

気候変動による鉄道沿線の土砂崩壊の将来変化 —関東地方の路線を対象とした解析—

FUTURE CHANGES IN COLLAPSE ON RAIL DUE TO CLIMATE CHANGE —ANALYSIS OF KANTO REGION RAILWAY LINES—

植村 昌一
Shoichi UEMURA

東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒141-0031 東京都品川区西五反田 3-5-8)
E-mail: s-uemura@jreast.co.jp

Key Words: railway, precipitation, climate change, collapse, future prediction

1. はじめに

近年、鉄道では、温室効果ガス排出量の増加による気候変動の影響とみられる降水の量や頻度の増加が顕在化している¹⁾。この傾向は今後も継続するといわれており²⁾、その影響を評価し、対策を講じることは重要な課題である。気候変動による降水の量や頻度の増加が鉄道に及ぼす影響として、降雨に対する列車運転規制発令時間の増加や土砂災害の増加に伴う復旧工事による列車運行停止期間の長期化が考えられる。これらの影響について、植村らは、東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本とする）における鉄道路線（以下、線区とする）を対象とし、温室効果ガスの最大排出に相当する RCP8.5 シナリオに基づく気候モデルによる数値実験の出力データを用いた解析により評価した^{2)~5)}。これらの研究では、土砂崩壊発生数に関しては、土砂崩壊の発生頻度が高い山間線区を対象とした解析により、21 世紀末の現在に対する増加倍率は、東北地域の線区で 2.5 倍、関東地域の内陸の線区で 3.4 倍となることがわかった。一方、土砂崩壊発生数が将来にかけて増加することは、発生頻度が高い山間線区だけで生じる現象ではなく、発生頻度が低い線区でも、問題が顕在化する可能性が考えられる。しかしながら、土砂崩壊の発生頻度が低い線区に対しては、気候変動が土砂崩壊に及ぼす影響は明らかにされていないのが

現状である。そこで本研究では、土砂崩壊の発生頻度が低い線区に着目して、土砂崩壊の将来変化を評価することを目的とした。

本研究では、最初に、気候モデルによる RCP8.5 シナリオに基づく数値実験の出力データを用いて、植村ら⁴⁾⁵⁾が示した手法により、将来期間における降水量（以下、降水量の将来予測値とする）を計算した。次に、植村ら⁵⁾により土砂崩壊の発生頻度が高い線区を対象として構築された降水量による土砂崩壊発生数計算式を基礎として、地形要素を組み入れた土砂崩壊発生数計算式を構築した。次に、土砂崩壊の発生頻度が低い線区に対して、当式に降水量の将来予測値を適用して、将来の土砂崩壊発生数を計算した。最後に、土砂崩壊発生数の現在期間における実績値と将来期間における計算値を比較することで土砂崩壊の将来変化を評価した。なお、現在期間は、鉄道雨量計の観測値が存在する近年の期間として 2000 年 9 月から 2020 年 8 月の 20 年間とした。

2. 対象線区の概要

(1) 対象線区の選定

対象線区は、関東地方における JR 東日本の主要路線として、上下線のそれぞれで 1 時間当たり 1 本以上の特急列車が運行されている線区である中央線区間、東海道線区間、常磐線区間の 3 線区とした。

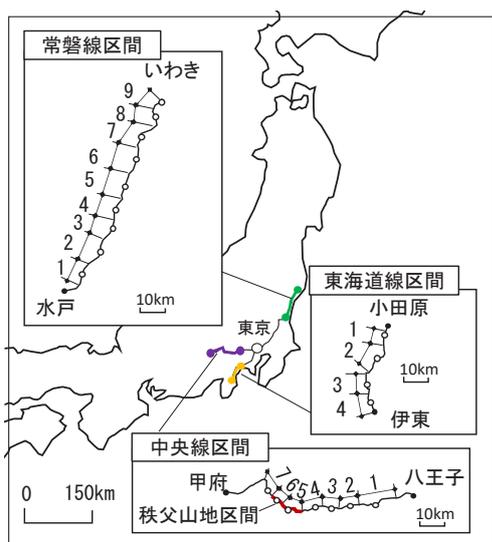


図-1 対象線区的位置図. 各線区の番号は、単位区間番号

中央線区間は、植村ら⁵⁾の研究で土砂崩壊の発生頻度が高い線区として解析対象とされた線区であり、土砂崩壊の発生頻度が低い線区の場合と比較するために検討対象に加えた。東海道線区間と常磐線区間は後述により土砂崩壊の発生頻度が低い線区として位置付けられる。対象線区的位置図を図-1に示す。中央線区間は、東京都の八王子駅から県境の小仏トンネルを経て標高500m以上の山々が連なる山地に挟まれた谷底平野を西進し、秩父山地を越えて山梨県の甲府駅に至る総延長89kmの区間である。東海道線区間は、神奈川県の小田原駅から太平洋沿岸の斜面に沿って南下し、静岡県伊東駅に至る総延長38kmの区間である。常磐線区間は、茨城県の水戸駅から太平洋沿岸の平野を途中で点在する丘陵地を越えて北上し、福島県のいわき駅に至る総延長94kmの区間である。

(2) 土砂崩壊の発生状況

本研究では、列車運行に支障を及ぼした鉄道沿線斜面での降雨による土砂移動現象を土砂崩壊とした。中央線区間では、現在期間での土砂崩壊発生数は、5件であり、鉄道用地外での斜面崩壊により線路への土砂流入に至るケースが多いのが特徴である⁶⁾。東海道線区間では、現在期間での土砂崩壊発生数は0件である。常磐線区間では、現在期間での土砂崩壊発生数は2件で、それぞれ盛土のり肩の崩壊と鉄道用地外での斜面崩壊による土砂流入である。

(3) 鉄道雨量計と単位区間

対象線区では、土砂崩壊から列車の安全を確保す

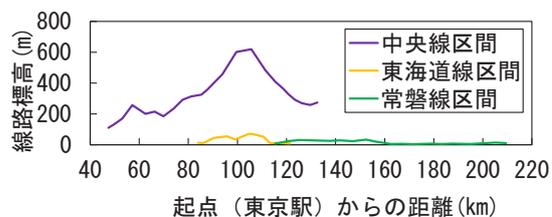


図-2 対象線区の線路標高

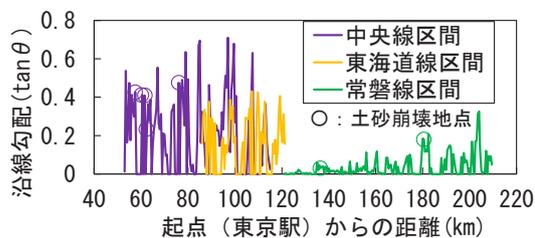


図-3 対象線区の沿線勾配

るために、土砂崩壊が発生する恐れがある区間に対して、約10kmごとに設置された鉄道雨量計が大雨を検知したときに列車運転中止規制が実施される²⁾。鉄道雨量計の受け持ち区間は、鉄道雨量計の設置地点の両側約5kmの延長約10kmの区間を標準としている。本研究では、鉄道雨量計の受け持ち区間を単位区間とし、この単位区間を鉄道雨量計地点での降水量に基づく土砂崩壊発生数の計算の基本単位とする。単位区間数は、図-1に示すように中央線区間で7、東海道線区間で4、常磐線区間で9である。また、中央線区間では単位区間5、6が秩父山地区間に該当する。

(4) 地形・地質

対象線区の線路標高を図-2に示す。中央線区間は内陸にあることから、線路標高は全般的に高く、最高標高は、秩父山地区間での620mである。線路沿線には新・古第三紀層に加えて中生層も分布している。東海道線区間は太平洋沿岸の斜面沿いにあることから、線路標高は全般的に低く、最高標高は71mである。線路沿線には、安山岩が分布している。常磐線区間は太平洋沿岸の平野部にあることから、線路標高は低く、最高標高は33mである。線路沿線には、新第三紀や第四紀の堆積岩が分布している。

次に、土砂崩壊の主たる形態である鉄道用地外での斜面崩壊による土砂流入に関連する地形条件を把握するため、線路横断面の山側方向に線路から300mの範囲もしくはその範囲に尾根がある場合は線路から尾根までの範囲における斜面勾配（以下、沿線勾配とする）を500mピッチで国土地理院地形図により計測し、図-3に示した。沿線勾配の計測範囲を線路から300mの範囲としたのは、森ら⁷⁾において、土

表-1 気候モデル (NHRCM02) と数値実験条件の概要

水平解像度	2km
降雨出力	1時間雨量
過去再現実験	1980年9月-2000年8月: 20年 (過去再現期間)
将来予測実験	2076年9月-2096年8月: 20年 (将来期間)
RCPシナリオ	RCP8.5シナリオ
海面水温の将来変化パターン	EN 熱帯太平洋中～東部での昇温が大きい エルニーニョ的な変化を示す
	C1 熱帯太平洋中～東部での昇温大きい 南北半球間のコントラストが小さい
	C2 ENよりもエルニーニョ的な変化を示す
	C3 熱帯太平洋中～東部での昇温が小さい 南北半球間のコントラストが大きい

砂流入災害が生じた溪流の線路からの流域最遠距離の最頻値が 200~300m であったことに基づいている。また、計測断面がトンネルや橋りょうにあたる場合は、沿線勾配をゼロとした。図-3 中の○印は、土砂崩壊発生地点から最近傍の計測断面での値を示している。図より、沿線勾配は、中央線区間で相対的に大きく、線区平均で 0.20、次いで東海道線区間で大きく、線区平均で 0.16、常磐線区間で最も小さく、線区平均で 0.04 である。このような沿線勾配にみられる地形条件により、土砂崩壊の発生頻度は中央線区間で高く、東海道線区間や常磐線区間で低くなったと考えられる。また、土砂崩壊発生地点から最近傍の計測断面の大部分では、沿線勾配は線区平均値の 2 倍以上と相対的に大きく、沿線勾配は、土砂崩壊ポテンシャルに関与していることが窺える。

3. 降水量の将来予測値の計算方法

(1) 気候モデルの出力データ

降水量の将来予測値の計算には、Murata ら⁸⁾による気候モデル (NHRCM02) を用いた数値実験の降水量出力データを用いた。気候モデルと数値実験条件の概要を表-1 に示す。過去再現実験の出力期間である 1980 年 9 月から 2000 年 8 月の 20 年間で以下、過去再現期間、出力値をモデル再現値とする。また、将来予測実験の出力期間である 2076 年 9 月から 2096 年 8 月の 20 年間で以下、将来期間、出力値をモデル予測値とする。出力データは 1 時間雨量であるが、本研究での解析には日雨量を用いるため、日界 0 時の日雨量データを作成して使用した。数値実験の境界条件となる海面水温には、4 つの将来変化パターン (C1, C2, C3, EN)⁹⁾が用いられている。解析では、鉄道雨量計から最も近い NHRCM02 の格子点における降水量のモデル再現値およびモデル予測値を鉄道雨量計地点での降水量とした。

(2) 計算手順と計算内容

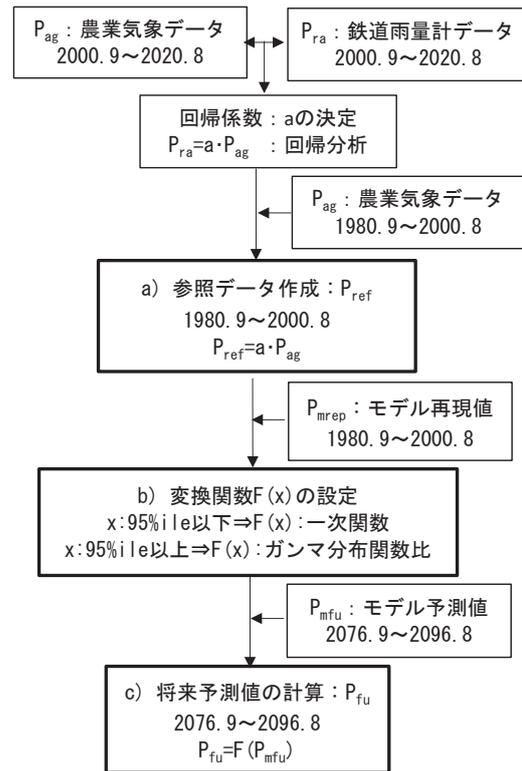


図-4 降水量の将来予測値の計算フロー

降水量の将来予測値は、気候モデル出力値のバイアスを処理することにより求められる。計算処理は、a) 参照データ作成、b) 変換関数の設定、c) 将来予測値の計算の 3 つに大別される。以下に図-4 に示した降水量の将来予測値の計算フローに基づき、計算処理の内容を述べる。

a) 参照データ作成

参照データには、過去再現期間の降水量の観測値を用いるのが一般的であるが、当該期間には、鉄道雨量計の観測データがない。そこで、過去再現期間と現在期間の両方で 1km メッシュ単位の日雨量データが整備されている国立研究開発法人農業・食料産業技術総合研究機構のメッシュ農業気象データ¹⁰⁾ (以下、農業気象データとする) により参照データを作成した。具体的には、まず、現在期間において、鉄道雨量計の観測値と農業気象データの両方の降水量が 50mm 以上の日を対象として回帰係数 a を求めて、次に、過去再現期間の農業気象データに対して、回帰係数 a を乗じることで参照データを作成した。

b) 変換関数の設定

モデル再現値と参照値により変換関数を設定する。変換関数にはモデル予測値が 95 パーセント以下の場合にはモデル再現値と参照値の最小自乗法による回帰式を用いる。モデル予測値が 95 パーセンタ

イル値以上の場合では、モデル再現値と参照値のそれぞれによるガンマ分布関数の比に基づき変換関数を設定した。

c) 将来予測値の計算

降水量の将来予測値は、変換関数に対して、将来期間におけるモデル予測値を説明変数として適用することにより補正することで求められる。

4. 土砂崩壊発生数の計算方法

(1) 単位区間崩壊発生数の計算の考え方

植村ら⁴⁾は、林¹⁾により提案された日雨量を超過確率 50%日雨量で除した相対雨量による崩壊面積率計算式である式(1)に基づき単位区間崩壊発生数の計算式を導出した。ここで、土砂崩壊発生頻度の高い中央線区間では、降水と土砂崩壊の実績による式(2)より単位区間崩壊発生数が求められる⁵⁾。

$$C_a = \alpha \cdot (R/R_{50})^n \quad (1)$$

$$\nu_c = 0.7 \cdot (R/R_{50})^{1.5} \quad (2)$$

ここで、 C_a ：崩壊面積率、 ν ：単位区間崩壊発生数、 R_{50} ：超過確率 50%日雨量、 R ：日雨量、 α ：定数、 n ：定数（中古生層、第三紀層：1.5）¹³⁾、 R/R_{50} ：相対雨量、添字 c ：中央線区間を表す記号である。

式(2)による単位区間崩壊発生数は、降水量が崩壊限界雨量以上の日を対象として計算される。また、単位区間のすべての地点における降水量は、当該単位区間を受け持つ鉄道雨量計の降水量と同一と考える。単位区間崩壊発生数の解析対象期間での合計を単位区間崩壊総数とし、単位区間崩壊総数の対象線区での合計を線区崩壊総数とする。

(2) 土砂崩壊発生頻度が低い線区における単位区間崩壊発生数

崩壊発生頻度が低い線区である東海道線区間と常磐線区間では、崩壊発生頻度が高い線区である中央線区間に比べると沿線勾配は緩やかなため、土砂崩壊ポテンシャルは低いと想定されることから、式(2)を適用すると、単位区間崩壊発生数は過大に評価される恐れがある。一方、吉松¹²⁾では、崩壊面積率は起伏量比（斜面勾配）に比例するとの考えにより、式(3)が提案された。本研究では、この考え方に基づき、東海道線区間と常磐線区間では、式(4)に示すように、式(2)の右辺に各線区における沿線勾配の線区平均値と中央線における沿線勾配の線区平均値との比を乗じることで単位区間崩壊発生数を求めた。

$$C_a = g \cdot R_r \cdot (R_e)^{1.5} \quad (3)$$

$$\nu_i = 0.7 \cdot SL_i / SL_c \cdot (R/R_{50})^{1.5} \quad (4)$$

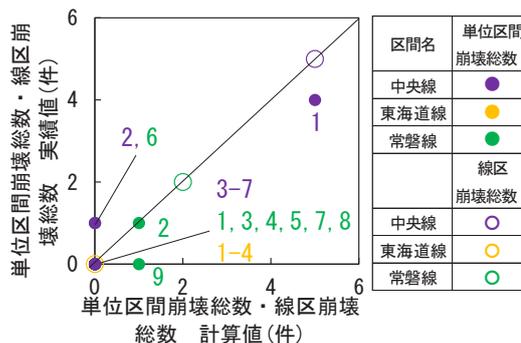


図-5 単位区間崩壊総数と線区崩壊総数の計算値と実績値の関係。現在期間（2000～2020年）。

ここで、 g ：定数、 R_r ：起伏量比（斜面勾配）、 R_e ：有効雨量、 SL ：沿線勾配の線区平均値、添字 i ：土砂崩壊発生頻度が低い線区を表す記号である。

(3) 崩壊限界雨量の計算

崩壊限界雨量は、斜面の水分量を表す水貯留量に対する限界値として与えられる。水貯留量は、林ら¹³⁾に基づき、植村ら⁴⁾が導出した式(5)、式(6)より計算される。

$$S_d = R_d + (1-p)^{24} \cdot S_{d-1} \quad (5)$$

$$p = 8.9 \cdot 10^{-4} \cdot R_{50} - 6.9 \cdot 10^{-2} \quad (6)$$

ここで、 S ：水貯留量、 p ：流出係数、添字 d ：日を表す記号である。

崩壊限界雨量には、中央線区間では植村ら⁵⁾で設定された 600mm が用いられる。東海道線区間と常磐線区間では、線路等級毎に防災強度の最低目標として定められた超過確率¹⁴⁾に対応した現在期間における水貯留量として、東海道線区間の熱海駅以北で 390mm、以南で 340mm、常磐線区間で 250mm をそれぞれ崩壊限界雨量に採用した。

(4) 単位区間崩壊総数と線区崩壊総数の再現性

現在期間での鉄道雨量計の観測データを用いて単位区間崩壊総数と線区崩壊総数を計算した。図-5に現在期間における単位区間崩壊総数と線区崩壊総数の計算値と実績値との関係を散布図で示す。なお、図中には、両者が一致することを表す傾き 1 の直線を示す。図より、単位区間崩壊総数は、計算値と実績値とは、すべての単位区間で一致はしていないが、乖離数は 1 以下と大きな差異ではなく、また、線区崩壊総数はすべてプロット傾き 1 の直線上にあり、それぞれの再現性は妥当と考えた。

5. 土砂崩壊発生数の将来変化

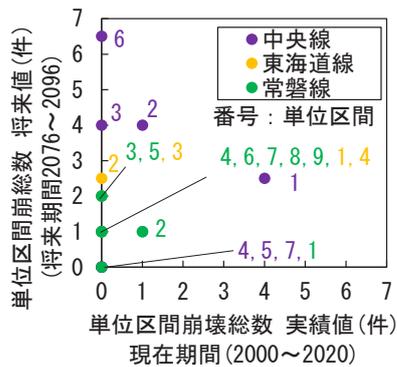


図-6 単位区間崩壊総数の実績値（2000～2020年）と将来値（2076～2096年）の関係

(1) 単位区間崩壊総数の将来変化

本項では、現在期間と将来期間における単位区間崩壊総数の変化について述べる。将来期間における4つの海面水温パターン（C1, C2, C3, EN）に対して、降水量の将来予測値の時系列データを用いて単位区間崩壊総数を計算した。単位区間崩壊総数の将来期間の4つの海面水温パターンでの中央値を単位区間崩壊総数の将来値とし、その将来値と現在期間における単位区間崩壊総数の実績値との関係を図-6に示す。

中央線区間での単位区間崩壊総数は、秩父山地区間の単位区間6において、現在期間では0件に対して、将来期間では6.5件と顕著に増加する。また、秩父山地区間以外の単位区間2,3でも現在期間でそれぞれ1,0件に対して将来期間で4件と大きく増加している。東海道線区間での単位区間崩壊総数は、現在期間ではすべての単位区間において0件であるのに対して、将来期間では単位区間1,4において1件、単位区間2において2.5件、単位区間3において2件とすべての単位区間で増加しているが、増加件数は最大でも2.5件にとどまっている。常磐線区間での単位区間崩壊総数は、単位区間3,5において現在期間では0件であるのに対して将来期間では2件であり、単位区間4,6～9において現在期間では0件であるのに対して将来期間では1件、単位区間1,2において現在期間と将来期間では同値でそれぞれ0,1件であり、大部分の単位区間で増加しているが、増加件数は最大でも2件にとどまっている。

(2) 線区崩壊総数の将来変化

本項では、線区毎の現在期間と将来期間における土砂崩壊発生数の変化を述べる。線区崩壊総数は、現在期間では中央線区間、東海道線区間および常磐線区間で5,2,0件、将来期間では、それぞれ17,10,6.5件である。図-7には、将来期間と現在期間

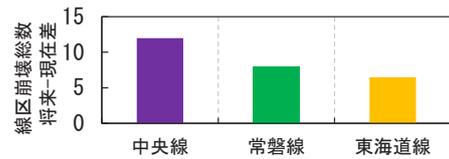


図-7 線区崩壊総数の将来値（2076～2096年）と実績値（2000～2020年）との差

での線区崩壊総数の差、すなわち線区崩壊総数の増加数を示す。線区崩壊総数の将来と現在との差は、中央線区間で最も大きく、常磐線区間、東海道線区間の順で小さくなり、それぞれ12,8,6.5件である。線区崩壊総数の将来と現在との差の中央線区間での値に対する比は、常磐線区間で0.67、東海道線区間で0.54となる。このように、将来の土砂崩壊発生数は、土砂崩壊の発生頻度が低い東海道線区間や常磐線区間でも一定の増加傾向を示すことがわかった。

6. 考察

本研究では、現在期間と将来期間における線区崩壊総数の増加傾向は、土砂崩壊発生頻度が高い線区である中央線区間で最も顕著であるが、土砂崩壊発生頻度が低い線区である東海道線区間や常磐線区間でも生じることがわかった。本節では、この要因について、降水量の将来変化の観点から考察する。

現在期間で崩壊限界雨量の超過確率の線区平均を求めると1.1～3.3%となり、この超過確率規模の日雨量は土砂崩壊の発生に影響を及ぼすと考えられる。また、4章で述べたように、50%超過確率の日雨量は、土砂崩壊に対する抵抗要因として作用する。そこで、土砂崩壊の発生要因と抵抗要因のそれぞれの観点から考察するため、3%超過確率と50%超過確率のそれぞれの日雨量の将来変化を調べた。

図-8には、鉄道雨量計地点での超過確率3%および50%日雨量について、現在期間における観測値による計算値と、将来期間における将来予測値による4つの海面水温パターン（C1, C2, C3, EN）での中央値との関係を示す。次に、両者の関係を線区別、超過確率別に一次回帰分析をして得られた回帰係数を計算した。この回帰係数は、現在期間の超過確率日雨量に対する将来期間の超過確率日雨量の比に相当し、超過確率日雨量の将来/現在比とする。50%超過確率日雨量の将来/現在比は、中央線区間、東海道線区間、常磐線区間においてそれぞれ1.1, 1.0, 1.0である。一方、3%超過確率日雨量の将来/現在比は、中央線区間、東海道線区間、常磐線区間においてそれぞれ1.5, 1.2, 1.4となる。このように、すべての

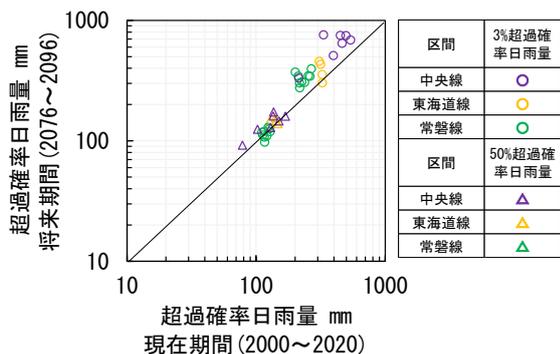


図-8 超過確率が3%と50%の日雨量の現在期間(2000~2020年)と将来期間(2076~2096年)との関係。

対象線区では、土砂崩壊の発生要因とされる超過確率3%日雨量の増加度合いは、土砂崩壊の抵抗要因とされる超過確率50%超過確率日雨量の増加度合いよりも大きいと見られるため、将来期間における土砂崩壊発生数は現在期間に対して増加したと考えられる。

7. まとめ

JR 東日本管内における関東地方の主要線区に対して、土砂崩壊の発生頻度が低い線区を含めた3線区を検討対象として選定し、RCP8.5シナリオに基づく土砂崩壊発生数の将来変化を評価した。その結果、将来期間(2076~2096年)の土砂崩壊発生数は、現在期間(2000~2020年)に対して、土砂崩壊の発生頻度が低い太平洋沿岸の東海道線区間や常磐線区間においても一定の増加傾向を示し、土砂崩壊の増加数の中央線区間に対する比は、東海道線区間で0.54、常磐線区間で0.67となることがわかった。このように、土砂崩壊発生頻度が低い線区でも、将来では、土砂崩壊に対して、現在以上の対応が必要になるといえる。なお、土砂崩壊発生頻度が低い線区では、土砂崩壊発生数計算式の検証期間における土砂崩壊実績数は少ないことから、今後、土砂崩壊の発生に応じて更なる検証を実施して評価精度を高めていく必要があると考えている。また、本研究で得た知見は、鉄道沿線に対するものであり、対象が異なる場合では、その条件に応じた検討が必要と考えられる。今回は、土砂崩壊に着目して、気候変動による将来変化を評価したが、今後は、洪水氾濫や河床洗掘など多様な自然災害にも着目して検討していきたい。

謝辞：本研究では、気象庁気象研究所が実施したNHRCM02による数値実験の出力データと国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構による農

業気象データを使用した。ここに、謝意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木博人・植村昌一：気候変動による大雨の変化が列車運転規制に与えた影響の評価，土木学会論文集，Vol. 80, No. 2/23-00090, pp. 1-15, 2024.
- 2) 植村昌一・橋本健・鈴木博人・宇治橋康行：気候変動による降水量の変化に伴う鉄道輸送の安定性影響評価，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol. 76, No. 2, pp. I_61-I_66, 2020.
- 3) 植村昌一・橋本健・鈴木博人：気候変動による降水変化に伴う鉄道輸送の安定性への影響評価—複数の路線を対象とした解析—，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol. 77, No. 2, pp. I_13-I_18, 2021.
- 4) 植村昌一・平松晋也・鈴木博人：気候変動による土砂崩壊の将来変化，地すべり学会誌，Vol. 59, No. 6, pp. 237-247, 2022.
- 5) 植村昌一・鈴木博人：気候変動による鉄道沿線の土砂崩壊の将来変化—複数の路線を対象とした解析—，土木学会論文集，Vol. 80, No. 16/23-16122, pp. 1-7, 2024.
- 6) 米本梨奈・江面剛・篠原良治：八王子支社管内の台風19号による被害，SED, No. 55, pp. 124-129, 2020.
- 7) 森泰樹・佐々木良・藤井昌隆・杉山友康・里深好文：土砂流入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.
- 8) Murata, A., Sasaki, H., Kawase, H. and Nosaka, M. : Evaluation of precipitation over an ocean region of Japan in convection-permitting regional climate model simulations, Climate Dynamics, Vol.48, pp.1779-1792, 2017.
- 9) Mizuta, R., Arakawa, O. and Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H., and Kitoh, A : Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes, SOLA, Vol.10, pp.167-171, 2014.
- 10) 大野宏之・佐々木華織・大原源二・中園江：実況値と数値予報，平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成，生物と気象，Vol. 16, pp. 71-79, 2016.
- 11) 林拙郎：崩壊面積率と水文データとの二、三の関係，日本林学会誌，Vol. 67, No. 6, pp. 209-217, 1985.
- 12) 吉松弘行：山腹崩壊の予測式について，砂防学会誌，Vol. 29, No. 3, pp. 1-9, 1977.
- 13) 林拙郎・山田孝：最近の土砂災害における実効雨量の係数の特性について，砂防学会誌，Vol. 66, No. 2, pp. 31-39, 2013.
- 14) 村上温・野口達雄監修：鉄道土木構造物の維持管理，鉄道施設協会，736p., 1998.

(2024. 5. 31 受付)