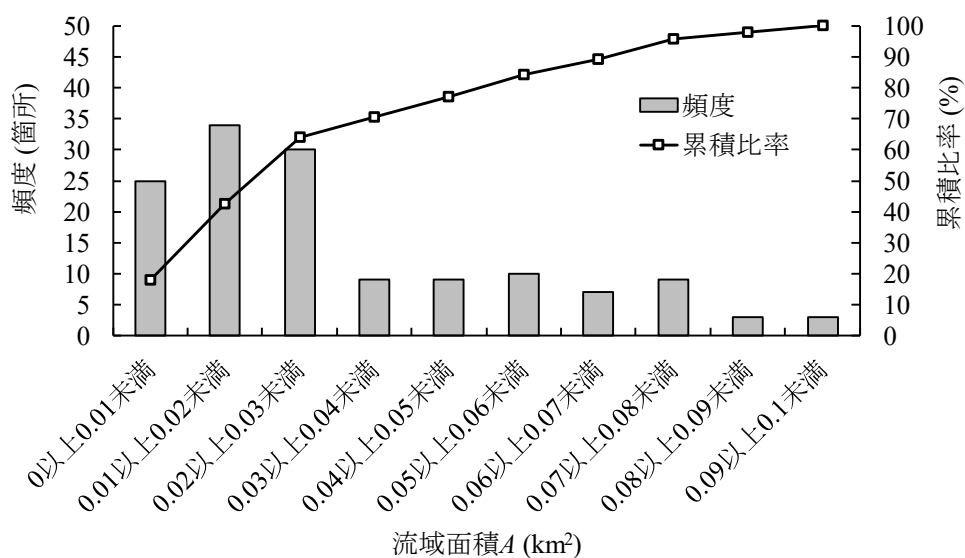


図-5.10 災害溪流の流域面積  $A$  (0～0.1km<sup>2</sup>)

一方で、都道府県が指定している土石流危険溪流は、5km<sup>2</sup>までの流域面積をもつ溪流を対象としており、また、過去には日本全国で1～10km<sup>2</sup>程度の流域面積をもつ溪流からの土石流も発生している<sup>23)</sup>。このことから、鉄道においては、流域が極めて小さい溪流を発生源とした土砂流入・土石流が多いことがわかる。

上述したように、災害溪流の最遠距離  $L$  の分析結果から、災害溪流の流域には、線路から直角方向に約1.3km離れた地点付近まで存在しているものがあることがわかった。

つまり、土砂流入・土石流の発生源となるおそれがある溪流の流域全体の降雨量を把握するためには、線路直上メッシュだけでなく、線路から直角方向に約 1.3km 離れた地点までのメッシュも含めてモニタリングを行う必要があることになる。

以上のことから、解析雨量を用いた場合における降雨モニタリングの範囲の概念は図-5.11 のようになる。ただし、線路から直角方向に約 1.3km 離れた地点までのメッシュが、線路直上メッシュと同程度の降雨量を観測している可能性があるため、以降では、降雨量の距離依存性の分析を行うことで適正な降雨モニタリングの範囲を検討する。

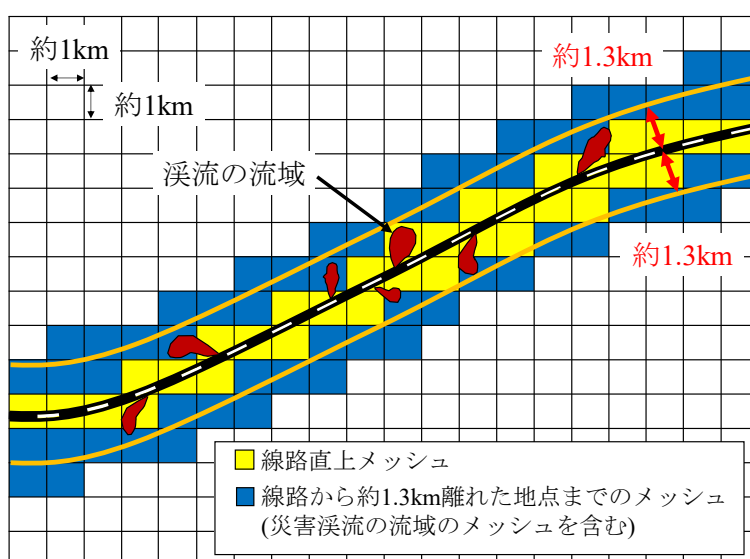


図-5.11 解析雨量を用いた場合における降雨モニタリングの範囲の概念

## 5.5 鉄道に土砂流入災害をもたらした降雨量の距離依存性の分析

### 5.5.1 分析概要

分析は、時系列データの異時点間の相関関係を示すことに用いられている自己相関係数<sup>24)</sup> $\rho$  (式(5.1)) を参考にして行う。具体的には、ある時刻の降雨の面的な広がり把握するため、時刻  $\Delta t$  の変動を距離  $\Delta l$  の変動に置き換えて自己相関係数  $\rho$  (式(5.2)) を算出し、降雨量の距離依存性とした。式(5.2)における  $r$  は解析雨量における 1 時間雨量である。すなわち、式(5.2)を用いて、ある位置  $i$  のメッシュの 1 時間雨量と、ある位置  $i$  から  $l$  km 離れた  $i+l$  のメッシュの 1 時間雨量とにより自己相関係数  $\rho$  を算出する。ここで、 $l$  は 1 km から 40 km までである。



$$\rho(t) = \sum_{i=0}^{N-1} r(i) \cdot r(i+t) / \sum_{i=0}^{N-1} r(i)^2 \quad (5.1)$$

$$t = 0, 1, 2, \dots, N$$

$$\rho(l) = \sum_{i=0}^{N-1} r(i) \cdot r(i+l) / \sum_{i=0}^{N-1} r(i)^2 \quad (5.2)$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, N \quad N = 1 \sim 40$$

降雨量データは、上述したように気象庁の解析雨量とし、30分ごとの1時間雨量を用いた。降雨の分析範囲は、図-5.12に示すように、災害地点等の直上メッシュを中心とする約40km四方とした。なお、図-5.12に示す各メッシュは、1kmメッシュを示している。自己相関係数 $\rho$ は、8方向（16方位）について算出し、N-S方向、E-W方向は $l$ を約1kmごととして約20kmまでを、NW-SE方向、NE-SW方向は $l$ を約1.4kmごととして約28kmまでを、WNW-ESE方向、NNW-SSE方向、NNE-SSW方向、ENE-WSW方向は $l$ を約1.1kmごととして約22kmまでを算出した。

降雨量の距離依存性の分析は、解析雨量の入手が可能となった2009年度から2017年度までにJR西日本管内において土砂流入・土石流をもたらした降雨等を用いて行った。なお、土砂流入・土石流の事例は、分析の信頼性を確保するために、災害記録の写真やスケッチ等により土砂等の流入位置や流入量、発生源の場所等が明確に確認できるものを選んだ。一方で、複数の溪流が隣接し、発生源を明確に特定できなかったもの等、災害記録の一部にでも曖昧さが残るものは除いた。さらに、降雨時における線路の巡回警備等により、土砂流入・土石流が発生した時刻がある程度推定でき、災害をもたらした降雨を特定できる事例のみを抽出した。一方で、長雨により広範囲にわたり甚大な被害を受けたため災害の発見が遅れた事例等は、降雨の特定が困難であったため除いた。

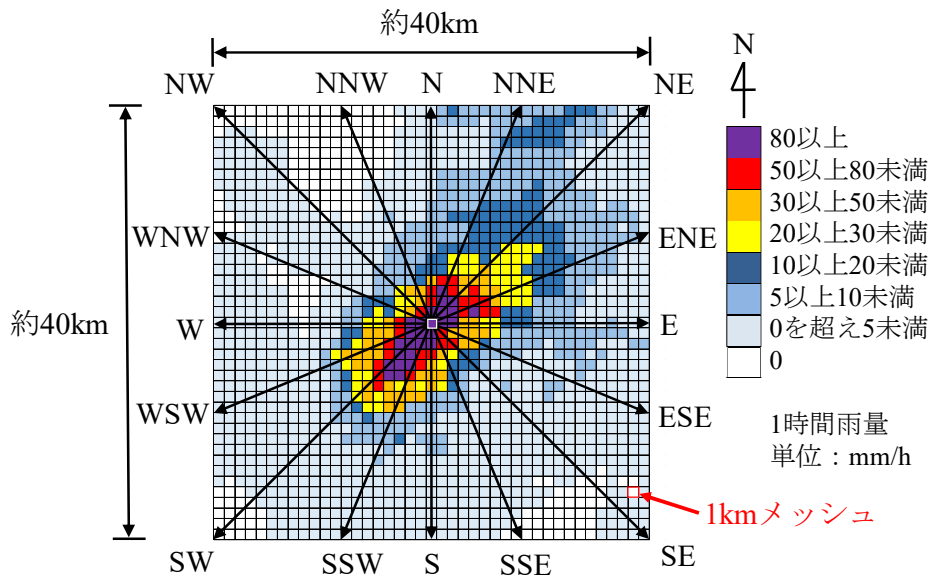


図-5.12 分析の対象範囲と方向

以上の条件により抽出された土砂流入・土石流の事例等は、表-5.3 に示す 16 件である。ここでは、気象庁の全国災害時気象概況<sup>25)</sup>を参考にして、各事例を前線等と台風に分けた。また、局地的な大雨は、降雨量が大きくかつ空間スケールが比較的小さいものとし、具体的には 1 時間雨量が 50mm/h 以上の雨域が約 10km 四方よりも狭いものと定義した。その結果、土砂流入・土石流の事例等は表-5.3 に示すように、前線等が 8 件（事例 F1～F8）、台風が 5 件（事例 T1～T5）、局地的な大雨が 3 件（事例 L1～L3）となった。なお、局地的な大雨による土砂流入・土石流の事例が、他の気象区分よりも少なかったため、より分析精度を高めるために、鉄道沿線で観測された土砂流入・土石流が発生していない局地的な大雨の事例（事例 L2）を追加した。事例 L2 については、線路直上メッシュのうち、最も大きな 1 時間雨量を観測したメッシュを、災害発生地点のメッシュと仮定して分析を行った。

災害発生地点および追加事例において災害発生地点と仮定した地点の直上メッシュ（以下、災害地点等直上メッシュという）における最大 1 時間雨量と、その観測時刻（以下、災害地点等最大降雨時）等を表-5.3 に示す。

表-5.3 分析に用いた災害降雨事例等（16 件）

気象区分	事例数	事例名	災害地点等最大降雨時		災害 未災害 (追加) 事例
			1時間雨量 (mm/h)	年月日 時刻	
前線等	8件	F1	62	2009/7/21 8:30	災害
		F2	28	2009/7/25 8:30	災害
		F3	37	2009/8/1 8:30	災害
		F4	72	2010/7/14 10:30	災害
		F5	19	2013/6/26 7:00	災害
		F6	62	2013/7/28 12:00	災害
		F7	73	2013/8/24 3:00	災害
		F8	74	2014/8/17 3:00	災害
台風	5件	T1	80	2009/8/9 21:00	災害
		T2	16	2011/5/11 19:30	災害
		T3	70	2013/9/2 11:00	災害
		T4	30	2013/9/16 6:30	災害
		T5	67	2014/8/6 6:00	災害
局地的な 大雨	3件	L1	69	2010/7/6 16:00	災害
		L2	95	2014/9/10 23:30	未災害 (追加)
		L3	52	2016/7/14 2:00	災害

### 5.5.2 災害地点等の最大降雨量に着目した分析

本節では、図-5.13 に示すように、災害地点等最大降雨時に着目して分析を行った。なお、ここでは、表-5.3 に示す 16 事例のうち、3 事例における降雨量の距離依存性を例示し、続いて、前線等、台風および局地的な大雨の気象区分別における降雨量の距離依存性を示す。

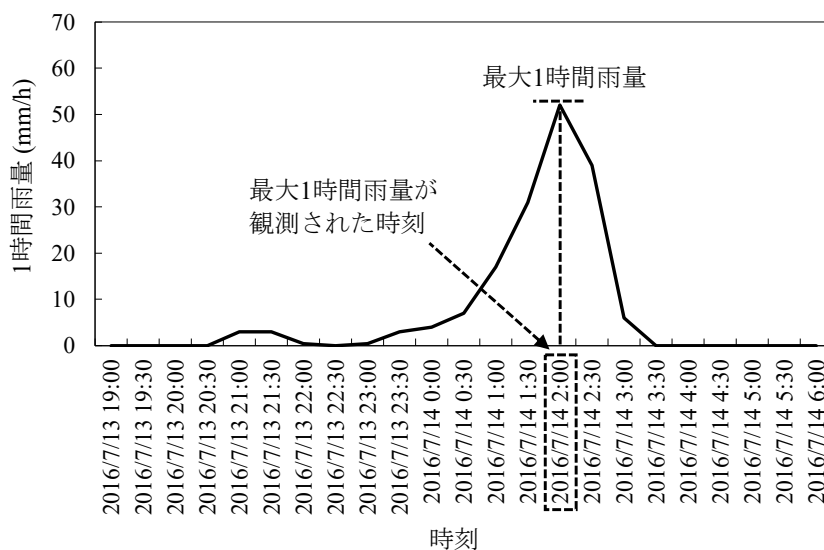


図-5.13 災害地点等直上メッシュの 1 時間雨量が最大となった時刻（事例：L3）

まず、降雨量の距離依存性として、図-5.14～図-5.16に前線等の事例 F4、台風の事例 T1、局地的な大雨の事例 L2 の分析結果を示す。これらの図において、降雨量の距離依存性は、2 地点間の距離  $l$  の増加につれて、自己相関係数  $\rho$  が低下しない傾向の場合は低く、低下する傾向の場合は高いと判断する。なお、2 地点間の距離  $l$  は、8 方向の分析結果を比較できる約 20km までとした。

図-5.14 の前線等の事例 F4 については、降雨量の距離依存性が E-W 方向等では比較的低い、N-S 方向等では比較的高く、降雨量の距離依存性は方向によって異なる。図-5.15 の台風の事例 T1 については、前線等の事例 F4 と比較すると、降雨量の距離依存性の各方向におけるばらつきは少ない。図-5.16 の局地的な大雨の事例 L2 については、前線等の事例 F4、台風の事例 T1 と比較すると、降雨量の距離依存性はいずれの方向も著しく高い。

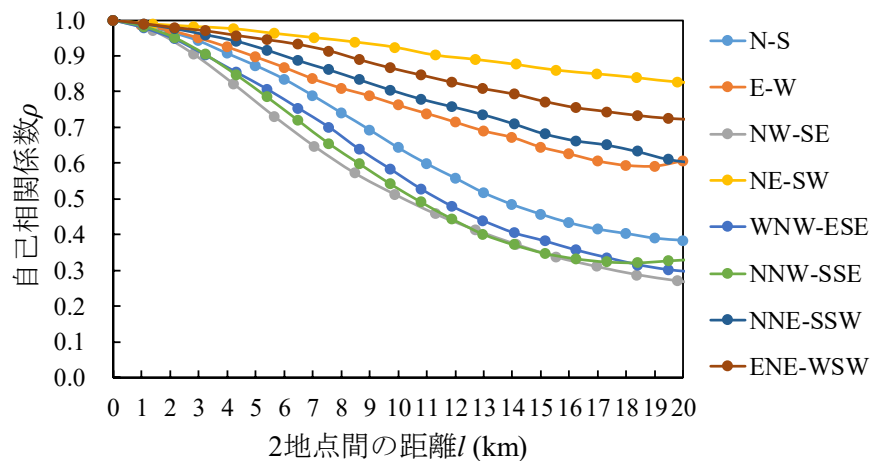


図-5.14 降雨量の距離依存性（前線等の事例：F4，2010年7月14日10時30分）

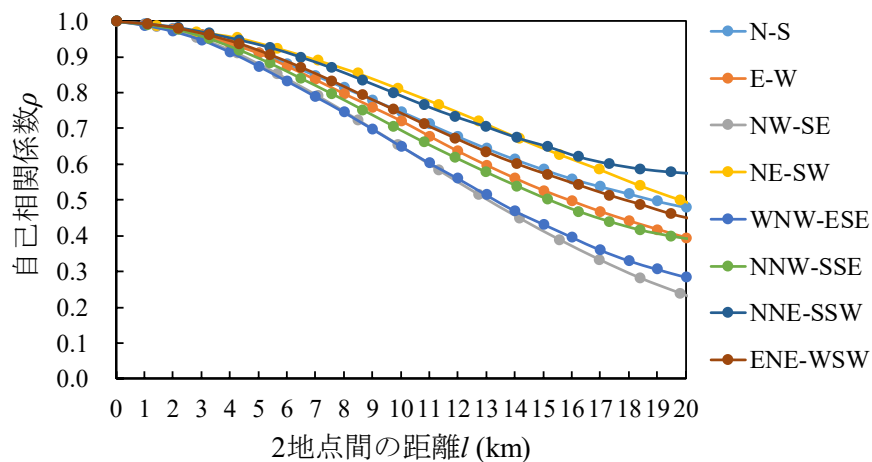


図-5.15 降雨量の距離依存性（台風の事例：T1，2009年8月9日21時00分）

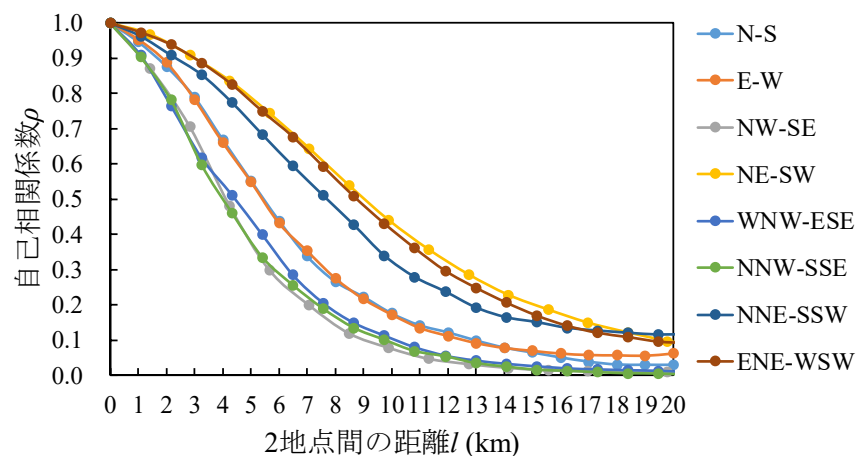


図-5.16 降雨量の距離依存性

(局地的な大雨の事例：L2，2014年9月10日23時30分)

次に，気象区分別の降雨量の距離依存性を分析するために，図-5.17～図-5.19に示すように，全ての事例のデータを気象区分別にプロットした．前線等の全データ（8事例，8方向の計64データ）をプロットした図-5.17と，台風の全データ（5事例，8方向の計40データ）をプロットした図-5.18を比較すると，前線等と台風は，ほぼ同様な傾向であることがわかる．一方，局地的な大雨の全データ（3事例，8方向の計24データ）をプロットした図-5.19をみると，局地的な大雨は，前線等，台風よりも降雨量の距離依存性が著しく高いことがわかる．このように，全ての事例のデータを気象区分別にプロットすることで，気象区分別の降雨量の距離依存性を比較することができた．

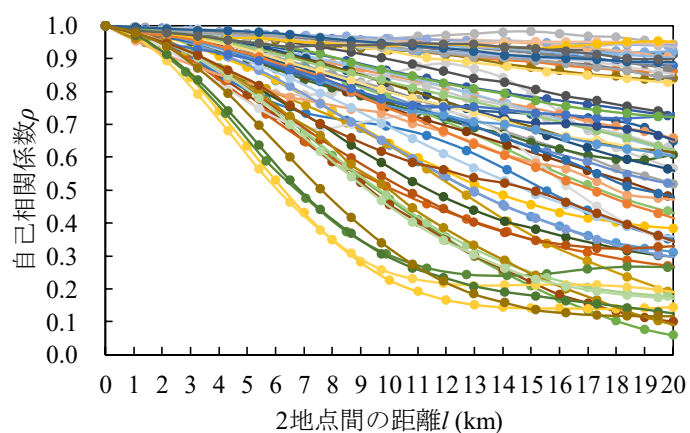


図-5.17 気象区分別の降雨量の距離依存性（前線等，8事例×8方向，計64データ）

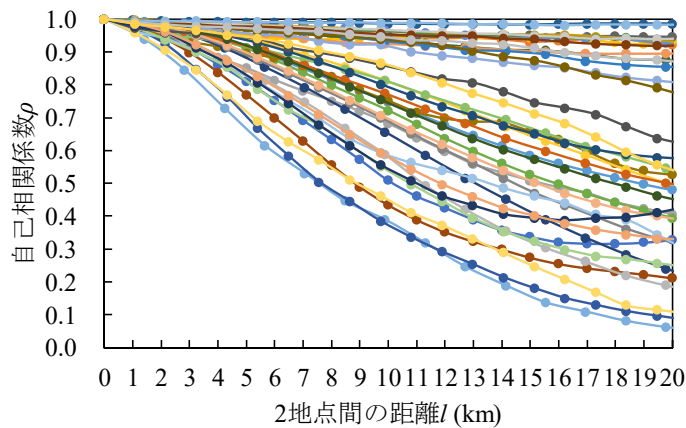


図-5.18 気象区分別の降雨量の距離依存性（台風，5 事例×8 方向，計 40 データ）

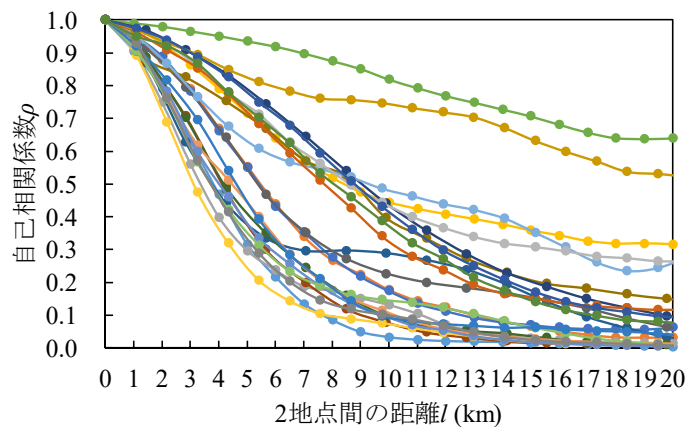


図-5.19 気象区分別の降雨量の距離依存性  
（局地的な大雨，3 事例×8 方向，24 データ）

一方，図-5.14～図-5.16 で示した 3 事例および図-5.17～図-5.19 で示した気象区分別の分析結果からわかるように，方向の違い等によって降雨量の距離依存性にはばらつきが生じる．そこで，ここでは，気象区分別における距離ごとの降雨量の距離依存性を図-5.20～図-5.22 のように各事例の 8 方向の平均値で示した．すなわち，前線等における距離別の自己相関係数  $\rho$  は，8 事例，8 方向の計 64 データの平均値とした．同様に，台風の自己相関係数  $\rho$  は，5 事例，8 方向の計 40 データ，局地的な大雨の自己相関係数  $\rho$  は，3 事例，8 方向の計 24 データの平均値とした．なお，ここでは，2 地点間の距離  $l$  と自己相関係数  $\rho$  との関係を，多項式による近似曲線で示し，自己相関係数  $\rho$  が 0.7，0.8，0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  を確認した．

前線等については，図-5.20 に示すように，自己相関係数  $\rho$  が 0.7，0.8，0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  は，それぞれ約 12.5km，約 8.3km，約 4.2km である．また，台風につい

では、図-5.21 に示すように、自己相関係数  $\rho$  が 0.7, 0.8, 0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  は、それぞれ約 12.8km, 約 8.8km, 約 4.7km である。局地的な大雨については、図-5.22 に示すように、前線等、台風と比較すると降雨量の距離依存性は著しく高く、自己相関係数  $\rho$  が 0.7, 0.8, 0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  は、それぞれ約 3.0km, 約 1.9km, 約 0.9km である。

以上のように、災害地点等最大降雨時における降雨量の距離依存性は、局地的な大雨、前線等、台風の順に高く、また、局地的な大雨では、台風、前線等と比較して急激に高くなる。

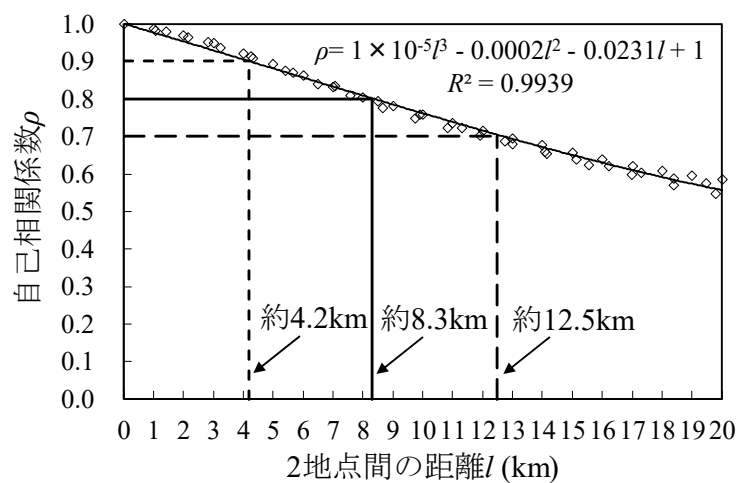


図-5.20 気象区分別の降雨量の距離依存性  
(前線等, 8 事例×8 方向, 64 データの平均値)

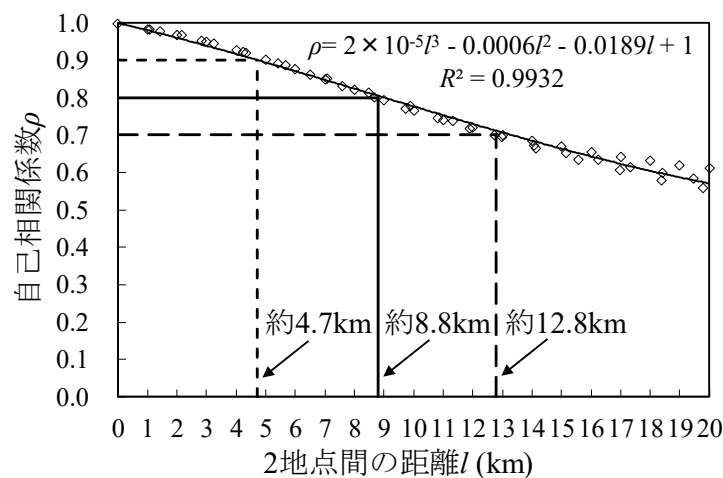


図-5.21 気象区分別の降雨量の距離依存性  
(台風, 5 事例×8 方向, 40 データの平均値)

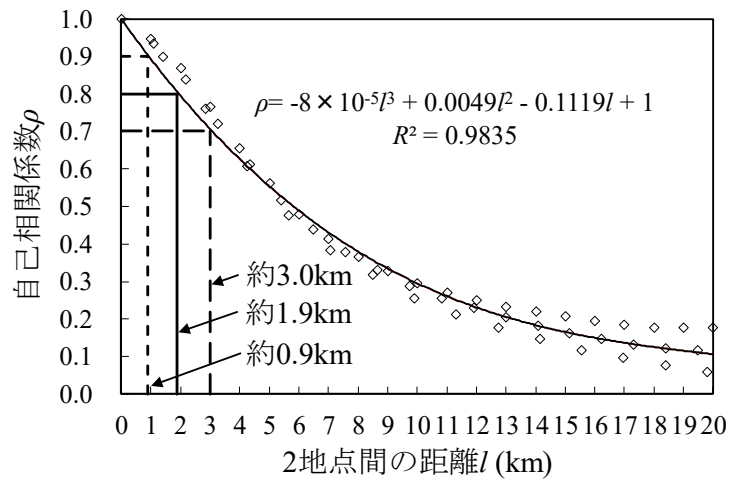


図-5.22 気象区分別の降雨量の距離依存性

(局地的な大雨, 3 事例×8 方向, 24 データの平均値)

### 5.5.3 降雨の経時変化を考慮した分析

5.5.2 では, 災害地点において 1 時間雨量が最大となった時刻に着目して, 降雨量の距離依存性を分析した. しかしながら, 降雨は, 図-5.23 に示すように, 時間の経過とともに, その雨域や降雨量を変化させながら移動するため, 降雨時運転規制は, こうした雨域や降雨量の変化に応じて実施する必要がある. そこで, 本節では, 災害地点等最大降雨時の前後の時刻の降雨も考慮した分析を行う. 分析に用いる降雨は, 降り始めから降り終わりまでの一連の降雨のうち, 約 40km 四方の分析対象範囲において, 1 時間に 10mm/h 以上の降雨量が観測されたものとした.

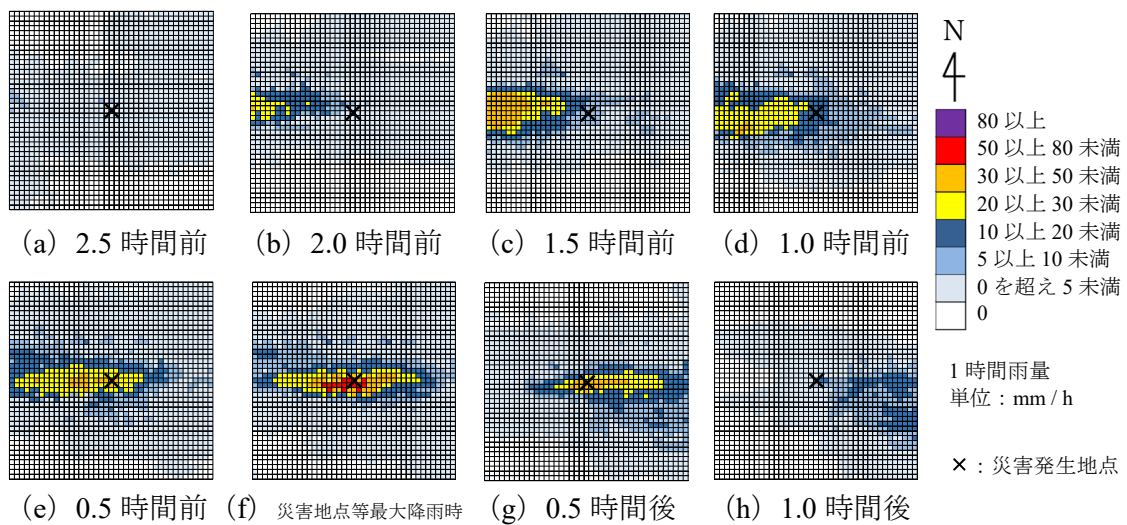


図-5.23 降雨の経時変化

(局地的な大雨の事例 L3, 災害地点等最大降雨時 2016 年 7 月 14 日 2 時 00 分)



図-5.24 に、災害地点等最大降雨時を基準時刻として、これらの降雨が観測された時間を示す。ここで、1 時間雨量を 10mm/h と仮定した理由は、最大 1 時間雨量が 16mm/h の降雨で土砂流入・土石流が発生した事例（図-5.24，事例 T2）があったためである。

なお、各時間における降雨量の距離依存性の分析結果は、5.5.2 の災害地点等最大降雨時における降雨量の距離依存性と同様に、個々の事例の自己相関係数  $\rho$  の平均値で示す。しかしながら、図-5.24 に示すように、分析対象の事例のなかには、1 時間に 10mm/h 以上の降雨が長く降り続いた事例もあることから、事例数が極端に少ない時間における分析では、一つの事例が、気象区分別の分析結果に大きな影響を与えてしまう。例えば、前線等において、災害地点等最大降雨時より 15 時間前における分析は、事例 F8 の一事例で分析することになる。そこで、本節では、気象区分別に半数以上の事例で分析した結果を比較的精度が高いものと仮定し、それらの結果を示す。つまり、前線等では、8 事例のうち 4 事例以上で分析した結果、すなわち、図-5.24 に示すように、災害地点等最大降雨時の 9.5 時間前から 4.5 時間後までの分析結果を示す。同様に、図-5.24 に示すように、台風については、5 事例のうち 3 事例以上で分析した 6.0 時間前から 3.0 時間後までの結果を、局地的な大雨については、3 事例のうち 2 事例以上で分析した 2.0 時間前から 2.5 時間後までの結果を示す。



図-5.25～図-5.27 に、各時間の分析結果を気象区分別に示す。図-5.25～図-5.27 は、図-5.20～図-5.22 で示した災害地点等最大降雨時の分析結果に、上述した各時間の分析結果を追加したものである。ここで、降雨量の距離依存性が最も高い傾向を示す時間については、2 地点間の距離  $l$  と自己相関係数  $\rho$  との関係を、多項式による近似曲線で示した。また、災害地点等最大降雨時については、図-5.20～図-5.22 で示した多項式による近似曲線を再掲した。

前線等については、図-5.25 に示すように、降雨量の距離依存性が最も高い傾向を示す時間は、災害地点等最大降雨時の 9.5 時間前である。この時間において、自己相関係数  $\rho$  が 0.7, 0.8, 0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  は、それぞれ約 4.6km, 約 2.9km, 約 1.3km である。台風については、図-5.26 に示すように、降雨量の距離依存性が最も高い傾向を示す時間は、災害地点等最大降雨時の 2.0 時間後である。この時間において、自己相関係数  $\rho$  が 0.7, 0.8, 0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  は、それぞれ約 11.6km, 約 6.9km, 約 3.2km である。局地的な大雨については、図-5.27 に示すように、降雨量の距離依存性が最も高い傾向を示す時間は、災害地点等最大降雨時であり、この時間において、自己相関係数  $\rho$  が 0.7, 0.8, 0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  は、それぞれ約 3.0km, 約 1.9km, 約 0.9km である。なお、局地的な大雨については、いずれの時間においても、降雨量の距離依存性は著しく高い。これは、局地的な大雨の雨域が狭いため、比較的距離の短い 2 地点においても、同程度の降雨量が観測されにくいためであると考える。

以上のように、降雨の経時変化を考慮した分析結果によると、降雨量の距離依存性は、局地的な大雨、前線等、台風の順に高い。

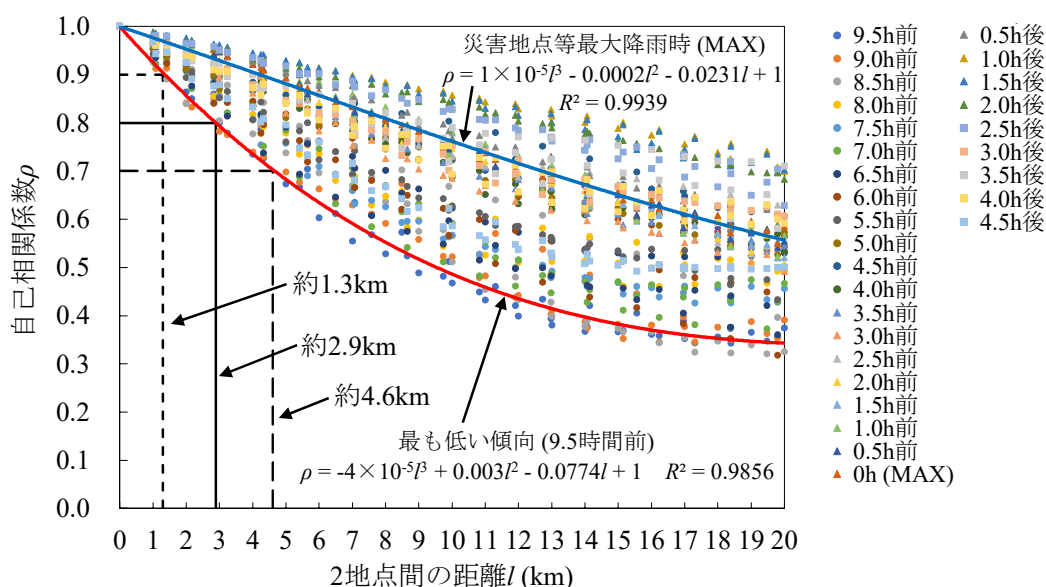


図-5.25 降雨の経時変化を考慮した降雨量の距離依存性（前線等）

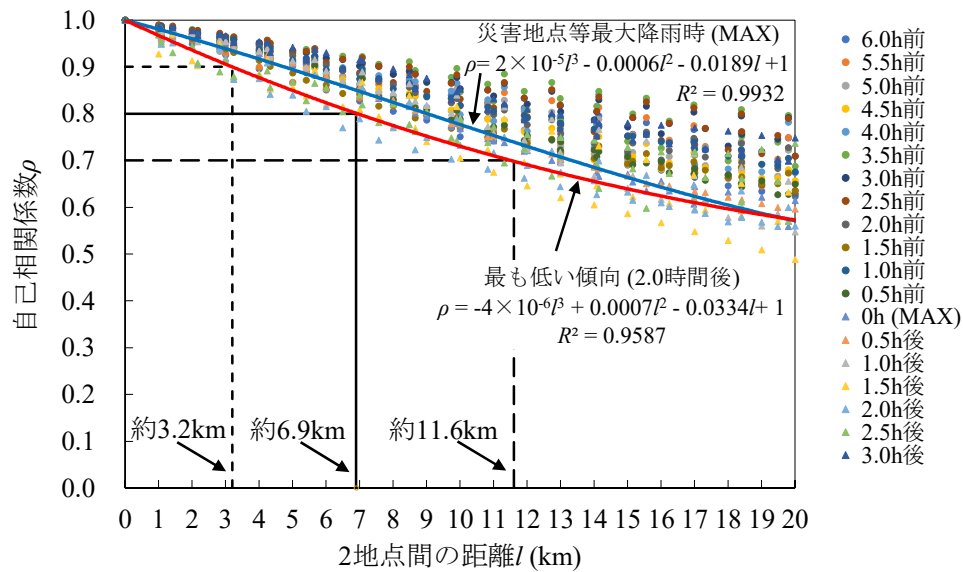


図-5.26 降雨の経時変化を考慮した降雨量の距離依存性（台風）

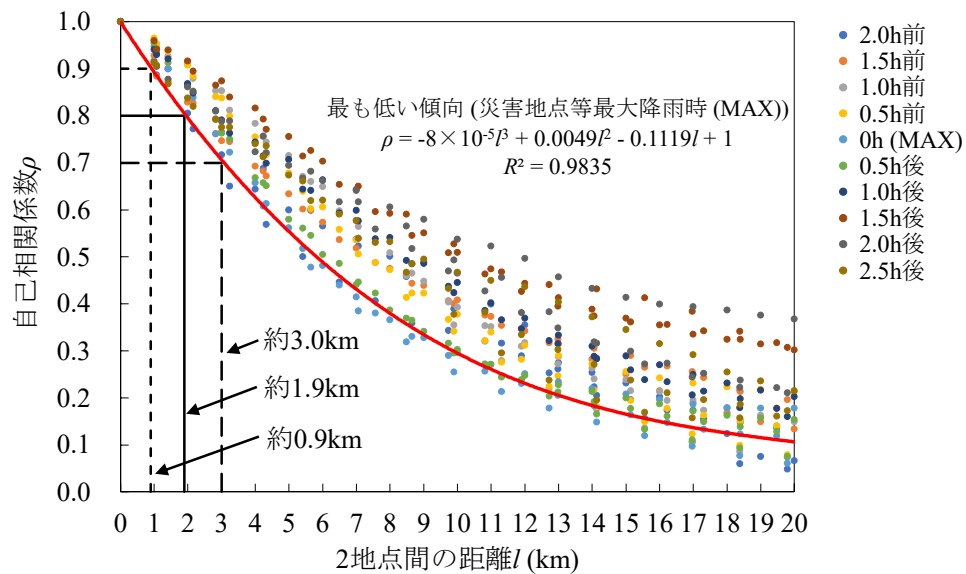


図-5.27 降雨の経時変化を考慮した降雨量の距離依存性（局地的な大雨）

#### 5.5.4 面的な分析結果

本節では、降雨量の距離依存性を面的に示し、分析することを試みた。具体的には、自己相関係数 $\rho$ を面的な分布として示し、降雨量の面的な分布と比較した。なお、自己相関係数 $\rho$ を面的な分布として示すために、8方向の自己相関係数 $\rho$ のデータを用いて、その間のメッシュのデータを補間した。

図-5.28～図-5.33に、気象区分別に降雨量と降雨量の距離依存性の面的な分布を比較した例を示す。これらの例は、いずれも災害地点等最大降雨時のものである。降雨量の距離依存性の図において、その中心の自己相関係数 $\rho$ は1.0である。また、ある方向への中心からの距離が、同じ方向における2地点間の距離 $l$ を示している。例えばN-S方向であれば、図の中心からN方向、S方向にそれぞれ5km離れた地点の自己相関係数 $\rho$ の値は、N-S方向において、5km離れた2地点の自己相関係数 $\rho$ の値を示している。

図-5.28、図-5.29に示すように、前線等については、自己相関係数 $\rho$ が0.8以上となるような範囲が、約40km四方の範囲においてある方向に細長く卓越して分布している。これは、前線等の雨域が、同じ方向に卓越していたためであると考えられる。図-5.30、図-5.31に示すように、台風については、自己相関係数 $\rho$ が0.8以上となるような範囲が、降雨量の分布と同様に中心から全方向に広がっている。図-5.32、図-5.33に示すように、局地的な大雨については、自己相関係数 $\rho$ が0.8以上となるような範囲が、前線等、台風と比較してかなり狭い範囲に限られている。これは、局地的な大雨の雨域が狭いためであると考えられる。

以上のように、自己相関係数 $\rho$ を面的な分布として示すことで、降雨量と降雨量の距離依存性との面的な関係を確認することができた。具体的には、同程度の降雨量の雨域が広いほど、降雨量の距離依存性は低くなる傾向にあることが確認できた。

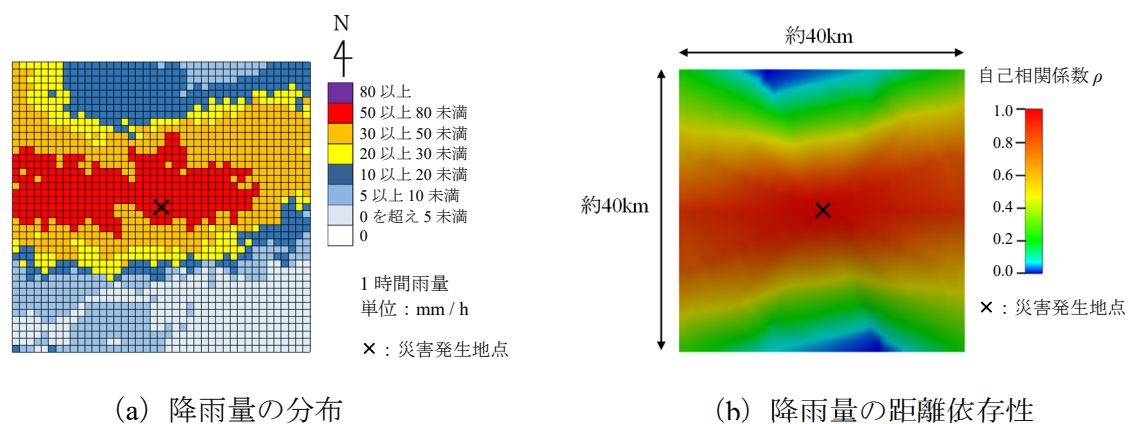
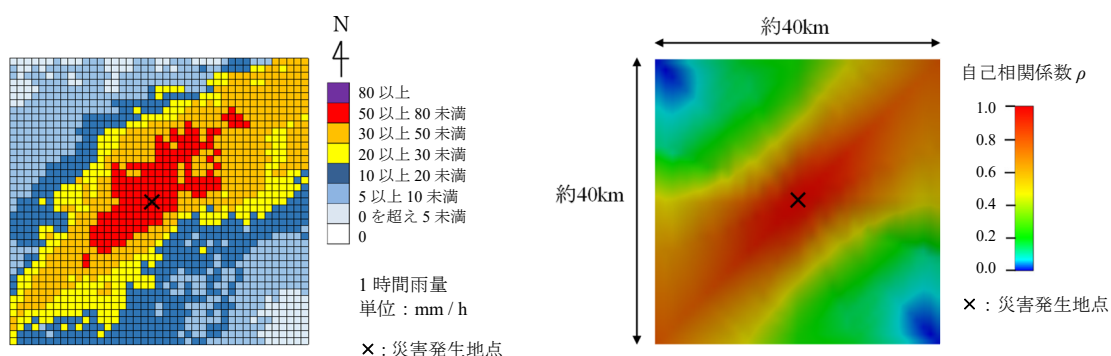


図-5.28 降雨量と降雨量の距離依存性との関係  
(前線等の事例 F1, 2009 年 7 月 21 日 8 時 30 分)

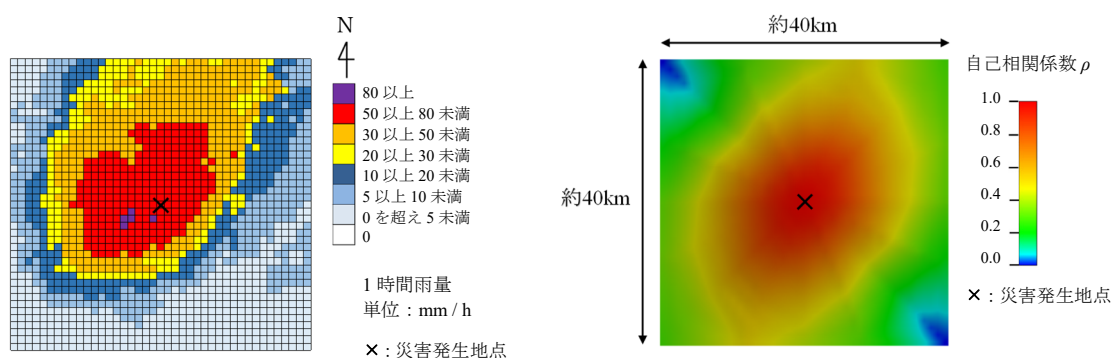


(a) 降雨量の分布

(b) 降雨量の距離依存性

図-5.29 降雨量と降雨量の距離依存性との関係

(前線等の事例 F4, 2010 年 7 月 14 日 10 時 30 分)

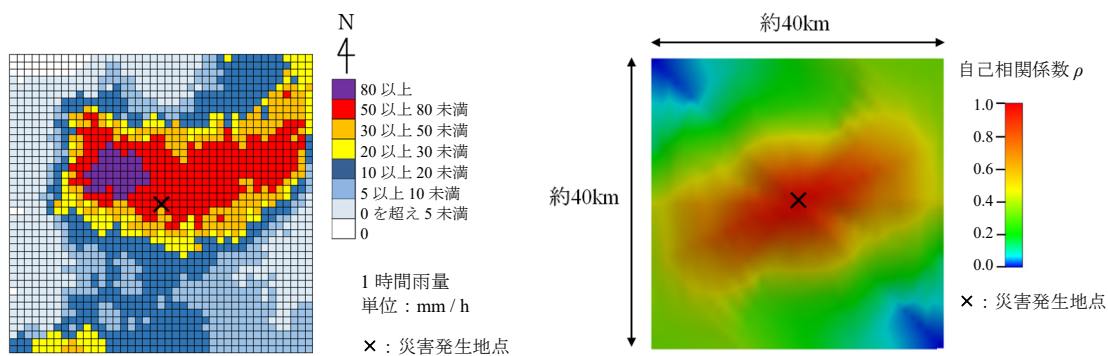


(a) 降雨量の分布

(b) 降雨量の距離依存性

図-5.30 降雨量と降雨量の距離依存性との関係

(台風の事例 T1, 2009 年 8 月 9 日 21 時 00 分)



(a) 降雨量の分布

(b) 降雨量の距離依存性

図-5.31 降雨量と降雨量の距離依存性との関係

(台風の事例 T5, 2014 年 8 月 6 日 6 時 00 分)

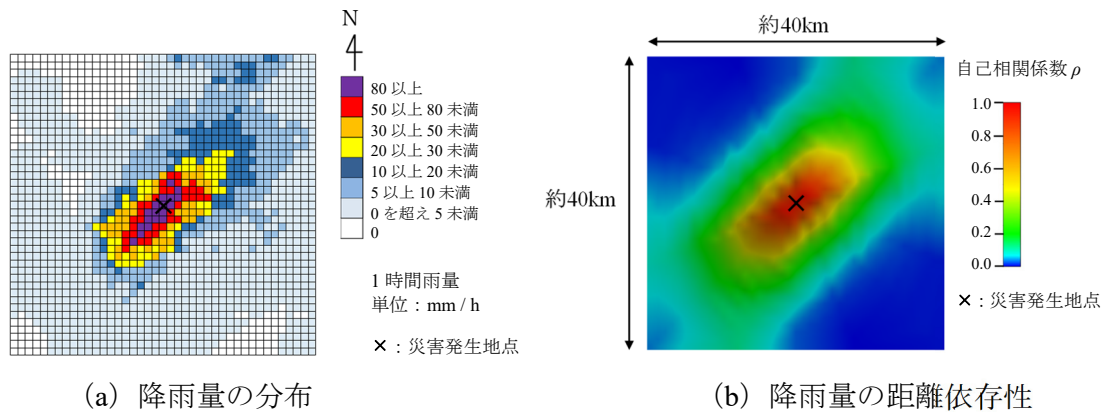


図-5.32 降雨量と降雨量の距離依存性との関係  
(局地的な大雨の事例 L2, 2014 年 9 月 10 日 23 時 30 分)

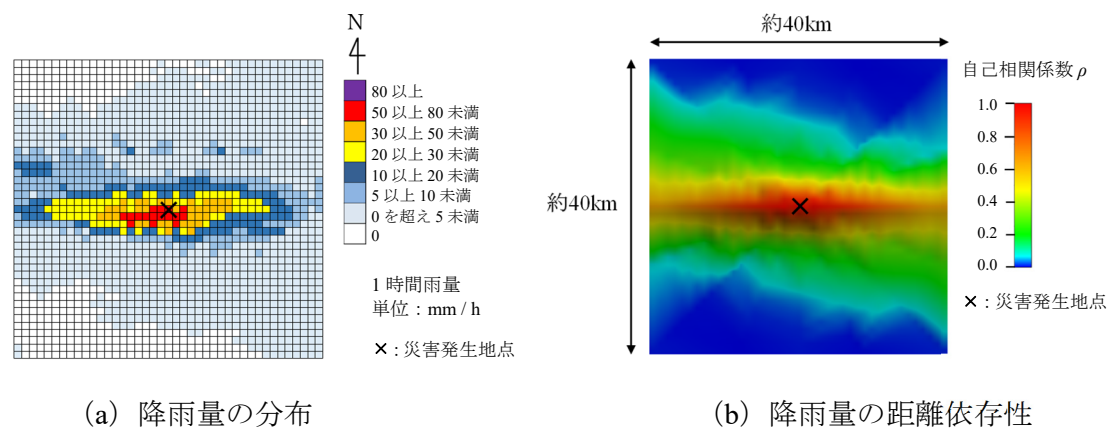


図-5.33 降雨量と降雨量の距離依存性との関係  
(局地的な大雨の事例 L3, 2016 年 7 月 14 日 2 時 00 分)

#### 5.5.5 方向に着目した降雨量の距離依存性

本節では、方向に着目して、降雨量の距離依存性について分析した。具体的には、8 方向における自己相関係数  $\rho$  の大きさを比較し、降雨量の距離依存性が低い傾向を示す方向と、高い傾向を示す方向を分析した。

分析に用いたデータは、5.5.2 の災害地点等最大降雨時の分析において、気象区分別の自己相関係数  $\rho$  が 0.8 以上となったものである。なお、ここでは、2 地点間の距離  $l$  を 0.5km 単位で示した。

8 方向の自己相関係数  $\rho$  を気象区分別に図-5.34～図-5.36 に示す。図-5.34 に示すように、前線等については NW-SE 方向において自己相関係数  $\rho$  が約 0.75 と比較的低く、降雨量の距離依存性が高い。一方で、NE-SW 方向において自己相関係数  $\rho$  が約 0.9 と



比較的高く、降雨量の距離依存性が低い。図-5.35 に示すように、台風については、前線等と同じ傾向である。図-5.36 に示すように、局地的な大雨については、NNW-SSE 方向において自己相関係数  $\rho$  が約 0.75 と比較的低く、降雨量の距離依存性が高い。一方で、ENE-WSW 方向において自己相関係数  $\rho$  が約 0.9 と比較的高く、降雨量の距離依存性が低い。

以上の結果から、降雨量の距離依存性が低い方向は、北東と南西であり、一方で降雨量の距離依存性が高い方向は、北西と南東であることがわかる。これは、分析に用いた降雨の雨域が、北東と南西の方向に比較的卓越して分布していたためであると考える。

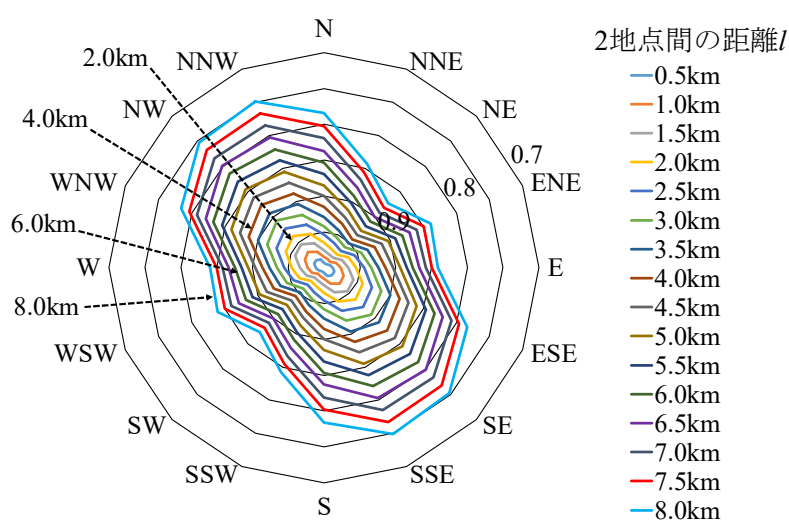


図-5.34 災害地点等最大降雨時における 8 方向別の降雨量の距離依存性（前線等）

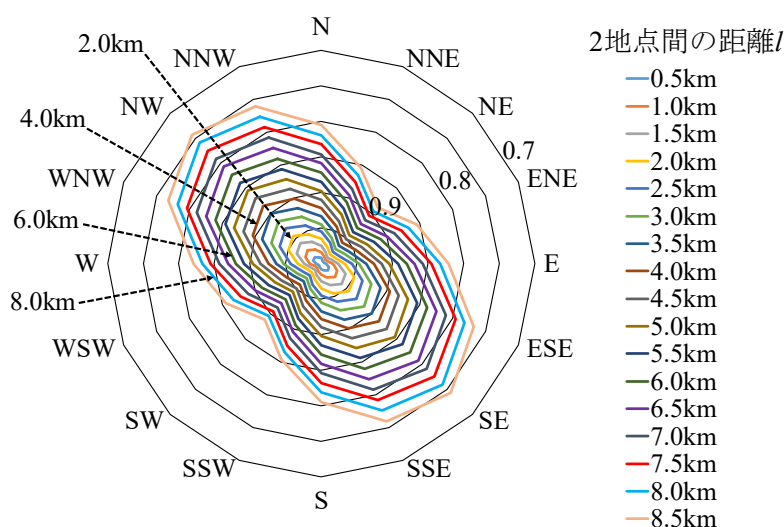


図-5.35 災害地点等最大降雨時における 8 方向別の降雨量の距離依存性（台風）



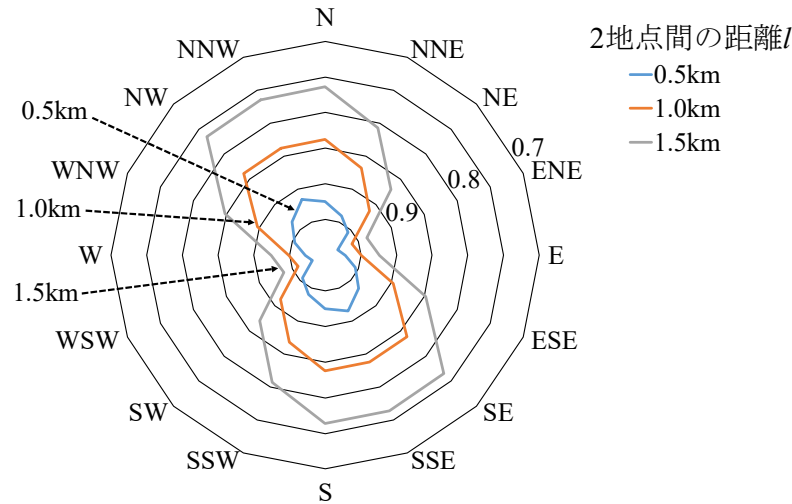


図-5.36 災害地点等最大降雨時における 8 方向別の降雨量の距離依存性  
(局地的な大雨)

## 5.6 土砂流入災害を対象とした降雨モニタリングの提案

5.4 では，災害溪流の流域に着目した分析を行い，災害溪流の流域全体の降雨量を把握するためには，線路から約 1.3km 離れた地点までのメッシュのモニタリングが必要であることを示した。

また，5.5.2，5.5.3 では，気象区分別の降雨量の距離依存性を各事例の平均値で示し，自己相関係数  $\rho$  が，0.7，0.8，0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  を確認した．それらの結果のうち，降雨の経時変化を考慮した 5.5.3 の分析結果を図-5.37，表-5.4 に再掲する．なお，ここでは，降雨量の距離依存性をより安全側の条件で確認するために，平均値- $1\sigma$  の値を用いることを考え，追加の分析を行った．図-5.37，表-5.4 には，気象区分別の降雨量の距離依存性を各事例の平均値および平均値- $1\sigma$  の値で分析した結果を示す．

平均値で分析した結果，2 地点間の距離  $l$  は，局地的な大雨で自己相関係数  $\rho$  が 0.9 となる場合を除き，約 1.3km 以上となった．また，平均値- $1\sigma$  の値で分析した結果，2 地点間の距離  $l$  は，前線等と局地的な大雨で自己相関係数  $\rho$  が 0.9 となる場合を除き，約 1.3km 以上となった．

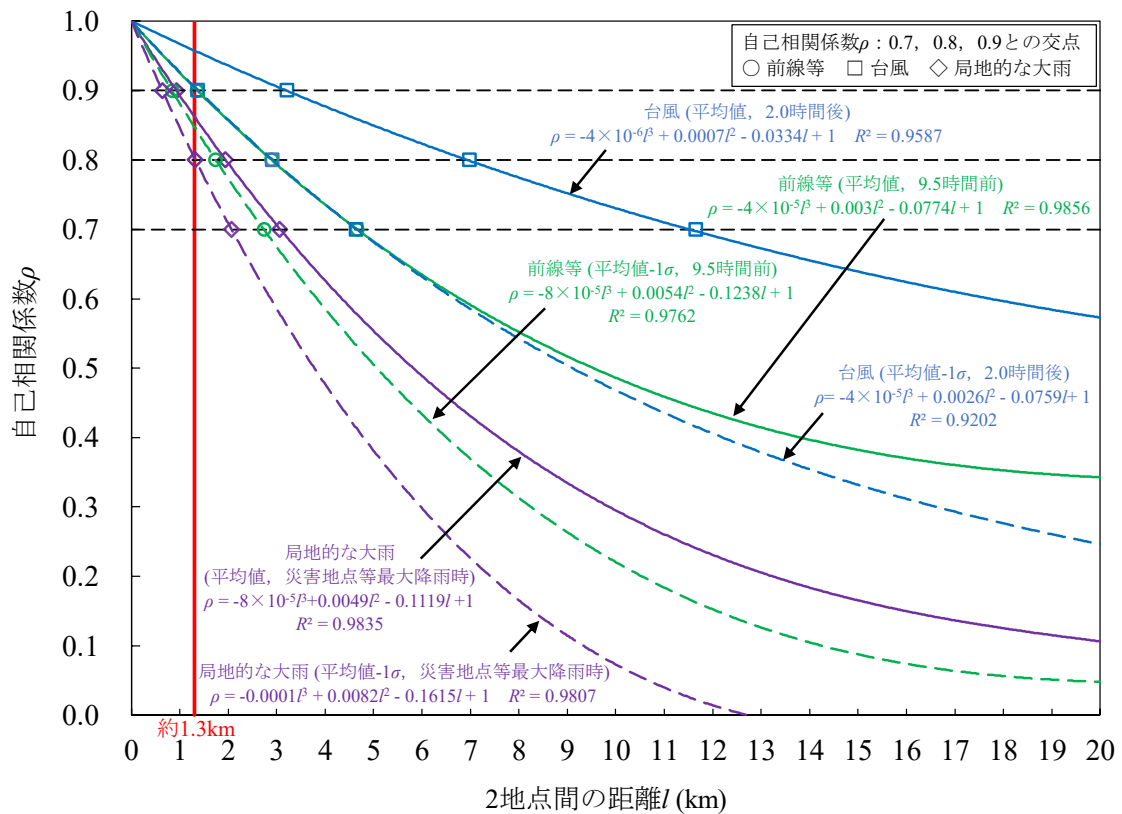


図-5.37 線路から災害溪流の流域までの最遠距離（約1.3km）と気象区分別の降雨量の距離依存性との関係

表-5.4 気象区分別の降雨量の距離依存性

気象区分	自己相関係数 $\rho$					
	0.7		0.8		0.9	
	平均値	平均値-1 $\sigma$	平均値	平均値-1 $\sigma$	平均値	平均値-1 $\sigma$
前線等	約4.6km	約2.7km	約2.9km	約1.7km	約1.3km	約0.8km
台風	約11.6km	約4.6km	約6.9km	約2.9km	約3.2km	約1.3km
局地的な大雨	約3.0km	約2.0km	約1.9km	約1.3km	約0.9km	約0.6km

なお、約1.3km離れた2地点における降雨量が同程度であるかは、2地点で観測された降雨量を比較することで確認できる。そこで、ここでは、災害地点等最大降雨時における16事例（表-5.3）のデータを用いて、約1.3km離れた2地点の降雨量の差を確認した。具体的には、災害地点等直上メッシュの降雨量と、災害地点等直上メッシュ内の地点から約1.3km離れた地点を概ね包含する災害地点等直上メッシュの隣接メッシュ（以下、隣接メッシュという）の降雨量との差を確認した。

図-5.38 (a) は、災害地点等直上メッシュの降雨量と各隣接メッシュの降雨量との差を、16事例の平均値と標準偏差で示したものである。ここでは、災害地点等直上メッシュの値を基準値として計算している。図-5.38 (b) は、降雨量の差を絶対値とし、16事

例の平均値と標準偏差を算出したものである。図-5.38 (a) に示すように、災害地点等直上メッシュの降雨量と隣接メッシュの降雨量との差の最大値は、平均値でみると約-6mm/h である。なお、8 方向すべてのデータ（16 事例、8 方向の計 128 データ）で分析した結果、平均値は-4mm/h、標準偏差は 11.47mm/h である。また、図-5.38 (b) に示すように、降雨量の差を絶対値とした場合には、差の最大値は、平均値でみると約 12mm/h である。なお、8 方向すべてのデータ（16 事例、8 方向の計 128 データ）で分析した結果、平均値は 8mm/h、標準偏差は 9.30mm/h である。

上記の結果より、事例や方向によってばらつきはあるものの、災害地点等直上メッシュの降雨量と隣接メッシュの降雨量との差は、約 10mm/h 以内にほぼ収まっている。なお、表-5.3 で示したように、災害地点等最大降雨時に災害地点等直上メッシュで観測された降雨量が 50mm/h 以上であった事例は 16 事例のうち 11 事例であり、災害地点等直上メッシュの降雨量と隣接メッシュの降雨量との差は、分析に用いた事例の降雨量と比較した場合に小さい。

このように、本論文における分析結果によると、約 1.3km 離れた 2 地点においては、降雨量の距離依存性は低く、同程度の降雨量が観測されているといえる。すなわち、線路直上メッシュの降雨をモニタリングすることによって、線路から最大で約 1.3km 離れた災害溪流の流域全体の降雨量を概ね評価できる可能性がある。

なお、鉄道に限らず、線状に降雨量が観測されており、観測線から約 1.3km 離れた場所までを保全対象とする場合には、この結果を適用することもできる。

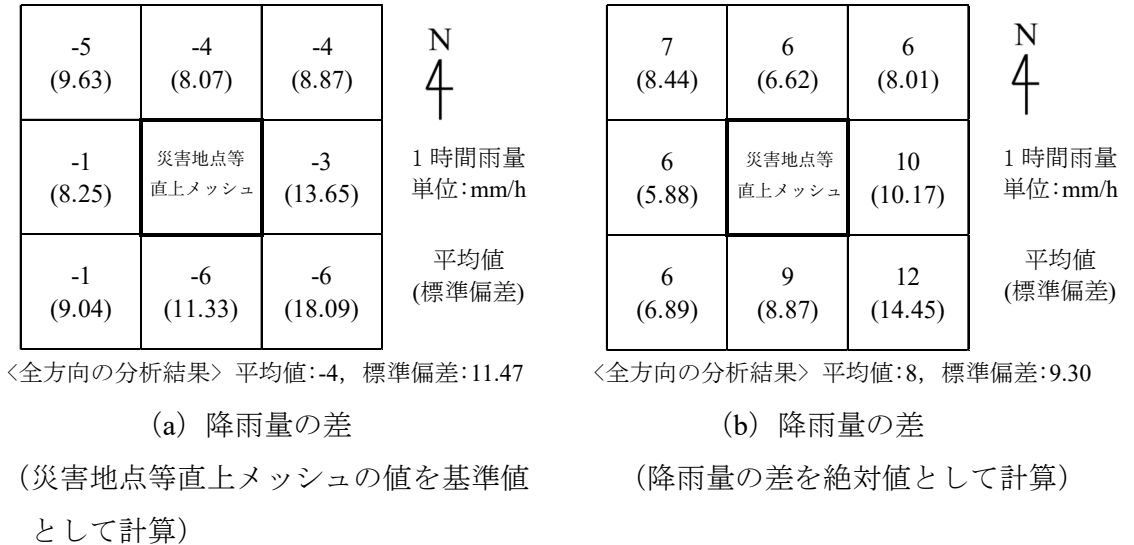


図-5.38 災害地点等最大降雨時における災害地点等直上メッシュと隣接メッシュとの降雨量の差（16 事例の平均値および標準偏差）

## 5.7 本章のまとめ

本章では、鉄道における降雨時運転規制方法および鉄道沿線における局地的な大雨の発生状況等について示した。また、解析雨量を降雨時運転規制に利用する場合、線路からどの程度離れた範囲まで降雨量をモニタリングする必要があるかを明らかにした。具体的には、過去に発生した土砂流入・土石流の事例等に基づき、溪流の流域面積や線路から流域までの距離を分析した。さらに、災害時の降雨の面的な距離依存性に着目した分析を行い、適切な降雨モニタリングの範囲を提案した。

本章で得られた主な成果は、次のとおりである。

- 1) 災害溪流の流域において、線路から直角方向に最も距離が離れる箇所までの直線距離は、1.3km よりも短い。
- 2) 災害溪流の流域面積は、1.0km<sup>2</sup> 未満である。
- 3) 災害地点等直上メッシュにおける 1 時間雨量が最大となった時刻において、1 時間雨量の距離依存性を分析した。具体的には、前線等、台風、局地的な大雨の 3 つの気象区分別に、各事例の平均値で示した自己相関係数  $\rho$  が、0.7、0.8、0.9 となる 2 地点間の距離  $l$  を確認した。その結果、降雨量の距離依存性は、局地的な大雨、前線等、台風の順に高い。
- 4) 降雨の経時変化を考慮して、3)と同様の方法で 1 時間雨量の距離依存性を分析した結果、降雨量の距離依存性は、局地的な大雨、前線等、台風の順に高い。
- 5) 自己相関係数  $\rho$  を面的な分布として示すことで、降雨量と降雨量の距離依存性ととの面的な関係を確認することができた。具体的には、同程度の降雨量の雨域が広いほど、降雨量の距離依存性は低くなる。
- 6) 4)の分析に加えて、各事例の平均値-1 $\sigma$  の値で、3 つの気象区分別の降雨量の距離依存性を分析した結果、約 1.3km 離れた 2 地点においては、降雨量の距離依存性は低く、同程度の降雨量が観測されていることがわかった。
- 7) 災害地点等最大降雨時における前線等、台風、局地的な大雨の 16 事例の 1 時間雨量を用いて、約 1.3km 離れた 2 地点では、概ね同程度の降雨量が観測されていることを確認した。
- 8) 本論文の分析により、線路直上メッシュの降雨をモニタリングすることで、線路から最大で約 1.3km 離れた災害溪流の流域全体の降雨量を概ね評価できる可能性があることを示した。

本章では、鉄道の降雨時運転規制に、解析雨量を用いる場合における降雨モニタリングの範囲について検討した。その結果、線路直上メッシュの解析雨量を用いて降雨時運

転規制を行うことは、線路沿線の盛土や切土等の鉄道構造物の不安定化に起因する災害だけでなく、線路から離れた溪流を発生源とする土砂流入・土石流に対しても効果的であることが示唆された。

なお、解析雨量は、気象レーダの観測値を地上に配置されたアメダス等の雨量計の観測値で補正して作成するため、地上の雨量計が少ない地域では、実際の降雨量との誤差が大きくなる可能性がある。そのため、解析雨量を降雨時運転規制に導入する場合には、こうした課題を踏まえ、導入区間等を検討する必要もある。

また、ここでは、約 1km 四方の解像度により、約 40km 四方の範囲の降雨分布を分析した結果から、約 1.3km という短い距離のしきい値について述べており、分析における解像度と降雨分布の大きさに課題が残る。なお、現在では、国土交通省が高解像度の面的雨量情報として、約 250m メッシュの XRAIN<sup>26)</sup>を配信しており、さらに近年では、局地的な大雨をとらえる観測技術<sup>27)</sup>も進んでいることから、今後は、これらの降雨量データや観測技術を用いて分析を行うことも可能である。

## 第5章の参考文献

- 1) 森泰樹, 佐々木良, 藤井昌隆, 杉山友康, 里深好文: 土砂流入災害をもたらす降雨の空間分布特性と降雨モニタリングに関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.1, pp.1-14, 2019.3.
- 2) 藤井俊茂: 自然災害に対する列車の運転規制, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.1-6, 2007.1.
- 3) 杉山友康: 降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究, 鉄道総研報告, 特別第19号, 1997.
- 4) 日本国有鉄道施設局・運輸局: 降雨による運転規制基準作成要領, 1972.9.
- 5) 布川修: 降雨時鉄道斜面災害の防災対策意思決定方法に関する研究, 東京工業大学博士論文, 2012.6.
- 6) 新川正則: 長雨重点警備箇所の運転規制と災害警備, 鉄道土木, Vol.28, pp.47-51, 1986.6.
- 7) 鈴木博人: 降雨時の列車運転規制のための大雨の空間分布特性を考慮した降雨量の観測方法に関する研究, 京都大学博士論文, 2016.3.
- 8) 垣尾徹, 神野嘉希, 香川清治, 吉村隆一: 降雨に対する運転規制の見直しについて, 土木学会第49回年次学術講演会, IV-114, pp.228-229, 1994.9.
- 9) 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.
- 10) 浜崎明: 豪雨災害に対する JR 九州の新しい試み ―実効雨量方式と3時間雨量―, 日本鉄道施設協会誌, Vol.32, No.9, pp.643-644, 1994.9.
- 11) 森泰樹, 泉並良二: 降雨に対する運転規制, 新線路, Vol.64, No.5, pp.45-47, 2010.5.
- 12) 高馬太一, 泉並良二, 深田隆弘, 杉山友康: 降雨時運転規制における規制値設定方法の検討, 土木学会第67回年次学術講演会, III-309, pp.617-618, 2012.9.
- 13) 高馬太一, 小浦貴明, 森泰樹, 泉並良二: 「在来線における降雨時運転規制基準作成手引き」の制定, 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術資料, Vol.4, pp.48-53, 2015.10.
- 14) 村上直也, 高馬太一, 小浦貴明: 在来線における降雨時運転規制の見直し, JREA, Vol.59, No.6, pp.40478-40481, 2016.
- 15) 松田好史: 鉄道強靱化における JR 西日本の斜面および土構造物の防災・減災の取り組み, 交通と統計, No.56, pp.80-100, 2019.7.
- 16) 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.27, No.6, pp.437-440, 1989.6.
- 17) 岩井三津雄: 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.34,

No.2, pp.136-138, 1996.2.

- 18) 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, 土木学会第 64 回年次学術講演会, IV-195, pp.387-388, 2009.9.
- 19) 高馬太一, 泉並良二, 杉山友康: 部外気象情報を活用した降雨時運転規制に関する検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-083, pp.165-166, 2013.9.
- 20) 佐々木良, 杉山友康: 鉄道線路への土砂流入に対応する降雨モニタリングに関する検証, 第 52 回地盤工学研究発表会, T-04, pp.1871-1872, 2017.7.
- 21) 佐々木良, 藤井昌隆, 森泰樹, 杉山友康: 鉄道における部外気象情報を活用した降雨モニタリング範囲の検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, VI-534, pp.1067-1068, 2017.9.
- 22) 西日本旅客鉄道株式会社: JR 西日本ホームページ安全性向上 災害への対応 気象災害対応システム, <https://www.westjr.co.jp/company/action/technology/technology/03/>, 2019.
- 23) 高橋博, 大八木規夫, 大滝俊夫, 安江朝光: 斜面災害の予知と防災, 白亜書房, pp.201-203, 1986.8.
- 24) 東京大学教養学部統計学教室編: 統計学入門, 東京大学出版会, pp.55-58, 1991.7.
- 25) 気象庁: 全国災害時気象概況, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kishougaikyo/index.html>, 2009-2015.
- 26) 国土交通省: 川の防災情報, <http://www.river.go.jp/x/xmn0107010.php>.
- 27) 中北英一, 西脇隆太, 山邊洋之, 山口弘誠: ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.I\_325-I\_330, 2013.

## 第6章 結論

線路沿線には膨大な数の溪流が存在し、それらの流域は鉄道管理用地外にもおよぶため、危険度評価には多くの時間や困難を伴う。また、溪流には、地形、地質および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等の様々な要因が混在することから、調査者の危険度判断能力によって評価結果にばらつきが生じる可能性がある。その上、必ずしも斜面調査の専門技術者ではない鉄道の現場技術者にとって、溪流の危険度を精度よく評価することは技術的に容易ではない。

そこで本研究では、多くの時間と労力を要せず効率的に、かつ調査者の技術的な危険度判断能力や経験の差による評価結果のばらつきが生じない、精度の高い評価が可能となる評価手法を提案した。また、DEM によるマクロな危険溪流抽出手法について提案した。

離散的に配置された鉄道雨量計の設置間隔は、近年増加傾向にある局地的な大雨の雨域よりも広い場合があるため、鉄道事業者は、気象庁が公表している面的な雨量情報である約 1km 四方の解析雨量を降雨時運転規制に導入することを検討している。解析雨量の利用にあたっては、溪流の流域を発生源とする土砂流入・土石流を防止するために、線路からどの程度離れた位置までの降雨をモニタリングする必要があるかを明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、解析雨量を用いた降雨時運転規制における降雨のモニタリング範囲を提案した。

以下に、各章で得られた知見および成果を示す。

**第1章「序論」**では、研究の背景を示し、本研究の目的は、土砂流入を防止するために、溪流の状態を適切に評価できる手法を作成すること、および解析雨量を利用した降雨時運転規制を行う上で必要な、降雨モニタリングの範囲を提案することであることを述べた。また、関連する既往の研究を概説することで本研究の位置付けを明らかにした。

**第2章「鉄道への土砂流入被害と災害防止の現状と課題」**では、鉄道災害の実態と鉄道における斜面防災対策の現状を明らかにすることで、特に斜面、のり面に関係する災害を防止することが重要であることを述べた。さらに、盛土、切土あるいは線路近傍の斜面の災害発生割合に対して、土砂流入・土石流の発生割合が増加していること、規模の小さな土砂流入であっても重大事故が発生していることを示し、土砂流入を防止することが重要な課題であることを示した。また、土工等設備に対する検査体系や健全度判定の内容、および土工等設備を個々に管理するだけでなく、斜面全体として管理するために JR 西日本が作成しているカルテの概要等について述べた。



加えて、鉄道における降雨時運転規制について概説し、本章の最後に、土砂流入災害を防止するための課題を示した。

**第3章「過去の被災事例分析に基づく線路近傍溪流の危険度評価に関する研究」**では、災害溪流およびこれに隣接する未災害溪流における地形、地質、環境および溪床や溪岸斜面の荒廃状態等のデータを解析した結果から作成した、溪流からの土砂等流出の危険度を評価するための採点表について提案した。なお、解析は、単一あるいはごく少数の劣悪な要因である HRF を有する溪流を除外しなかった場合と除外した場合について行い、これらのうち、解析精度の高かった HRF を有する溪流を除外した場合の解析結果を採点表として提案した。

**第4章「現場技術者のための溪流調査方法と危険度評価手法の提案」**では、溪流の危険度評価は、斜面調査の専門技術者だけでなく、鉄道の現場技術者が行うことを意識し、かつ検査、調査には、線路近傍の範囲に対して行う通常全般検査、カルテ範囲を対象として行う調査があることを踏まえ、それぞれの対象範囲に応じた具体的な危険度評価手法について提案した。

通常全般検査は、現場技術者が線路付近を移動しながら、目視で土工等設備の健全度を把握していく検査であり、時間と労力の制約条件を考慮すると、溪流の危険度を評価するための指標は、比較的容易なものが望ましい。そのため、通常全般検査における危険度評価手法として、写真やビジュアルを用いて簡易に評価できる手法を提案した。

また、カルテ範囲の危険度評価手法は、**第3章**の結果に基づく溪流からの土砂等流出の危険度評価と、流下してきた土砂等が列車運行に与える影響度評価とを組み合わせで行う手法とした。列車運行への影響度評価は、線路と溪床との高さ関係やその高低差、線路上流側平坦地の線路直角方向長さおよび防護設備の対策効果を考慮して行うこととした。必ずしも斜面調査を専門とはしないものの、鉄道沿線の土工等設備を日々検査する能力を持つ現場技術者であれば、本論文で提案した溪流の危険度評価手法を用いることで、多くの時間や労力を要せずに、斜面調査の専門技術者と同等の精度で溪流の危険度を評価することができる。

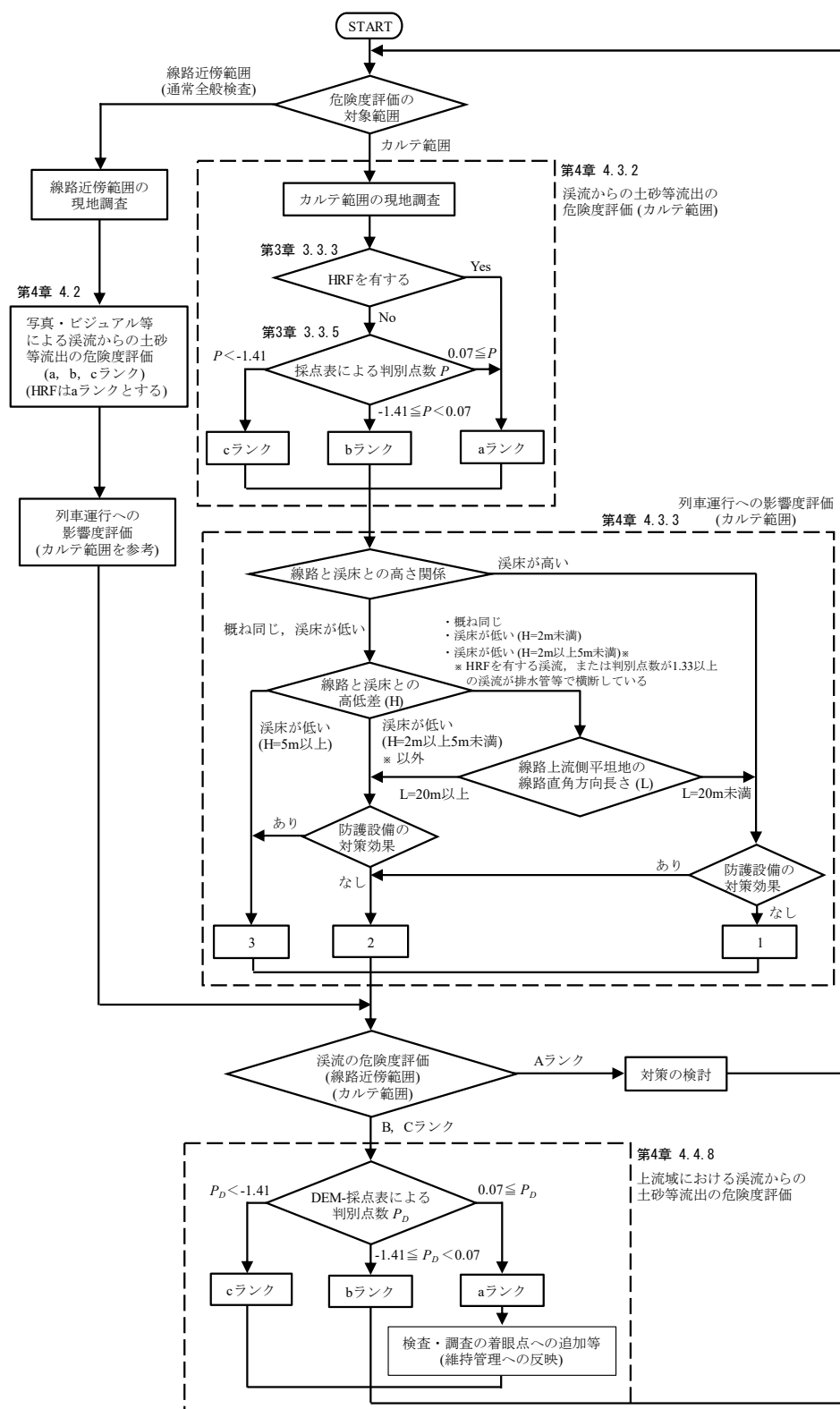
一方、溪流のなかには、カルテ範囲の危険度は低い状態でも、上流域の危険度は高い状態である溪流も存在する可能性がある。このような溪流では、将来、上流域から流下してきた土砂等によって、カルテ範囲の危険度が高まる可能性が高い。そのため、上流域に高い危険度を有する溪流を抽出することも重要であるといえる。そこで、DEM から取得したデータ等を利用して、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度を簡便に評価できる DEM-採点表を、**第3章**で提案した採点表に基づいて作成した。

また、通常全般検査およびカルテ範囲における調査による溪流の危険度評価が、B、

C ランクと低い溪流に対して、DEM-採点表を用いて、上流域における溪流からの土砂等流出の危険度を評価する手法を提案した。

図-6.1 は、第 3 章および第 4 章で述べた溪流の危険度評価に関する研究内容を、フローで示したものである。

第 5 章「土砂流入災害による列車事故防止を対象とした降雨モニタリングに関する研究」では、溪流の流域を発生源とする土砂流入・土石流を防止するために、線路からどの程度離れた位置までの降雨をモニタリングする必要があるかを明らかにした。具体的には、過去に発生した土砂流入・土石流の事例等に基づき、災害溪流の流域において、線路から直角方向に最も距離が離れる箇所までの直線距離は、1.3km よりも短いことを確認した。また、前線等、台風、局地的な大雨の事例の 1 時間雨量を用いて、約 1.3km 離れた 2 地点では、概ね同程度の降雨量が観測されていることを確認した。これらの結果から、線路直上メッシュの降雨をモニタリングすることで、線路から最大で約 1.3km 離れた災害溪流の流域全体の降雨量を概ね評価できる可能性があることを示した。



※ AA(aa)ランクは、列車運行の抑止等、異常時対応に該当するような非常に危険度が高いものの評価であるため、ここでは、フローに含めていない

※ S(s)ランクは、集水地形である溪流には該当しないものと考えて、ここではフローに含めていない

図-6.1 溪流の危険度評価フロー

付属資料（解析に用いた溪流データ一覧）

付表-1 解析に用いた溪流データ（溪流 No.1～No.35，データ 1）

No	線名	駅間 (起点)	駅間 (終点)	災害・未災害	溪床の平均 勾配(度)	溪岸斜面の 平均勾配(度)	流域面積 (km <sup>2</sup> )	溪流の 横断形状	地質	流水の 有無	溪床の 植生量	溪床堆積物の 平均厚さ(m)	溪床の平均 侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	溪床の崩壊 の有無
1	小浜線	栗野	東美浜	未災害	19	35	0.022	U	堆積岩	有	多い	0.5	0	無
2	小浜線	栗野	東美浜	災害	10	10	0.063	U	堆積岩	有	なし	0.5	0.30	無
3	小浜線	小浜	勢浜	災害	22	45	0.027	V	堆積岩	無	なし	0.5	1.00	有
4	小浜線	小浜	勢浜	未災害	35	40	0.006	U	堆積岩	無	なし	0.1	0	無
5	小浜線	若狭本郷	若狭和田	未災害	7	45	0.016	U	堆積岩	有	なし	0.5	0.25	有
6	小浜線	若狭本郷	若狭和田	未災害	7	45	0.016	U	堆積岩	無	多い	0.3	0	無
7	越美北線	越前栗師	越前大宮	未災害	19	20	0.194	U	火成岩	有	多い	0.3	0.15	無
8	越美北線	越前栗師	越前大宮	未災害	31	40	0.047	U	火成岩	有	多い	0.3	0.15	無
9	越美北線	越前栗師	越前大宮	災害	16	45	0.137	U	火成岩	有	少ない	0.5	1.00	無
10	越美北線	越前栗師	越前大宮	未災害	16	40	0.013	U	火成岩	有	多い	1.0	0	有
11	大浜線	平岩	小滝	災害	31	45	0.087	V	堆積岩・火成岩	有	なし	1.0	2.25	有
12	大浜線	平岩	小滝	災害	29	35	0.135	V	堆積岩・火成岩	有	なし	1.0	2.25	有
13	紀勢本線	下里	紀伊浦神	未災害	8	50	0.002	V	堆積岩	無	なし	0.3	4.00	無
14	紀勢本線	下里	紀伊浦神	災害	34	45	0.005	V	堆積岩	有	なし	0.3	2.00	有
15	紀勢本線	下里	紀伊浦神	未災害	20	30	0.002	U	堆積岩	無	多い	0.3	0	無
16	山陰本線	下夜久野	上夜久野	未災害	12	40	0.080	U	火成岩	無	多い	0.5	0.25	無
17	山陰本線	下夜久野	上夜久野	災害	18	45	0.080	V	火成岩	有	なし	1.0	3.00	無
18	山陰本線	下夜久野	上夜久野	未災害	17	45	0.107	V	火成岩	有	なし	0.5	1.00	有
19	山陰本線	柴山	香住	災害	8	45	0.174	U	火成岩	有	なし	0.3	0.60	無
20	山陰本線	柴山	香住	未災害	13	30	0.015	U	火成岩	無	多い	0.5	0.25	無
21	福知山線	市島	丹波竹田	未災害	35	35	0.005	U	堆積岩	無	少ない	0.2	0	無
22	福知山線	市島	丹波竹田	未災害	20	40	0.039	U	堆積岩	有	なし	1.0	1.00	無
23	福知山線	市島	丹波竹田	災害	15	40	0.053	U	堆積岩	有	なし	1.5	3.00	無
24	播但線	長谷	生野	災害	24	45	0.021	U	火成岩	有	多い	1.0	2.00	無
25	播但線	青倉	竹田	未災害	9	15	0.016	U	火成岩	有	普通	0.1	0	無
26	播但線	青倉	竹田	災害	9	10	0.051	U	火成岩	有	なし	1.0	1.00	無
27	姫新線	久世	中国勝山	未災害	12	55	0.025	V	火成岩	有	普通	0.5	0.50	無
28	姫新線	久世	中国勝山	災害	15	35	0.013	U	変成岩	有	少ない	0.5	0.50	無
29	姫新線	久世	中国勝山	未災害	15	35	0.028	U	変成岩	有	なし	1.5	3.00	無
30	姫新線	久世	中国勝山	未災害	15	30	0.014	U	変成岩	有	少ない	0.4	0.30	無
31	姫新線	久世	中国勝山	未災害	9	10	0.014	U	変成岩	有	多い	1.0	0.30	無
32	姫新線	久世	中国勝山	未災害	10	35	0.129	U	変成岩	有	多い	1.0	1.00	無
33	津山線	金川	建部	未災害	9	40	0.039	U	堆積岩・変成岩	有	多い	0.5	0.15	無
34	伯備線	備中匹瀨	備中高梁	災害	37	50	0.065	U	変成岩	無	なし	0.5	2.00	無
35	伯備線	広島（信号場）	井倉	未災害	39	60	0.015	V	堆積岩	無	なし	0.5	1.50	無

災害溪流：1976～2016 年度に土砂流入をもたしたことのある溪流（付表-2～付表-6 も同様）

未災害溪流：1976～2016 年度に土砂流入をもたしたことの無い溪流（付表-2～付表-6 も同様）

付表-2 解析に用いた溪流データ (溪流 No.1～No.35, データ 2)

No	線名	駅間 (起点)	駅間 (終点)	渓岸斜面の 崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	線路と渓床との高さ関係 (線路を基準とした渓床 高さ)	線路と渓床との高低差 (線路を基準とした渓床 高さ)	線路上流側平坦地の線路 直角方向長さ (m)	渓床の平均 侵食幅 (m)	渓床の平均 侵食深さ (m)	HRFの 有無
1	小浜線	栗野	東美浜	100	高い	5	0	0	0	無
2	小浜線	栗野	東美浜	0	同じ	0	0	1.0	0.3	有
3	小浜線	小浜	勢浜	100	同じ	0	0	1.0	1.0	無
4	小浜線	小浜	勢浜	0	同じ	0	0	0	0	無
5	小浜線	若狭本郷	若狭和田	0	同じ	0	20	0.5	0.5	無
6	小浜線	若狭本郷	若狭和田	0	高い	3	30	0	0	無
7	越美北線	越前薬師	越前大宮	0	同じ	0	20	0.5	0.3	無
8	越美北線	越前薬師	越前大宮	0	同じ	0	0	0.5	0.3	無
9	越美北線	越前薬師	越前大宮	25	同じ	0	0	1.0	1.0	無
10	越美北線	越前薬師	越前大宮	0	同じ	0	20	0	0	無
11	大糸線	平岩	小滝	100	高い	5	0	1.5	1.5	有
12	大糸線	平岩	小滝	100	高い	5	0	1.5	1.5	有
13	紀勢本線	下里	紀伊浦神	100	高い	3	0	2.0	2.0	無
14	紀勢本線	下里	紀伊浦神	100	高い	5	0	2.0	1.0	無
15	紀勢本線	下里	紀伊浦神	0	同じ	0	30	0	0	無
16	山陰本線	下夜久野	上夜久野	0	同じ	0	10	0.5	0.5	無
17	山陰本線	下夜久野	上夜久野	100	同じ	0	0	2.0	1.5	有
18	山陰本線	下夜久野	上夜久野	0	同じ	0	10	1.0	1.0	有
19	山陰本線	柴山	香住	10	高い	5	0	2.0	0.3	無
20	山陰本線	柴山	香住	0	高い	5	0	0.5	0.5	無
21	福知山線	市島	丹波竹田	0	同じ	0	10	0	0	無
22	福知山線	市島	丹波竹田	10	同じ	0	0	1.0	1.0	無
23	福知山線	市島	丹波竹田	100	同じ	0	0	2.0	1.5	無
24	播但線	長谷	生野	100	同じ	0	0	2.0	1.0	無
25	播但線	青倉	竹田	0	同じ	0	30	0	0	無
26	播但線	青倉	竹田	50	同じ	0	0	1.0	1.0	有
27	姫新線	久世	中国勝山	50	同じ	0	0	1.0	0.5	無
28	姫新線	久世	中国勝山	0	同じ	0	0	1.0	0.5	無
29	姫新線	久世	中国勝山	100	高い	2	0	2.0	1.5	無
30	姫新線	久世	中国勝山	0	高い	5	0	1.0	0.3	無
31	姫新線	久世	中国勝山	100	同じ	0	0	1.0	0.3	無
32	姫新線	久世	中国勝山	100	低い	-2	0	1.0	1.0	無
33	津山線	金川	建部	0	同じ	0	0	0.5	0.3	無
34	伯備線	備中広瀬	備中高梁	100	同じ	0	0	2.0	1.0	無
35	伯備線	広石 (信号場)	井倉	100	高い	5	0	1.5	1.0	有

付表-3 解析に用いた溪流データ (溪流 No.36～No.70, データ1)

No	線名	駅間 (起点)	駅間 (終点)	災害・未災害	渓床の平均 勾配(度)	渓岸斜面の 平均勾配(度)	流域面積 (km <sup>2</sup> )	渓流の 横断形状	地質	流水の 有無	渓床の 植生量	渓床堆積物の 平均厚さ(m)	渓床の平均 侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	渓床の崩壊 の有無
36	伯備線	広石(信号場)	井倉	未災害	35	35	0.014	V	堆積岩	有	なし	0.5	4.50	無
37	伯備線	広石(信号場)	井倉	未災害	35	45	0.013	V	堆積岩	有	なし	0.5	4.00	無
38	芸備線	備中神代	坂根	未災害	15	20	0.003	U	堆積岩	無	多い	0.2	0	無
39	芸備線	備中神代	坂根	未災害	8	20	0.058	U	堆積岩	有	なし	1.5	2.25	無
40	芸備線	道後山	備後落合	災害	17	40	0.300	U	火成岩	有	なし	1.5	3.00	無
41	芸備線	道後山	備後落合	未災害	9	40	0.074	U	火成岩	有	多い	0.2	0.20	無
42	山陰本線	静間	五十猛	未災害	10	40	0.025	U	堆積岩	無	多い	1.0	0.50	無
43	山陰本線	久代	下府	未災害	4	35	0.011	U	堆積岩	無	普通	0.3	0	無
44	山陰本線	折居	三保三隅	未災害	9	10	0.111	U	変成岩	有	多い	1.0	0	無
45	山陰本線	折居	三保三隅	未災害	13	40	0.012	U	変成岩	有	普通	0.1	0.30	有
46	因美線	因幡社	智頭	災害	40	40	0.016	V	堆積岩	無	なし	0.3	0.45	有
47	因美線	因幡社	智頭	未災害	20	35	0.036	U	堆積岩	無	多い	0.2	0	無
48	因美線	因幡社	智頭	未災害	20	30	0.047	U	堆積岩	無	多い	0.2	0	無
49	因美線	因幡社	智頭	未災害	10	40	0.144	U	火成岩	有	なし	0.3	0.60	無
50	因美線	因幡社	智頭	災害	40	40	0.025	V	火成岩	有	なし	0.1	2.00	有
51	木次線	出雲三成	亀嵩	災害	33	50	0.023	V	火成岩	有	なし	1.0	2.00	無
52	木次線	出雲三成	亀嵩	未災害	18	45	0.022	V	火成岩	有	普通	0.1	0.50	無
53	木次線	亀嵩	出雲横田	災害	24	35	0.039	U	火成岩	有	多い	1.0	1.00	有
54	木次線	亀嵩	出雲横田	未災害	10	40	0.010	U	火成岩	無	多い	0.3	0	無
55	木次線	亀高	出雲横田	災害	29	40	0.171	V	火成岩	有	なし	0.3	4.00	有
56	三江線	千金	川平	災害	10	40	0.094	U	火成岩	有	少ない	1.5	1.50	無
57	三江線	川平	川戸	災害	38	50	0.011	U	火成岩	無	少ない	0.3	2.00	無
58	三江線	川平	川戸	災害	49	10	0.017	U	火成岩	無	少ない	1.5	2.25	無
59	三江線	川戸	田津	災害	40	45	0.010	U	火成岩	無	普通	0.3	0.25	無
60	三江線	石見川越	鹿賀	災害	47	50	0.023	V	火成岩	有	なし	0.5	1.00	無
61	三江線	石見川越	鹿賀	災害	25	35	0.053	U	火成岩	無	少ない	1.0	1.00	無
62	三江線	因原	石見川本	災害	19	45	0.019	U	火成岩	有	なし	1.0	3.00	無
63	三江線	木路原	竹	災害	20	45	0.094	U	火成岩	有	少ない	1.0	1.00	無
64	三江線	木路原	竹	災害	25	45	0.112	V	火成岩	有	なし	1.0	3.00	無
65	三江線	木路原	竹	災害	14	45	0.196	U	火成岩	有	なし	0.5	3.00	無
66	三江線	木路原	竹	災害	19	45	0.135	U	火成岩	有	なし	1.0	2.00	無
67	三江線	木路原	竹	災害	38	45	0.022	U	火成岩	有	なし	0.3	2.00	無
68	三江線	乙原	石見築瀬	災害	11	40	0.149	U	火成岩	有	なし	1.0	2.00	無
69	三江線	乙原	石見築瀬	災害	50	40	0.009	V	火成岩	有	なし	0.1	1.00	無
70	三江線	石見築瀬	明塚	災害	30	50	0.034	V	火成岩	有	なし	0.3	0.25	無

付表-4 解析に用いた溪流データ (溪流 No.36～No.70, データ 2)

No	線名	駅間 (起点)	駅間 (終点)	沿岸斜面の 崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	線路と溪床との高さ関係 (線路を基準とした溪床 高さ)	線路と溪床との高低差 (線路を基準とした溪床 高さ)	線路上流側平坦地の線路 直角方向長さ (m)	溪床の平均 侵食幅 (m)	溪床の平均 侵食深さ (m)	HREの 有無
36	伯備線	広石 (信号場)	井倉	100	高い	5	0	3.0	1.5	有
37	伯備線	広石	井倉	0	高い	5	0	2.0	2.0	有
38	芸備線	備中神代	坂根	0	同じ	0	0	0	0	無
39	芸備線	備中神代	坂根	0	同じ	0	0	1.5	1.5	無
40	芸備線	道後山	備後落合	20	高い	5	0	2.0	1.5	無
41	芸備線	道後山	備後落合	25	高い	5	0	1.0	0.2	無
42	山陰本線	静間	五十猛	100	同じ	0	0	1.0	0.5	無
43	山陰本線	久代	下府	0	同じ	0	30	0	0	無
44	山陰本線	折居	三保三隅	100	低い	-2	0	0	0	無
45	山陰本線	折居	三保三隅	0	低い	-2	10	1.0	0.3	無
46	因美線	因幡社	智頭	100	同じ	0	0	1.5	0.3	無
47	因美線	因幡社	智頭	0	同じ	0	5	0	0	無
48	因美線	因幡社	智頭	0	低い	-2	5	0	0	無
49	因美線	因幡社	智頭	100	同じ	0	0	2.0	0.3	無
50	因美線	因幡社	智頭	100	同じ	0	0	2.0	1.0	無
51	木次線	出雲三成	亀嵩	100	同じ	0	0	2.0	1.0	無
52	木次線	出雲三成	亀嵩	100	同じ	0	0	1.0	0.5	無
53	木次線	亀嵩	出雲横田	0	高い	5	0	1.0	1.0	有
54	木次線	亀高	出雲横田	25	同じ	0	0	0	0	無
55	木次線	亀高	出雲横田	100	同じ	0	0	2.0	2.0	無
56	三江線	千金	川平	100	同じ	0	0	1.5	1.0	無
57	三江線	川平	川戸	100	同じ	0	0	2.0	1.0	無
58	三江線	川平	川戸	100	同じ	0	5	1.5	1.5	無
59	三江線	田津	田津	100	同じ	0	0	0.5	0.5	無
60	三江線	石見川越	鹿賀	50	同じ	0	0	1.0	1.0	無
61	三江線	石見川越	鹿賀	0	高い	5	0	1.0	1.0	無
62	三江線	因原	石見川本	100	同じ	0	0	2.0	1.5	無
63	三江線	木路原	竹	100	同じ	0	0	1.0	1.0	無
64	三江線	木路原	竹	100	低い	-2	0	3.0	1.0	有
65	三江線	木路原	竹	100	同じ	0	0	2.0	1.5	有
66	三江線	木路原	竹	100	同じ	0	0	2.0	1.0	有
67	三江線	木路原	竹	100	低い	-2	0	2.0	1.0	有
68	三江線	乙原	石見築瀬	100	同じ	0	0	2.0	1.0	無
69	三江線	乙原	石見築瀬	100	同じ	0	0	1.0	1.0	無
70	三江線	石見築瀬	明塚	100	同じ	0	0	0.5	0.5	有



付表-5 解析に用いた溪流データ (溪流 No.71～No.101, データ 1)

No	線名	駅間 (起点)	駅間 (終点)	災害・未災害	溪床の平均 勾配(度)	溪岸斜面の 平均勾配(度)	流域面積 (km <sup>2</sup> )	溪流の 横断形状	地質	流水の 有無	溪床の 植生量	溪床堆積物の 平均厚さ(m)	溪床の平均 侵食断面積 (m <sup>2</sup> )	溪床の崩壊 の有無
71	三江線	石見築瀬		災害	16	35	0.451	V	火成岩	有	なし	2.0	10.00	無
72	山陽本線	八本松	明塚	未災害	9	5	0.009	V	火成岩	有	なし	0.4	0.40	有
73	芸備線	西三次	瀬野	未災害	23	35	0.089	U	火成岩	有	なし	1.0	1.50	無
74	芸備線	西三次	志和地	災害	22	40	0.066	V	火成岩	有	なし	0.5	6.00	有
75	芸備線	西三次	志和地	未災害	15	35	0.009	U	火成岩	無	少ない	0.1	0.05	無
76	芸備線	西三次	志和地	未災害	8	30	0.068	U	火成岩	有	少ない	0.1	0.05	無
77	芸備線	西三次	志和地	未災害	27	35	0.031	V	火成岩	有	少ない	0.5	0.75	無
78	芸備線	西三次	志和地	未災害	14	30	0.007	U	火成岩	有	なし	0.3	0.09	無
79	呉線	三原	須波	災害	25	40	0.021	U	火成岩	無	なし	1.0	1.00	無
80	呉線	三原	須波	未災害	22	20	0.009	U	火成岩	無	多い	0.1	0	無
81	呉線	須波	安芸幸崎	災害	28	35	0.027	V	堆積岩・火成岩	有	なし	1.0	1.00	有
82	山陰本線	須佐	宇田郷	未災害	28	40	0.005	V	堆積岩・火成岩	有	なし	2.0	4.00	有
83	山陰本線	須佐	宇田郷	未災害	13	35	0.008	U	堆積岩・火成岩	無	普通	0.3	0.09	無
84	山陰本線	須佐	宇田郷	災害	24	45	0.239	U	火成岩	有	なし	2.0	10.00	有
85	山陽本線	神代	大畠	未災害	5	45	0.012	U	火成岩	有	多い	0.1	0.05	無
86	山陽本線	神代	大畠	災害	23	50	0.032	U	火成岩	有	なし	2.0	4.00	有
87	山陽本線	神代	大畠	災害	25	45	0.016	V	火成岩	有	なし	2.0	10.00	有
88	山陽本線	神代	大畠	災害	22	45	0.021	U	火成岩	有	なし	2.0	6.00	有
89	山陽本線	岩田	島田	災害	10	45	0.053	U	火成岩	有	なし	1.0	2.00	有
90	山陽本線	岩田	島田	未災害	5	40	0.011	U	火成岩	無	多い	0.3	0	無
91	山口線	篠目	長門峡	未災害	20	20	0.008	U	火成岩	無	多い	0.1	0	無
92	山口線	篠目	長門峡	災害	15	40	0.079	V	火成岩	有	なし	1.0	2.00	有
93	山口線	船平山	津和野	災害	17	45	0.331	V	堆積岩・火成岩	有	なし	2.0	10.00	無
94	山口線	船平山	津和野	災害	24	45	0.031	U	堆積岩・火成岩	有	なし	1.0	1.00	有
95	山口線	船平山	津和野	災害	20	45	0.145	U	堆積岩・火成岩	有	なし	0.3	0.30	有
96	山口線	船平山	津和野	災害	36	45	0.018	V	堆積岩	有	なし	2.0	3.00	無
97	山口線	船平山	津和野	災害	32	40	0.015	U	堆積岩・火成岩	有	少ない	0.3	0.30	無
98	山口線	船平山	津和野	未災害	27	35	0.004	U	堆積岩・火成岩	無	少ない	0.3	0	無
99	山口線	船平山	津和野	災害	30	40	0.059	U	堆積岩・火成岩	有	なし	1.5	4.50	有
100	山陽新幹線	徳山	新山口	災害	15	45	0.069	V	火成岩	有	少ない	1.0	2.00	有
101	山陽新幹線	徳山	新山口	災害	20	50	0.085	V	火成岩	有	普通	1.0	1.00	無

付表-6 解析に用いた溪流データ (溪流 No.71～No.101, データ 2)

No	線名	駅間 (起点)	駅間 (終点)	溪岸斜面の 崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	線路と溪床との高さ関係 (線路を基準とした溪床 高さ)	線路と溪床との高低差 (線路を基準とした溪床 高さ)	線路上流側平坦地の線路 直角方向長さ (m)	溪床の平均 侵食幅 (m)	溪床の平均 侵食深さ (m)	HRTの 有無
71	三江線	石見築瀬	明塚	100	低い	-7	0	5.0	2.0	有
72	山陽本線	八本松	瀬野	0	高い	10	0	1.0	0.4	無
73	芸備線	西三次	志和地	100	高い	5	0	1.5	1.0	無
74	芸備線	西三次	志和地	100	高い	5	0	6.0	1.0	有
75	芸備線	西三次	志和地	0	同じ	0	10	0.5	0.1	無
76	芸備線	西三次	志和地	30	同じ	0	0	0.5	0.1	無
77	芸備線	西三次	志和地	25	同じ	0	0	1.5	0.5	無
78	芸備線	西三次	志和地	10	同じ	0	0	0.3	0.3	無
79	呉線	三原	須波	100	高い	5	0	1.0	1.0	無
80	呉線	三原	須波	0	同じ	0	0	0	0	無
81	呉線	須波	安芸幸崎	100	同じ	0	0	1.0	1.0	無
82	山陰本線	須佐	宇田郷	100	同じ	0	30	2.0	2.0	無
83	山陰本線	須佐	宇田郷	0	低い	-2	0	0.3	0.3	無
84	山陰本線	須佐	宇田郷	100	同じ	0	0	5.0	2.0	有
85	山陽本線	神代	大島	0	同じ	0	0	0.5	0.1	無
86	山陽本線	神代	大島	100	同じ	0	0	2.0	2.0	有
87	山陽本線	神代	大島	100	同じ	0	0	5.0	2.0	有
88	山陽本線	神代	大島	100	同じ	0	0	3.0	2.0	有
89	山陽本線	岩田	島田	100	高い	5	0	2.0	1.0	無
90	山陽本線	岩田	島田	0	高い	5	0	0	0	無
91	山口線	篠目	長門峡	0	同じ	0	10	0	0	無
92	山口線	篠目	長門峡	100	同じ	0	0	2.0	1.0	無
93	山口線	船平山	津和野	100	低い	-5	0	5.0	2.0	有
94	山口線	船平山	津和野	100	低い	-5	0	1.0	1.0	無
95	山口線	船平山	津和野	100	同じ	0	20	1.0	0.3	無
96	山口線	船平山	津和野	50	同じ	0	0	2.0	1.5	無
97	山口線	船平山	津和野	0	低い	-2	10	1.0	0.3	無
98	山口線	船平山	津和野	0	低い	-2	5	0	0	無
99	山口線	船平山	津和野	100	低い	-2	0	3.0	1.5	有
100	山陽新幹線	徳山	新山口	100	高い	5	0	2.0	1.0	無
101	山陽新幹線	徳山	新山口	100	高い	5	0	1.0	1.0	無

## 謝辞

本論文は、筆者が、西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室に在籍しながら、立命館大学大学院理工学研究科博士課程後期課程に在学し、鉄道線路への土砂流入災害を防止するための研究を行い、その成果をまとめたものです。

2016年7月14日、西日本旅客鉄道株式会社の芸備線において、土砂流入災害に伴う列車脱線事故が発生しました。この事故を受けて、社外有識者で構成される「斜面防災・土構造物維持管理検討委員会（以下、委員会という）」（委員長：沖村孝 神戸大学名誉教授）から、土砂流入災害の防止という重要課題に対する検討の必要性が指摘されました。筆者は、この課題を検討する機会を得て、本研究を始めました。

本研究を進めるにあたり、立命館大学 里深好文教授には、土石流の基礎および専門知識にとどまらず、分かりやすく伝えるための論文構成や説明の仕方等、多方面にわたりご指導、ご鞭撻をいただきました。また、若い技術者を育てることの大切さもご教授いただき、将来、自分が目指すべき姿を明確に意識することができました。ここに、深甚なる敬意を表するとともに、厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるに際し、立命館大学 小林泰三教授、立命館大学 藤本将光准教授には、論文作成について懇切丁寧にご指導をいただきました。ここに、深く御礼申し上げます。また、大学へ暖かく迎え入れてくださった立命館大学 深川良一特命教授、大学および大学院（博士課程前期課程）において、研究に対する取り組み姿勢をご教授いただきました立命館大学 伊津野和行教授に、心より感謝申し上げます。

京都大学大学院 杉山友康特定教授には、本研究を進めるにあたり、研究の計画段階から論文作成に至るまで終始、ご指導、ご鞭撻を賜りました。また、斜面防災に関して長きにわたり筆者を熱くご指導いただきました。先生のご指導がなければ、これまでの成果を得ることはなかったと確信します。ここに、深甚なる敬意を表するとともに、厚く御礼申し上げます。

沖村孝委員長をはじめ、委員会の各委員の皆様方には、多くのご指導ならびに貴重なご助言を賜りました。鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 太田直之博士、布川修博士には、委員会および委員会を支える組織である分科において、多くのご助言をいただきました。ここに、厚く御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたって、西日本旅客鉄道株式会社の多くの上司、同僚の皆様にお世話になりました。

構造技術室 技術顧問 松田好史博士には、大学において本研究を行う機会を与えていただき、また、論文作成のご指導と多くの暖かい励ましのお言葉を賜りました。構造技術室 室長 村田一郎博士には、論文作成のご指導を賜るとともに、ご自身のご経験も踏

まえた貴重なご助言をいただきました。構造技術室 斜面・土構造 課長 藤井昌隆氏（現株式会社レールテック）には、博士号の取得について多くのご助言をいただき、またデータ分析、論文作成において貴重なご指導を賜りました。構造技術室 斜面・土構造 課長 細岡生也氏には、論文作成のご指導ならびに研究成果の実務適用へのご助言をいただくとともに、業務と研究の両輪の筆者を常にお気遣いいただきました。構造技術室 斜面・土構造 佐々木良氏（現広島土木技術センター 係長）には、降雨モニタリングの雨量分析において多くのご協力をいただきました。構造技術室 斜面・土構造 阪東聖人氏（現広島土木技術センター 係長）、渥美知宏氏、衛藤一平氏には、筆者が研究を進めるにあたり、グループ内の業務等のご協力を得ました。施設部 土木課 担当課長 荒巻智博士には、論文作成にあたり、災害分析等について多くのご指導を賜りました。

構造技術室の皆様には、論文作成や国際学会への参加等のあらゆる場面でご協力をいただきました。施設部 土木課、施設技術室、新幹線施設部 土木課の関係者各位には、資料の提供や実務適用への調整において終始ご協力を賜りました。また、データ取得のための現地調査においては、支社および土木技術センターをはじめとする現業機関の関係者各位に多大なるご協力をいただきました。

ここに、皆様に対して、厚く御礼申し上げます。

アジア航測株式会社 臼杵伸浩氏、岡野和行氏、牧澄枝氏、棚野博氏、塚本峻一氏には、DEM を用いた評価手法の作成において、献身的なご協力を賜りました。また、株式会社レールテックの関係者各位には、評価手法の現地試行において多大なるご協力を賜りました。深く感謝申し上げます。

本研究で得られた成果が、激甚化する降雨災害に対する鉄道の安全性向上に貢献できることを切に望みます。

最後に、優しく見守ってくれた、筆者と妻の両親、そして、いつもそばで筆者を気遣ってくれた妻の智子に、深く感謝します。