山地小河川における線路冠水の気候変動影響

CLIMATE CHANGE INPACTS OF RAILWAY LINE FLOODING IN MOUNTAINOUS SMALL RIVERS

植村 昌一
Shoichi UEMURA

東日本旅客鉄道株式会社 防災研究所（〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479）
E-mail: s-uemura@jreast.co.jp

***Key Words**: sediment-laden flow, climate change, railway line flooding, mountainous small rivers*

1. はじめに

温室効果ガスの排出による地球温暖化に伴う気候変動により大雨の頻度や強度が増加すると予想されている [1]．このため，砂防分野では，気候変動への適応策を推進するために，降水量の増加に伴う生産土砂量の推定手法を中心に検討が進められている [2]．鉄道でも土砂災害に関する気候変動影響として，土砂崩壊 [3][4][5]や土石流 [6]を対象として，気候モデルによる 21 世紀末の降水出力により発生頻度の増加が定量的に評価されている．

鉄道における特徴的な降雨による災害として，小河川が線路下を横断する地点での溢水により水面がレールレベルより高い状態となる線路冠水がある．線路が冠水しているときには，列車の運行が中止されるとともに，山地では流水中に土砂が混入しているため，運行再開には線路に堆積した土砂の除去が必要となるなど，線路冠水は，鉄道の輸送安定性の低下要因の一つとなっている．気候変動の影響により，線路冠水は，将来にかけて増加していくことが懸念される．しかしながら，土砂崩壊や土石流に比べて被害の度合いが小さいことから，これまでの鉄道の気候変動影響評価研究では対象とされていないのが現状である．

そこで，本研究では，山地小河川における線路冠水現象に着目し，降水量による線路冠水判定手法を構築した上で，気候モデルによる 21 世紀末の降水出力を用いて線路冠水の将来変化を評価した．

2. 研究条件

(1) 調査概要

本研究では，山地小河川における線路冠水現象を対象とする．線路冠水の評価地点を基準点，その集水範囲を基準点流域として解析の基本単位とする．降水量による線路冠水判定手法を既往研究 [7]で提案された手法に準拠して作成する．その上で，本手法により現在期間と将来期間で，線路冠水の頻度や確率等の指標を計算する．この計算では，現在期間には，降水量の観測データを用い，将来期間には，気候モデルによる将来の降水出力をバイアス調整したデータを用いる．現在期間は 2000 年 9 月～2020 年 8 月とし，将来期間は気候モデルによる数値実験の計算条件である 2076 年 9 月～2096 年 8 月とした．そして，線路冠水判定に関する各種指標値を現在期間と将来期間とで比較することで，その将来変化を評価した．

(2) 調査地点と流域

本研究で対象とする線区は，**図-1** に示すように，東日本旅客鉄道株式会社管内で，東京駅から山間地域を経由して山形駅に至る主要線区である山形新幹線とした．基準点は，山間区間である赤湯～かみのやま温泉間の O1，O2 の 2 地点とし，それぞれの地形図を**図-2** に示し，流域諸元を**表-1** に示す．

O1 では，基準点流域面積が 1.2km^2 であり，中・下流域には果樹園が分布し，上流域には針葉樹・広

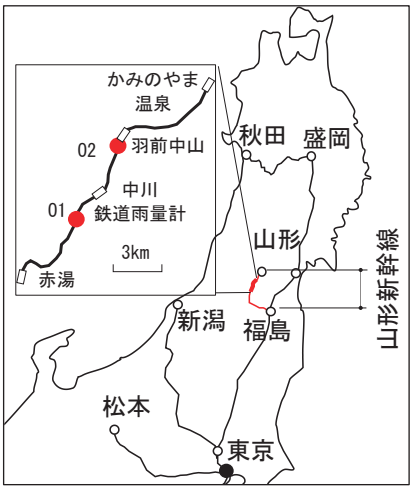


図-1　対象線区と基準点の位置図

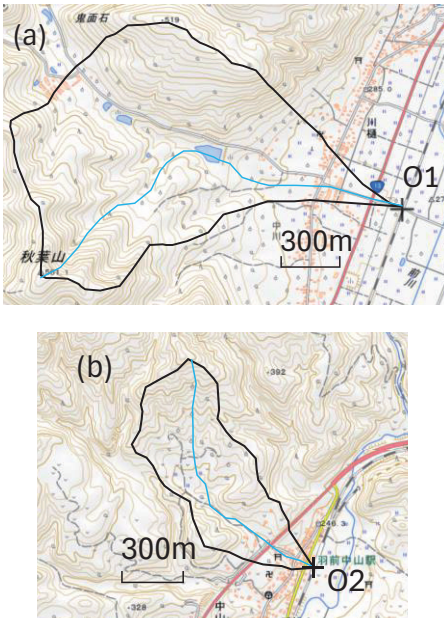


図-2　基準点の位置と基準点流域の地形状況．基準点 01 と 02．国土地理院地形図に一部加筆．

表-1　基準点流域の諸元

基準点	流域面積 km^2	基準点河床高 m	最遠点標高 m	標高差 H m	最遠点距離 L km	河道勾配 $H/L10^{-3}$
01	1.2	279	561	282	2.2	130
02	0.38	245	465	220	1.3	166

葉樹が分布している．河道勾配は 130×10^{-3} である．O2 では，基準点流域面積は $0.38km^2$ であり，下流域は集落であり，中・下流の河道に沿って畑が分布している．中流域には水田や果樹園も分布している．また，上流域には，広葉樹が分布している．河道勾配は，166×10^{-3} である．O1 での線路冠水の状況を



写真-1　線路冠水の状況．基準点 01．2014 年 7 月 10 日．

写真-1 に示す．流水中の土砂混入により線路上に土砂が堆積した状況がうかがえる．

(3) 横断水路の構造と水位観測

線路下の横断水路の断面図を**図-3** に示す．O1 では，水路幅は 0.84（=0.42×2）m，高さは 0.87m である．O2 では，水路幅は 0.9m，高さ 0.65m である．それぞれの地点では，水位観測を実施しており，レールレベルを基準（0m）として鉛直下向きを正として水面までの高さを 10 分毎に測定した．水位データが存在するのは，2014～2024 年の期間である．

(4) 降水量データとモデル出力のバイアス補正

降水量の観測データとしては，**図-1** に示すように，基準点から最近傍にある中川駅の鉄道雨量計データを用いた．降水量の将来予測データには，気象庁気象研究所による空間解像度 2km の非静力学地域気候モデル（NHRCM02）[8]に基づく数値実験において，降水量観測地点に最も近い格子点での出力を使用した．数値実験では，1980 年 9 月～2000 年 8 月の期間での過去再現計算と，世界の平均気温が工業化以前

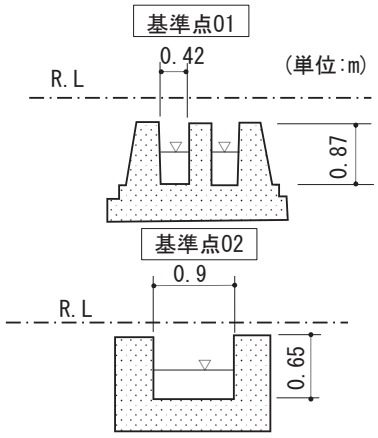


図-3 線路下の横断水路の断面図．基準点 01 と 02．

表-2 ４パターンの海面水温変化の特徴[9]．気候モデルによる数値実験の境界条件．

EN	熱帯太平洋中～東部での昇温大 エルニーニョ的な変化を示す
C1	熱帯太平洋中～東部での昇温小 南北半球間のコントラスト小
C2	ENよりも更にエルニーニョ的な変化を示す
C3	熱帯太平洋中～東部での昇温小 南北半球間のコントラスト大

に比べて 4℃上昇する RCP8.5 シナリオに対して，2076 年 9 月～2096 年 8 月の期間での将来予測計算が行われている．降水のモデル出力は毎正時である．境界条件となる海面水温パターンは，**表-2** に示すとおり，C1，C2，C3，EN の 4 パターン[9]である．3，4 章での解析の対象時期は出水期である 5～11 月とした．気候モデルによる降水のモデル出力のバイアス調整は，既往研究[10]と同様に累積確率による方法[11]により実施した．この方法では，参照データである雨量計の観測値の累積確率と過去再現実験での降水のモデル出力値の累積確率が一致するように設定したバイアス補正率を将来予測実験でのモデル出力値に乗じることで実施する．参照期間は，鉄道雨量計の観測データが存在する期間を考慮して，1996 年 9 月～2017 年 8 月（欠測の 1999 年を除く）の 20 年間とした．

3. 降水量に基づく線路冠水判定手法の検証

(1) 判定手順

既往研究[7]で提案された降水量による列車運転規制判定手法に準拠して作成した線路冠水判定手法を**図-4** に示したフローにより述べる．①一連降雨事象の設定では，降水量の時系列データから一連降雨事象を抽出し，これらを規制判定の基本単位とする．

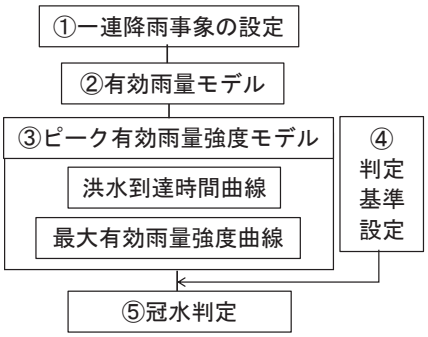


図-4　降水量による線路冠水判定フロー

一連降雨事象は，鉄道での考え方[12]として前後に 12 時間以上の無降雨継続期間を有する降雨事象とする．②有効雨量モデルでは，1 時間雨量データを時刻毎に式(1)～式(3)[例えば 13]により有効雨量に変換する．③ピーク有効雨量強度モデルでは，一連降雨事象による最大流出量を与えるピーク有効雨量強度を式(4)の合理式に基づき求める．ピーク有効雨量強度は，角屋・福島[14]による任意の有効雨量強度に対する洪水到達時間の計算式である洪水到達時間曲線式(5)と，一連降雨事象の実績に基づく任意の継続時間に対する最大有効雨量強度を表す有効雨量曲線式(6)の 2 式を同時に満足することを条件として求める．④判定基準設定では，ピーク水位がレールレベルに達するときの有効雨量強度として冠水判定有効雨量強度を求める．一連降雨事象でのピーク水位は，式(7)に示すようにピーク有効雨量強度による関数式で表される．この関数式の定数は，観測データに基づく一連降雨事象毎のピーク有効雨量強度に対するピーク水位の回帰式により得られる．そして，式(8)により冠水判定有効雨量強度を求める．⑤冠水判定では，一連降雨事象毎に規制判定を行う．ピーク有効雨量強度が判定有効雨量強度以上となる場合を線路冠水有と判定し，小さい場合を線路冠水無と判定する．

$$r_{he}(t)=f\cdot r_h(t) \quad (1)$$

$$f=f_1 \quad (0<R(t)<R_{sa}) \quad (2)$$

$$f=f_s \quad (R_{sa}\leqq R(t)) \quad (3)$$

$$Q_p=A\cdot r_{ep}/3.6 \quad (4)$$

$$t_c=f(r_e)=C\cdot A^{0.22}r_e^{-0.35} \quad (5)$$

$$r_e=F(t_c)=\max_{0<t<T}\{\sum_{t}^{t+t_c/60}(r_{he}(t)/(t_c/60)\} \quad (6)$$

$$h_p=c\cdot r_{ep}^{2/3}+d \quad (7)$$

$$r_{elim}=(-d/c)^{3/2} \quad (8)$$

ここに Q_p：一連降雨事象におけるピーク流量(m^3/s)，A：流域面積(km^2)，t：一連降雨事象の降り始めからの時間(h)，r_{ep}：一連降雨事象におけるピーク有効雨量強度(mm/h)，r_h：1 時間雨量(mm)，r_{he}：1 時間当り有効雨量(mm)，T：一連降雨事象の継続時間(h)，t_c：洪水到達時間(min)，C：定数，f：流出率，f_1：一次流出率，f_s：飽和流出率，R：累加雨量(mm)，R_{sa}：飽和雨量(mm)，$f(r_e)$：任意の有効雨量強度に対する洪水到達時間(min：洪水到達時間曲線)，$F(t_c)$：一連降雨事象の実績に基づく任意の降雨継続時間に対する最大有効雨量強度(mm/h：有効雨量強度曲線)，h_p：一連降雨事象におけるピーク水位(m)，r_{elim}：冠水判定有効雨量強度(mm/h)，c，d：定数である．

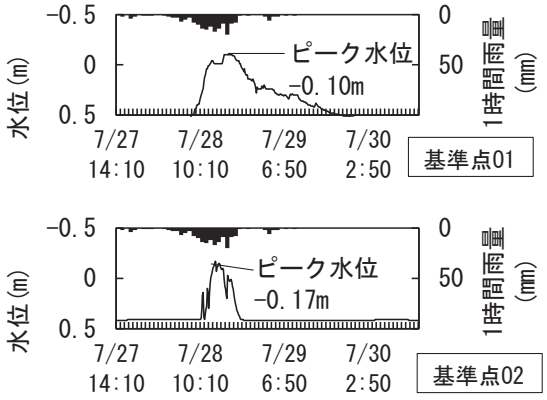


図-5　一連降雨事象におけるピーク水位の観測データによる設定例．基準点 01 と 02．線路冠水が発生したときの事例．2020 年 7 月 27～30 日．1 時間雨量の観測値を併記．

(2) 有効雨量モデル定数

有効雨量モデル定数としては，一次流出率，飽和流出率と飽和雨量については，山林で用いられる値として，それぞれ 0.25，1.0，150mm を与えた [15]．また定数 C については，後述の一連降雨事象毎のピーク有効雨量強度と桁下ピーク水位との相関性により O1 で 740，O2 で 800 を与えた．

(3) 冠水判定基準設定と再現性の検証

冠水判定有効雨量強度を設定するため，水位データが存在する 2014～2024 年の期間を対象として，一連降雨事象でのピーク有効雨量強度とピーク水位を求めた．それぞれの計算例を**図-5**，**図-6** に示す．そして，ピーク有効雨量強度の 2/3 乗とピーク水位（ピーク有効雨量出現後の水位のピーク値）の関係について，年 1 回程度の降雨の規模として連続雨量 40mm

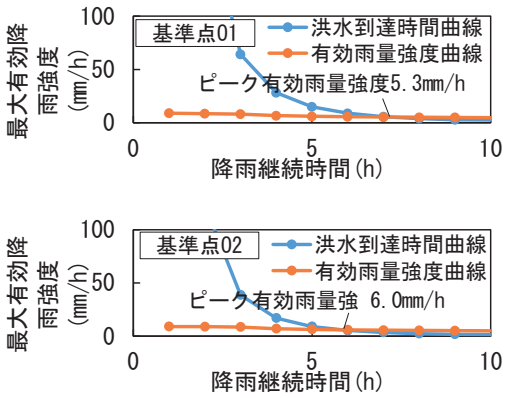


図-6　一連降雨事象におけるピーク有効雨量強度の計算例．基準点 01 と 02．線路冠水が発生したときの事例．2020 年 7 月 27～30 日．

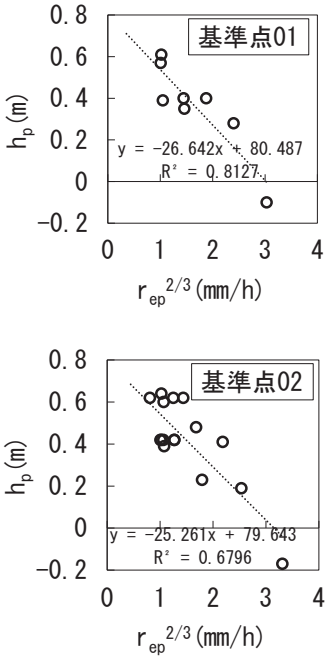


図-7　基準点での一連降雨におけるピーク有効雨量強度 ($r_{ep}^{2/3}$) と桁下ピーク水位 (h_p) との関係．2014/10～2024/11．基準点 01 と 02．回帰直線と回帰式を記載．

以上かつピーク有効雨量強度が 3mm 以上の一連降雨事象を対象として**図-7** に示した．同図中には，両者の関係に対して最小自乗法により求めた回帰直線を示した．決定係数 R^2 は O1 で 0.813，O2 で 0.680，回帰係数は水準 5%で有意であり，線形性が認められるため，これらの回帰式を用いて式(8)より冠水判定有効雨量強度を設定した．次に，現在期間の 2000 年 9 月～2020 年 8 月を検証期間として，降水量の観測データにより冠水判定を実施した．**図-8** には，年最大ピーク有効雨量強度の経年変化，冠水判定有効雨量強度と実際に線路冠水が発生した時期を示す．O1，O2 ともに，検証期間で実際に線路冠水が発生したのは 2 回であり，ピーク有効雨量強度が冠水判定有効雨量強度以上となることで冠水有と判定されたのも 2 回で実際と一致し，その一連降雨事象が生じたタイミングも実際と一致している．このように，降水量による線路冠水判定手法は一定の再現性を有していると考えられる．

4. 線路冠水の将来変化

(1) ピーク有効雨量強度の計算

各基準点において，現在期間での降水量観測データと，将来期間での 4 つの海面水温パターンに基づ

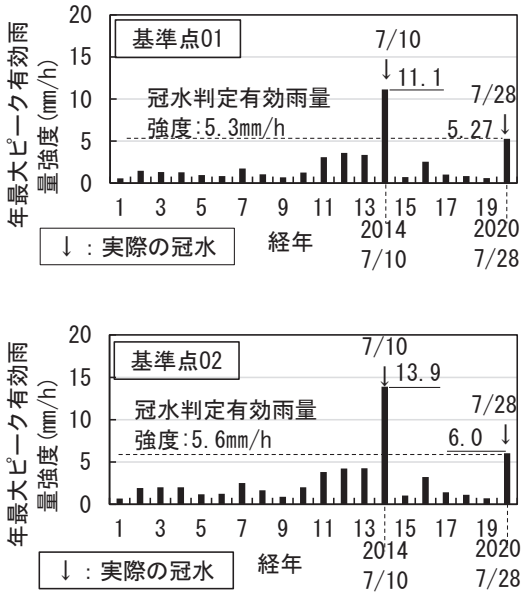


図-8　年最大ピーク有効雨量強度の経年変化，冠水判定有効雨量強度と実際の線路冠水の時期．基準点 01 と 02．現在期間(2000/9～2020/8)．

く降水量の将来予測データにより連続雨量が 40mm 以上の一連降雨事象に対してピーク有効雨量強度を計算した．これらを用いて，以下では，線路冠水の判定に関する各種の指標値を計算した．

(2) 冠水頻度

冠水頻度は，基準点において，冠水有と判定される一連降雨事象の総数と定義する．基準点において，現在期間と将来期間のそれぞれ 20 年間にピーク有効雨量強度が冠水判定有効雨量強度を上回った一連降雨事象の総数として冠水頻度を求めた．**図-9** に冠水頻度の現在期間での値及び将来期間の 4 つの海面水温パターンでの値とその中央値を示した．図より，現在期間では，冠水頻度は O1，O2 ともに 2 回/20 年である．将来期間では，冠水頻度は，O1 で 4～12 回/20 年，中央値：9 回/20 年であり，O2 で 5～12 回/20 年，中央値：10 回/20 年である．冠水頻度の現在期間に対する将来期間の増加数は，O1 で 2～10 回/20 年，中央値:7 回/20 年であり，O2 で 3～10 回/20 年，中央値：8 回/20 年である．

(3) 規制確率とその変化倍率

冠水確率は，基準点において，冠水有と判定される一連降雨事象が発生する年確率と定義し，順序統計学的手法[16]により求める．基準点において，現在期間と将来期間のそれぞれ 9 月を始まりとする各 1 年間でのピーク有効雨量強度の最大値に対する 20

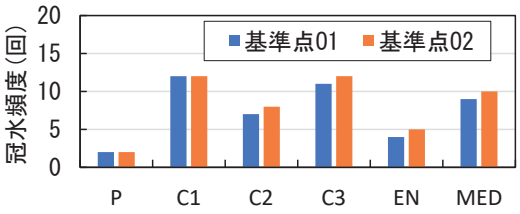


図-9　冠水頻度．基準点 01 と 02．現在期間(P:2000/9～2020/8)，将来期間(C1，C2，C3，EN:2076/9～2096/8)と 4 つの海面水温パターンでの中央値(MED)．

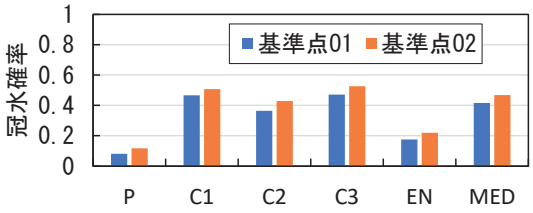


図-10　冠水確率．基準点 01 と 02．現在期間(P:2000/9～2020/8)，将来期間(C1，C2，C3，EN:2076/9～2096/8)と 4 つの海面水温パターンでの中央値(MED)．

年間の確率計算により冠水判定有効雨量強度を超過する一連降雨事象が発生する年確率として冠水確率を求めた．**図-10** に冠水確率の現在期間での値及び将来期間の 4 つの海面水温パターンでの値とその中央値を示した．図より，現在期間では，冠水確率は O1 で 0.081，O2 で 0.12 である．将来期間では，冠水確率は，O1 で 0.18～0.47，中央値：0.42 であり，O2 で 0.22～0.53，中央値：0.47 である．次に，冠水確率の変化倍率を現在期間の冠水確率に対する将来期間の冠水確率の比と定義し，**図-11** に 4 つの海面水温パターンでの値とその中央値を示した．図より，基準点での冠水確率の変化倍率は O1 で 2.2～5.8，中央値：4.8 であり O2 で 1.9～4.5，中央値：4.0 であ

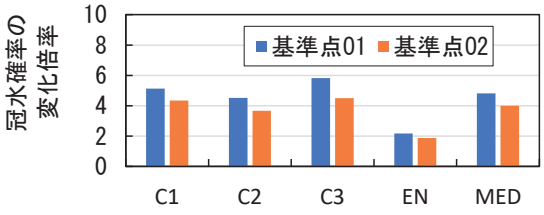


図-11　冠水確率の現在期間(2000/9～2020/8)に対する将来期間(2076/9～2096/8)の変化倍率．4 つの海面水温パターン(C1, C2, C3, EN)毎の値とその中央値(MED)．基準点 01 と 02．

る．一級河川における計画降雨量は，現在で 1/100～1/200 の年超過確率に相当するが，4℃上昇シナリオの場合では，全国平均でその約 4 倍の確率に相当するようになるとされている [17]．今回の解析による基準点での冠水確率の変化倍率は，一級河川での計画降雨量の確率変化に対して，中央値では O1 でやや大きく，O2 で同値である．

5. まとめ

鉄道では，気候変動の影響として，線路冠水が増加することが懸念されることから，降水量よる線路冠水判定手法を構築した上で，気候モデル（NHRCM02）による 21 世紀末の降水出力を用いて線路冠水の将来変化を評価した．山形新幹線の山地河川における O1 と O2 の 2 つの基準点に対する分析の結果，将来期間では現在期間に対し，冠水有と判定される頻度の基準点での増加数は 4 つの海面水温パターンでの中央値でそれぞれ 7，8 回/20 年であった．また，冠水有と判定される一連降雨事象の年発生確率である冠水確率の変化倍率は，4 つの海面水温パターンでの中央値でそれぞれ 4.8，4.0 倍であった．本研究では，将来の線路冠水の発生頻度の増加を計算することで，鉄道輸送の安定性低下を評価することができた．また，線路に堆積した土砂の除去作業の増加など，鉄道構造物のメンテナンス性も低下することを示すこともできた．

今回は，山形新幹線の 2 つの基準点を対象として，流域の環境条件を一定として分析を行った．しかしながら，降水変化の地域性，地形・水路や植生の条件やその変化などにより，鉄道への影響度合いは異なると考えられる．今後は，これらの要因や環境条件の変化を考慮して検討を深度化する必要があると考えている．

謝辞：本研究では，文部科学省統合的気候モデル研究プログラムのもとで作成された気象庁気象研究所 NHRCM02 による数値実験の出力データを使用しました．ここに，記して謝意を表します．

参考文献

1) IPCC: Climate Change 2023 , Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
2) 国土交通省：気候変動を踏まえた砂防技術検討会中間とりまとめ，https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/200521/chukan_torimatome.pdf，2026.05.29.
3) 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.
4) 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.
5) 植村昌一：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―，第 12 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 49-54，2024.
6) 植村昌一：土石流の計画手法による流出量に基づく被災判定の気候変動影響評価，土木学会論文集，Vol. 81，No. 16，24-16155，pp. 1-7，2025.
7) 植村昌一：都市中小河川での増水に対する列車運転規制の気候変動影響，土木学会論文集，Vol. 82，No. 16，25-16072，pp. 1-7，2026.
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) 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_60，2020.
11) 渡部哲史，中村みゆき，内海信幸：アメダス観測点を対象とした d4PDF バイアス補正データセットの開発，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 74，No. 5，pp. I_127-I_132，2018.
12) 島村誠：実効雨量を用いた降雨警報の有効性の検証，JR EAST Technical Review，No. 3，pp. 45-48，2003.
13) 吉迫宏，林貴史，藤原俊樹，同前浩二：減災対策を目的としたため池洪水流出モデル，農業農村工学会誌，Vol. 87，No. 5，pp. 365-368，2019.
14) 角屋睦，福島晟：中小河川の洪水到達時間，京都大学防災研究所年報，Vol. 19，B-2，pp. 143-152，1976.
15) 一般財団法人国土技術研究センター：中小河川計画の手引き（案），248p.，1999.
16) 高瀬信忠：対数正規分布に関する順序統計学的考察，土木学会論文集，Vol. 47，pp. 24-29，1957.
17) 国土交通省：気候変動を踏まえた治水計画のあり方（改訂） 提言，https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/r0304/01_teigen.pdf，2026.5.29.

（2026. 5. 29　受付）