

気候変動による鉄道ネットワークの水害リスク変化の評価に関する研究

田島 治希¹・徐 非凡²・加藤 博和³

¹ 非会員 名古屋鉄道株式会社
E-mail: tajitaji625@gmail.com

² 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科 研究員 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)
xu@urban.env.nagoya-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科 教授
E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp

近年、気候変動による自然災害の激甚化・頻発化が懸念されている。交通分野において自然災害の影響は大きく、例えば鉄道が長期不通や廃止に追い込まれる事例は多数発生している。交通ネットワークについて、気候変動の影響を踏まえて水害対策を推進していくことは喫緊の課題であると言える。そこで本研究では、全国の鉄道路線を対象とした現在と将来における水害リスクの評価を目的とする。水害リスクの評価因数として“危険源”、“曝露”、“脆弱性”を定義し、それらの積をとることで各路線の“水害リスク値”を算出する。分析を行った結果、20 世紀末と比較して 21 世紀末の水害リスクは持続可能シナリオでは微増するのに対し、化石燃料に依存するシナリオでは大幅に増加するという結果が得られた。

Key Words: *Climate Change, Flood Risk Evaluation, Railway Line, Climate Model RCP (Representative Concentration Pathway), SSP (Shared Socioeconomic Pathways)*

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

温室効果物質の大気中の濃度上昇に伴う気候変動によって自然災害の激甚化・頻発化が懸念されている。国土交通省のとりまとめによると、1980 年頃と 2020 年頃とを比較すると、1 時間 80mm 以上の短時間降雨の発生回数は約 1.7 倍に増加している。更に、今後の全国の洪水発生頻度を 20 世紀末と 21 世紀末とで比較した場合、世界の地上平均気温が 4° C 上昇するケースでは平均して 4 倍増加、2° C 上昇するケースにおいても平均して 2 倍増加するとの試算が示されており、今後の自然災害による被害は全国各地で増加することが想定される。

交通ネットワークは自然災害の影響を大きく受ける。鉄道に着目すると、中でも水害による被害が多く、例えば日本で 2008 年から 2018 年の 11 年間に鉄道施設が 1,000 万円以上の被害を受けた災害 275 件のうち 211 件は水害である。豪雨による水害の影響を受け、鉄道路線が長期

不通や廃線となる事例が発生している。

鉄道は都市間を結ぶ基幹交通であり、貨物輸送も担う重要な交通インフラである。そのため、災害による長期不通が起こると地域住民の生活や地域経済に大きな支障を来す。その一方で、現在運行している鉄道の中には、土木技術が未発達な明治・大正期に建設されたルートを今日も利用している路線も多い。このような路線では、川・海や斜面に沿うように建設されている等、災害の影響を受けやすい特徴が見られる。

以上のような現状を踏まえ、国は現在「国土強靱化基本計画」に基づき土木インフラの強化に注力している。2018 年の改定では気候変動の影響を踏まえた水害対策の推進を明記している。日本の交通ネットワークを災害に対し強靱なインフラとするためには、将来の水害リスクを定量的に把握し、災害に被災しやすく、かつ社会的に重要な路線から順に早期の災害対策・気候変動適応策の導入を進める必要がある。

本研究では、全国の鉄道路線を対象として水害リスクを評価する手法を提案する。その後、水害の現在データ、将来予測データを用いて、現在から将来にかけての水害リスクを評価・考察する。最後に、対象地域をケーススタディとし、詳細なデータを用いた“危険源”の分析を行い、その有用性を確認する。以上により、長期的に水害リスクの大きくなる鉄道路線を特定し、鉄道分野における計画的な災害対策そして気候変動適応策導入の検討に寄与することを目的とする。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

本節では、自然災害リスクに関する研究、気候変動による影響評価に関する研究、交通ネットワークの信頼性に関する研究を整理し、本研究の位置づけを明確にする。

・自然災害リスクに関する研究

菊本ら（2017）⁷⁾は災害の発生回数や災害対策状況を表すデータを複数用いて評価指標とし、全国 47 都道府県を対象に自然災害リスクを計算している。著者らはこれを「自然災害に対する安全性指標（GNS）」と定義し、2015 年から 2 年ごとに更新を行っている。

交通分野において全国的に災害リスク評価を行った研究としては、全国の道路ネットワーク・鉄道ネットワークを対象に簡易的に現在の災害リスクを評価した高山ら（2022）²⁾の例に留まる。

・気候変動による影響評価に関する研究

気候変動による影響を考慮して将来の洪水被害額を算出した柳原ら（2022）³⁾をはじめとして、水資源分野、農林水産業分野では多くの研究が行われている。

交通分野に着目すると、Oliver（2016）⁴⁾や Kostianiaia ら（2021）⁵⁾のように、鉄道網や道路網を対象として気候変動による影響を網羅的に整理した研究がある。一方で、国内において交通分野で気候変動の影響を考慮した研究は行われていない。

・交通ネットワークの信頼性に関する研究

交通ネットワークが自然災害に被災しても安定的にサービスを提供する性質、すなわち交通ネットワークの信頼性に関する研究はこれまでに多くの研究蓄積があり、その詳細は中山昌一郎・朝倉康夫編著「道路交通の信頼性評価」（2014）⁶⁾に詳しい。この本では道路ネットワークの「信頼性」を「連結信頼性」、「時間信頼性」、「走行信頼性」の 3 つに分類し、関連する研究のレビューや評価の実例を紹介している。加えて、「連結信頼性」と類似した概念として「脆弱性」について言及しており、連結信頼性が「任意の出発地と目的地を繋ぐ経路が少なくとも 1 つは存在するかどうか」の評価であるのに対し、脆弱性は「欠損等が発生すると甚大な影響が出るクリティカルなリンクがどこであるのか」の評価であるとまとめている。

瀬戸ら（2008）⁷⁾はリンク断絶前と断絶後の非重複経路数の比を指標として京阪神ネットワークを対象に接続信頼性を評価している。また、Taylor ら（2006）はアクセシビリティの概念を用いて脆弱性を定義し、オーストラリアの幹線道路網を対象にリンクの脆弱性を評価している。以上のような研究では、あるリンクの断絶を仮定してその際の影響を評価するものであり、実際に断絶する確率については考慮していない。その理由として、生起確率を正確に計測することが困難であり、推定の誤差が大きいために挙げられる。

以上を踏まえ、以下のようにまとめることができる。

- ・全国レベルで鉄道網を対象として自然災害リスクを評価した研究は非常に限られている
- ・交通分野の気候変動による影響を考慮した研究は国内において少ない状況である
- ・これまでの交通ネットワークの信頼性評価ではリンク断絶の影響評価が主であり、断絶確率については考慮されていない

そこで、本研究では、気候変動の影響を踏まえ、災害発生確率を考慮に含めたリスク評価の将来推計を行う。気候変動による水害の頻発・激甚化は不可避の事態であり、早期の対応が喫緊の課題である。最新の気候変動予測データを用い、全国の鉄道網の水害リスクの将来変化を評価するという点に本研究の意義がある。

2. 研究対象と水害リスク評価手法

国土交通省国土数値情報ダウンロードサイト⁸⁾より鉄道ラインデータ(令和 2 年度)を入手し、鉄道区分が「普通鉄道」であり、かつ地下鉄ではない路線を抽出し、これを本研究における水害リスク評価の対象路線として用いることとした。なお、将来における路線の新設・廃止は考慮せず、現在の鉄道ネットワークの水害リスクを評価する。図-1 に評価対象とする鉄道路線を示す。

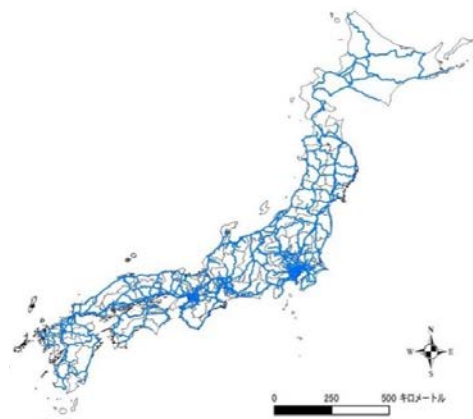


図-1 評価対象とする鉄道路線

本研究においては、水害リスクを“危険源”、“曝露”、“脆弱性”といった因数の積を用いて評価する。(式 1)

$$R = H \times E \times V_1 \times V_2 \quad (1)$$

ここで、R: 水害リスク値(分/年) H: 危険源(分/年) E: 曝露(人/日) V_1 : インフラ形状による脆弱性(日) V_2 : ネットワーク形状による脆弱性(分/人)である。以下にそれぞれの用語と指標の定義を示す。

(1) 危険源

本研究において“危険源”は“鉄道路線が長期不通となり得る規模の水害の発生確率”として定義する。一定の区間ごとに計画基準や浸水深を基に閾値を設け、その閾値に相当する水害が1年間に発生する確率(分/年)をもって表す。なお、全国の鉄道路線を河川橋梁であるかどうかで大別し、閾値を設けることとした。

(2) 曝露

本研究において“曝露”は“鉄道路線の長期不通によって直接影響を受ける人口”として定義する。不通となった鉄道路線を平常時に利用していた人数、すなわち路線の区間通過人員(人/日)をもって表す。

(3) 脆弱性

本研究において“脆弱性”は“水害の発生によって、より大きな悪影響を及ぼしうる特性”として定義する。具体的には:

- ・インフラが老朽化している、被災すると修復が困難である等の要因から、インフラ形状に依拠して不通期間が長くなってしまいう性質
- ・ネットワークとして重要な路線であるため、不通になると迂回時間が発生することで悪影響を及ぼす性質の2つが考えられ、前者を“インフラ形状による脆弱性”、後者を“ネットワーク形状による脆弱性”と定義する。

3. 使用するデータと評価方法

(1) 危険源

a) 浸水深データ

現在の水害による期待浸水深、将来の水害による期待浸水深の予測データとして、柳原ら(2022)⁹⁾の作成したデータを用いる。データの詳細を表-1に示す。

この研究において筆者らは第6期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)をベースにした日本域バイアス補正気候シナリオデータ(NIES2020)を用いている。NIES2020ではMRI-ESM2-0(日本)、MIROC6(日本)、ACCESSCM2(オーストラリア)、IPSL-CM6A-LR(フラ

ンス)、MPI-ESM1-2-HR(ドイツ)の5つの代表気候モデルが選択されており、将来の社会経済シナリオである共有社会経済経路(SSP)別の日降水量データを得ることができる。

表-1 “危険源”の評価に用いるデータの詳細

	河川マスクデータ (河川の位置を示す)
空間解像度	5次メッシュ (250m×250m)

年代	1981年～2000年(基準気候)
空間解像度	5次メッシュ (250m×250m)
再現期間(年)	30, 50, 100, 200

年代	2031年～2050年(近未来気候) 2081年～2100年(21世紀末気候)
空間解像度	5次メッシュ (250m×250m)
再現期間(年)	30, 50, 100, 200
全球気候モデル	MRI-ESM2-0 MIROC6 ACCESSCM2 IPSL-CM6A-LR MPI-ESM1-2-HR
社会経済シナリオ(SSP)	SSP1, SSP5
土地利用変化	変化, 固定

b) 閾値の設定

第2章に示す通り、“危険源”は鉄道路線ごとに設定された閾値に相当する規模の水害が1年間に発生する確率(分/年)をもって表し、これは1年で鉄道路線が水害により不通となる確率と同義である。なお、“水害が1年間に発生する確率”は、水害の再現期間の逆数として定義する。

閾値について、上述の鉄道路線データと河川マスクデータをArcGIS上で重ね合わせ、重なる区間を“河川橋梁部”、重ならない区間を“地上部”として分け、それぞれについて設定した。表-2に閾値の設定を示す。

表-2 閾値の設定

インフラ区分	閾値
河川橋梁部	標準気候における再現期間100年に相当する水深
地上部	60cm

“河川橋梁部”では治水施設の計画規模を参照し、標準気候における再現期間100年に相当する水深を超えた場合、不通を伴う被害が発生すると設定した。

一方、“地上部”では、「水害の被害指標分析の手引」(2013)⁹⁾において「鉄道レールが冠水し運行に支障を来す閾値」として定義されている60cmを援用した。高架区間においてはこの限りではないが、駅へのアクセスは困難であり、少なからず運行に支障を来すものと仮定した。

(2) 曝露

a) 現在の区間通過人口データ

鉄道統計年報[令和元年度]¹⁰⁾より「(2)運輸成績表(延日キロ, 人(トン)キロ, 平均数)」、「(24)JR 旅客会社運輸成績表(延日キロ, 人キロ, 平均数)」を入手した。私鉄の一部路線は区間通過人員が公開されていないため、各鉄道会社の全路線の平均値で代用した。

b) 将来人口データ

将来人口データとして、国立環境研究所が開発した日本版 SSP 別人口シナリオ第 2 版(環境研究総合推進費 2-1805 成果(日本版 SSP3 次メッシュ人口シナリオ第 2 版)¹¹⁾より、性別・人口階級別 3 次メッシュ(1km×1km)人口シナリオ第 2 版の 2015 年人口データ、SSP1、SSP5 における近未来として 2050 年、21 世紀末として 2100 年の人口推計データを入手した。

区間通過人員は路線沿線人口に比例すると仮定し、次式を用いて“曝露”である将来区間通過人員(人/日)を推定した。

$$\begin{aligned} & \text{将来区間通過人員} \left(\frac{\text{人}}{\text{日}} \right) \\ &= \text{現在区間通過人員} \left(\frac{\text{人}}{\text{日}} \right) \times \frac{\text{将来路線沿線人口(人)}}{\text{現在路線沿線人口(人)}} \end{aligned} \quad (2)$$

なお、“路線沿線人口”は路線と交差するメッシュ内の人口として定義した。

(3) 脆弱性

a) インフラ形状による脆弱性

第 2 章で示した通り、鉄道路線を河川橋梁部・高地部・低地部に分け、それぞれについて水害に被災した際の不通日数(日)を設定し、“インフラ形状による脆弱性”として定義する。

本研究では過去の被災事例等を根拠として以下の表-3 に示すように設定する。

表-3 不通日数の設定

河川橋梁部	高地部	低地部
1年(365日)	4週間	1週間

それぞれの設定の根拠を以下に示す。

・河橋梁部

国土交通省「鉄道の防災・減災対策」¹²⁾や小湊ら(2016)¹³⁾を参照した。

・高地部

2018 年の伯備線の事例を参照した。西日本豪雨の影響により大規模な冠水や土砂の流入が発生したため不通となった。被災から 27 日後に全面運行を再開した。水害が発生した場合にも土砂の流入や道床の流出など、同様に復旧に時間を要する被害を受けることが想定されること

から、1 か月程度で運行再開できるものとして仮定した。

・低地部

2019 年の東武鉄道日光線の事例を参照した。台風 19 号の影響により路盤の流出等が発生し不通となった日光線であったが、12 日後に運行を再開した。このことから、高地部と比べて比較的容易に復旧が可能であると考えられ、数日程度で運行再開できるものと仮定した。

b) ネットワーク形状による脆弱性

第 2 章で示した通り、ある路線が長期不通になった際の迂回により損失する時間の 1 人あたり平均(分/人)を算出し、“ネットワーク形状による脆弱性”として定義する。道路ネットワークを対象とした脆弱性に関する既往研究²⁾では非重複経路数(重複するリンクを通らない経路数)を指標として用いることがある。

一方で、鉄道ネットワークを対象とする場合、

・リンクの数が限られていることから非重複経路が少ない

・ルートによっては迂回時間が長すぎるため現実的ではない

などの理由からこれを考慮に含めることにさほど意義がないため、本研究では損失時間をもって評価する。

本研究ではある路線(リンク i)が長期不通になった際の迂回により損失する時間の 1 人あたり平均 T_i を次式のように定義する。

$$T_i = \frac{\sum_j \left(\sum_k \left(P_{jk} (t_{ijk} - t_{0jk}) \right) \right)}{\sum_j \left(\sum_k (x \times P_{jk}) \right)} \quad (3)$$

ここで、t_{0jk}:平常時における出発地 j から目的地 k までの所要時間(分) t_{ijk}:リンク i 断絶時における出発地 j から目的地 k までの所要時間(分) P:出発地 j から目的地 k まで鉄道を利用して移動する人数(人) x:t_{ijk}-t_{0jk}=0 のとき 0, t_{ijk}-t_{0jk}>0 のとき 1 をとる変数 である。

本研究では ArcGIS 上で OD コストマトリックス解析を行うことで各 OD ペア間の所要時間を算出する。鉄道ラインデータを参照し、ネットワーク分析を行うためのデータセットを整備した。図-2 に整備したデータを示す。

図上に示すラインが各路線区を表し、すべてのリンクに日立システムズ「HyperDia」¹⁴⁾より得られた平日朝の平均所要時間を与えている。

図上に示すポイントが出発・目的地であり、46 都道府県庁所在地の中心駅を設定した。

出発地から目的地まで鉄道を利用して移動する人数は各都道府県間の鉄道を利用した流動数で代用することとし、国土交通省「都道府県間流動表(2015 年度)」を利用した。なお、このデータの中では関東都市圏(埼玉, 千葉, 東京, 神奈川), 近畿都市圏(京都, 大阪, 兵庫, 奈良), 中部都市圏(岐阜, 愛知, 三重)内々の流動量は評価の対象外としているため、国土数値情報「三大都市圏

パーソントリップ調査(関東圏(平成 22 年), 近畿圏(平成 24 年)中部圏(平成 25 年))」を集計することで補完した。

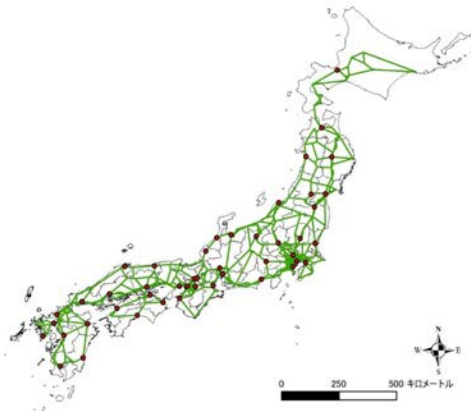


図-2 整備したネットワークデータ

また、リンクによっては断絶することで到達不可能となる OD ペアがある。その場合は Google マップより他交通機関による迂回時間を取得し、損失時間を算出した。

ネットワーク断絶による損失時間を図-3 に示す。

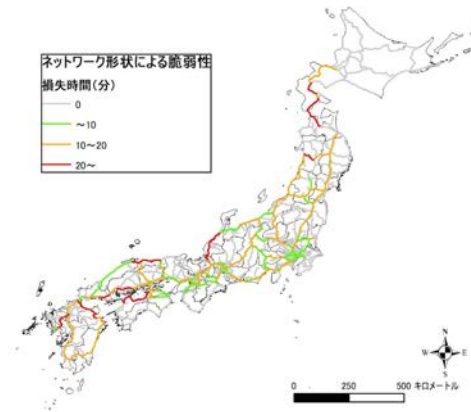


図-3 ネットワーク断絶による損失時間 (分)

他経路により代替が難しく、断絶すると損失時間が長くなってしまいう路線が明らかとなった。脆弱性が認められた路線の多くは都市間輸送を担う JR の路線であり、特急が走る路線は特に脆弱性が高い。また、新幹線路線の多くは断絶した場合に損失時間が発生することが分かった。その一方で、最短経路として用いられない並行在来線や生活路線は他路線の不通時を仮定した際に間接的に評価されるのみで、脆弱性を認めることができなかった。同様に都市圏内は鉄道ネットワークが発達しているため不通区間が発生しても迂回が比較的容易であり、脆弱性を認められない路線が多かった。そこで、後述の第 4 章では参考として損失時間に一律 30 分を加算した値を用いるケースを考慮し、標準気候における水害リスク評価を行う。

4. 評価結果

上述各因数の積をとり、5 パターンの全球気候モデル、2 パターンの SSP、2 パターンの土地利用変化シナリオごとに将来の水害による鉄道路線への影響を評価した。ここで、SSP1 は持続可能なシナリオであり、2100 年における全球気温は産業革命以前と比して 2°C 程度とされる。一方、SSP5 は化石燃料に依存して発展するシナリオであり、2100 年における全球気温は産業革命以前と比して 4.5°C 程度とされる。

(1) 基準気候

a) 損失時間をそのまま評価したケース

図-4 に評価結果を示す。

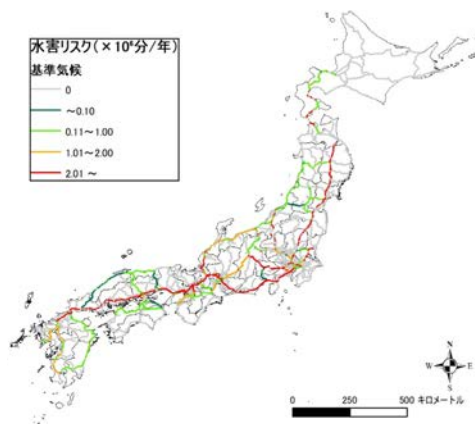


図-4 基準気候における水害リスク値 (分/年)

主に“曝露”の大きい JR 路線が水害リスクが大きいと評価された。

b) 損失時間に一律 30 分を加算したケース

図-5 に評価結果を示す。

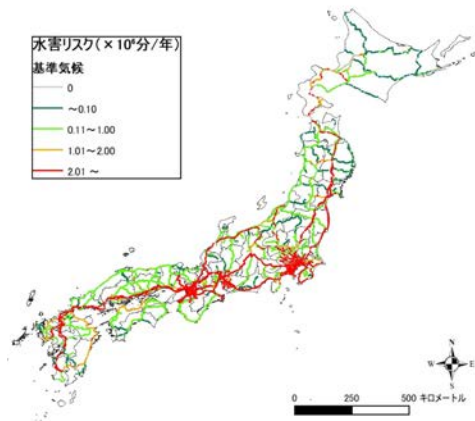


図-5 基準気候における水害リスク (損失時間に一律 30 分を加算した場合)

a) 項での評価と異なり、都市圏で生活路線として利用されるような私鉄の路線が水害リスク値が大きいと評価

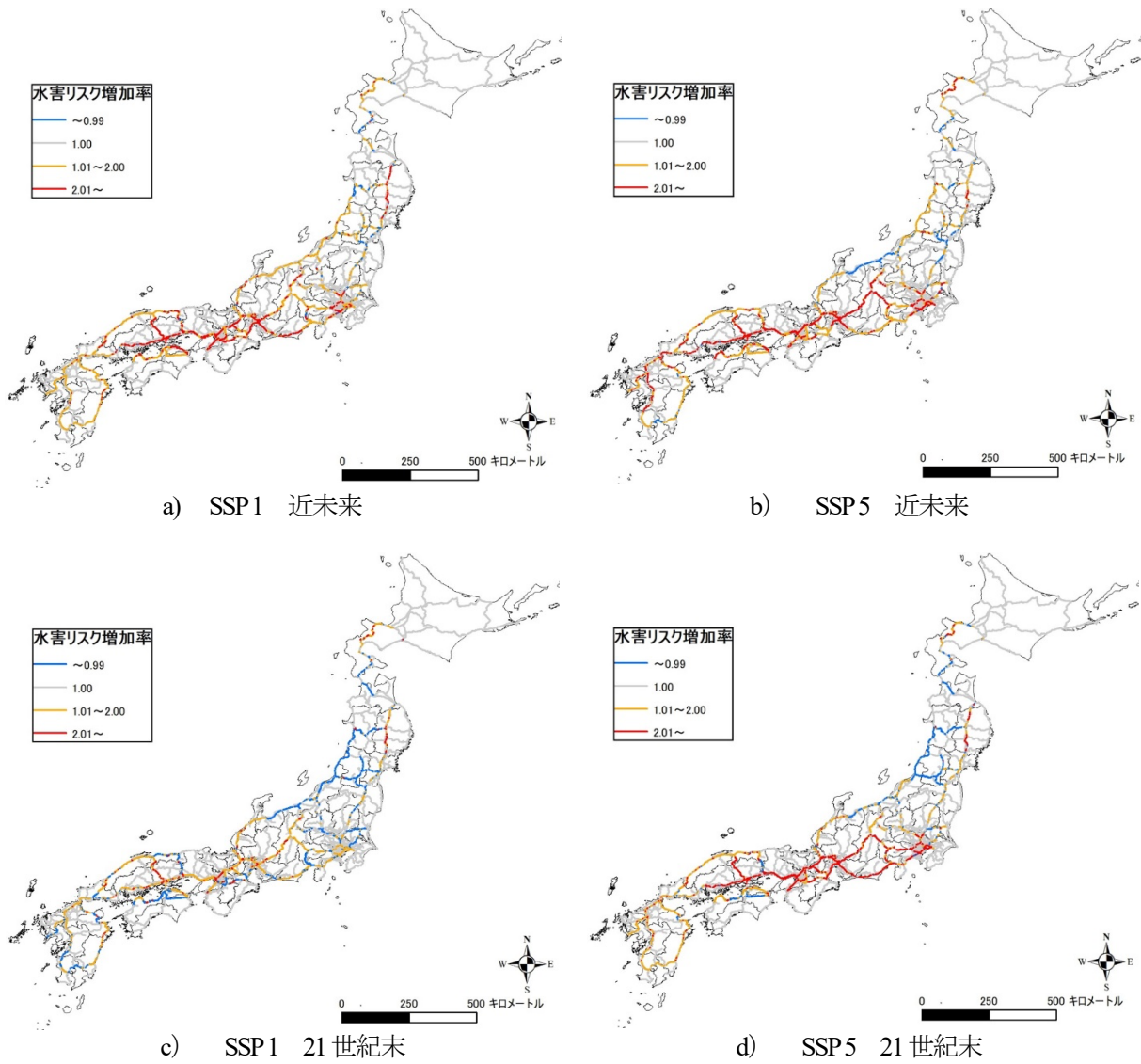


図-6 土地利用固定シナリオ基準気候に対する水害リスク値の増加率 (5 気候モデル平均)

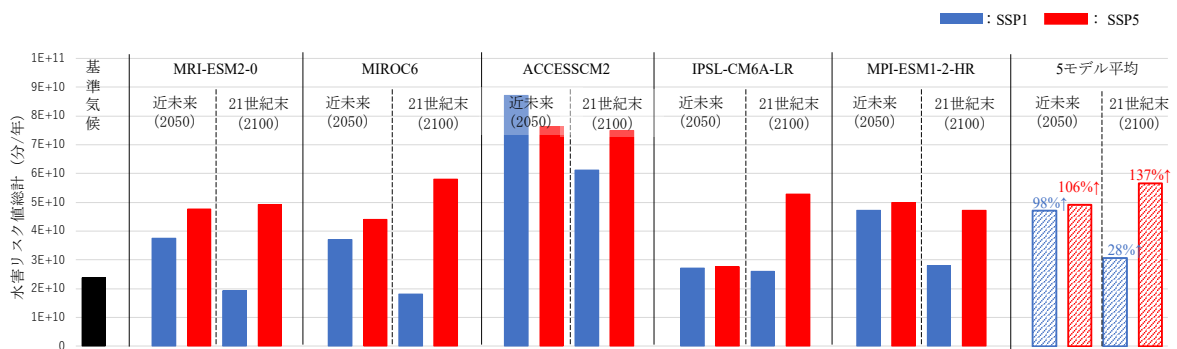


図-7 土地利用固定シナリオにおける全国の水害リスク値の総計

された。このような路線は路線長が短く、かつ水害に被災する可能性のある地域を走っているという特徴があるため、距離平均では水害リスク値が大きく評価されるものと考えられる。また、甲陽線、箕面線といったいわゆる「盲腸線」では区間通過人員が公開されていないことが多く、各鉄道会社の全線平均をもって代用していることから、過大評価されている可能性がある。より詳細なデータを用いた“曝露”の評価が求められる。

この結果によって“ネットワーク形状による脆弱性”の設定により水害リスク値の評価結果が異なることが示唆された。

(2) 土地利用固定シナリオ

基準気候に対する水害リスク値の増加率を図-6、各シナリオにおける水害リスク値の全国の総計を図-7 に示す。

基準気候と将来気候を比較すると、東北地方、九州地方などを走る基準気候で比較的水害リスク値の小さい路線では微減の傾向が見られる一方、東京・名古屋・大阪を結ぶような基準気候で比較的水害リスク値の大きい路線では増加の傾向が見られる。

21 世紀末では SSP1 シナリオでは水害リスク値が減少する路線が見られるものの、SSP5 シナリオでは依然として水害リスク値が増加する路線が目立つ。

全国統計をみても上述の傾向は明らかである。近未来において SSP1・SSP5 シナリオ間で大きな差はないが、21 世紀末では SSP1 シナリオでは微増(5モデル平均:28%増加)であるのに対し、SSP5 シナリオでは大きく増加(5モデル平均:136%増加)との結果が得られた。

(3) 土地利用変化シナリオ

基準気候に対する水害リスク値の増加率を図-8、各シナリオにおける水害リスク値の全国の総計を図-9 に示す。

人口減少を考慮に含むため、4.1 節で示した土地利用固定シナリオに対して増加率は小さく、21 世紀末では水害リスク値が減少する路線も確認できる。

土地利用固定シナリオと同様、近未来気候では SSP1・SSP5 シナリオ間で大きな差はないが、21 世紀末では明確な差が表れた(SSP1 シナリオ 5モデル平均:12%増加, SSP5 シナリオ 5モデル平均:97%増加)。特に、SSP1 シナリオでは選択する全球気候モデルによって基準気候よりも水害リスク値が減少するという結果が得られた。

加えて、土地利用固定シナリオと比較して水害リスク値が小さいことから、適切な土地利用を推進することで水害リスク値を低減できることが示唆された。

5. おわりに

本研究で得られた成果と知見は以下にまとめる。

(1) 鉄道路線を対象として水害リスクを計算する手法を作成した。

- ・水害リスクは被災確率の大小のみ、輸送人員の多寡のみ等からでは判断できない。複数の評価因数の兼ね合いから、直感的に判断しづらいリスクを把握することができる。
- ・ネットワーク形状を評価するため損失時間を因数として用いた。
- ・本手法は水害のみならず土砂災害や津波といった自然災害のリスク評価にも適用できる。

(2) 気候変動の影響を加味して鉄道路線が水害に被災する確率の将来変化と将来の区間通過人員を算出した。

- ・社会経済シナリオに基づく最新の将来予測データを用いた。
- ・水害に被災する確率は大きくなり、21 世紀末では現在の 1.5~2.0 倍になる。不通日数の期待値に着目すると 2.4~3.3 倍になる。
- ・21 世紀末では区間通過人員は全国平均で 2 割程度減少する。

(3) OD コストマトリックス分析を用いて鉄道路線の不通による損失時間を算出した。

- ・OD ペアを 46 都道府県庁所在地と設定し、流動数を考慮に含めて 1 人あたりの損失時間を算出した。

(4) 鉄道路線の現在・将来の水害リスクを定量的に評価し、可視化することができた。

- ・ハザードマップ等からでは水害に被災する確率を把握することは困難であるのに対し、水害リスクを定量的に評価することで水害対策の効率的な促進に役立てることができる。
- ・将来の人口減少の影響を加味しても水害リスクは 21 世紀末では最小で 12%、最大で 97%増加する。気候変動緩和策を推進し、持続可能シナリオに近づくことに加え、適切な土地利用規制を推進することで鉄道の水害リスクを低減することが可能である。

謝辞：本研究は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20S11818）の一環として実施したものである。

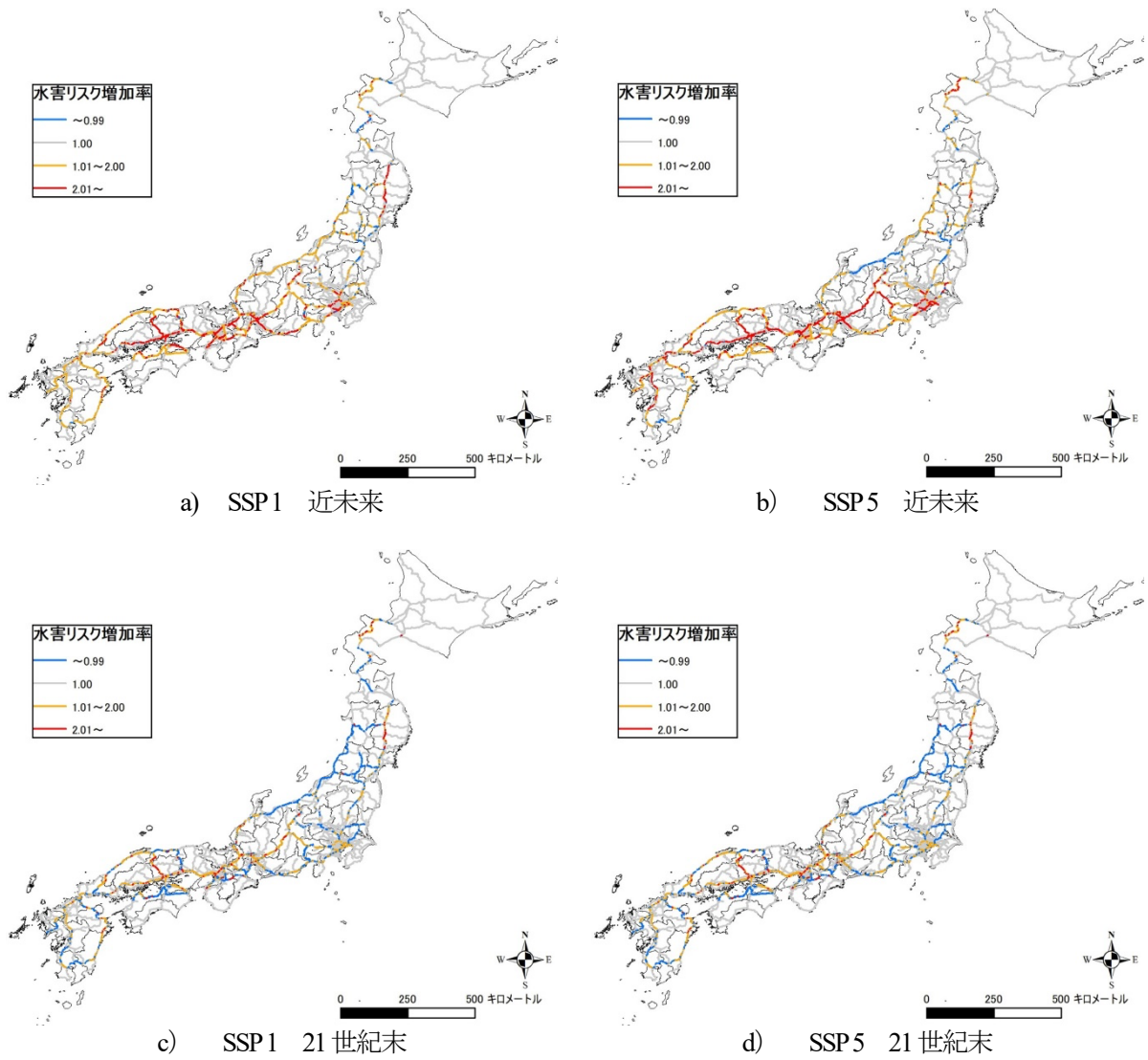


図-8 土地利用変化シナリオにおける基準気候に対する水害リスク値の増加率 (5 気候モデル平均)

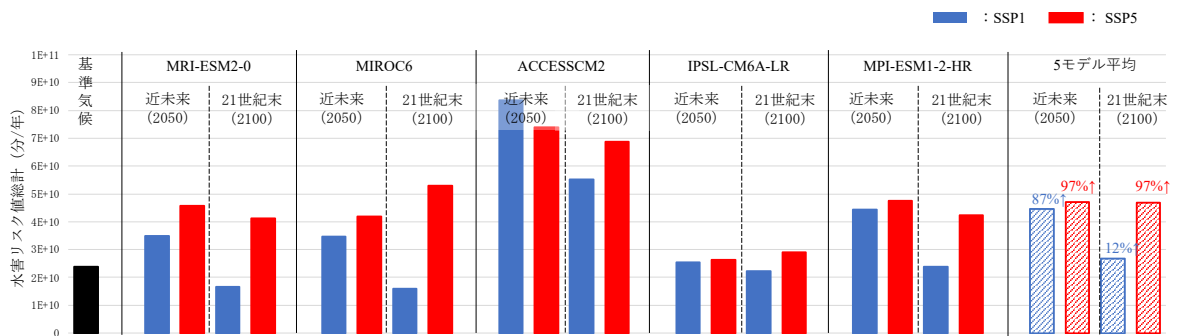


図-9 土地利用変化シナリオにおける全国の水害リスク値の総計

REFERENCES

- 1) 菊本統, 下野勘智, 伊藤和也, 大里重人, 稲垣秀輝, 日下部治: 我が国の自然災害に対する統合的リスク指標, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 73 巻 1 号, pp.43-57, 2017. [Kikumoto, M., Shimono, K., Itoh, K., Osato, S., Inagaki, H., & Kusakabe, O.: A Unified Risk Index for Natural Disasters. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F6 (Safety Problem)*, 73(1), 43-57, 2017.]
- 2) 高山芳樹, 加藤博和, 朴秀日, 田島治希: ネットワークの構造を考慮した道路網の水害・土砂災害リスク評価手法, 土木計画学研究・講演集, Vol.65, CD-ROM (43-3), 2022 [Takayama, Y., Kato, H., Park, S., Tajima, H. (2022) A Risk Evaluation of Flood and Sediment Disaster to Highway Network Considering Network Structure. *Proceedings of infrastructure planning (CD-ROM)*, 65, 43-3, 2022.]
- 3) 柳原駿太, 風間聡, 多田毅, 山本道, 峠嘉哉: 共有社会経済経路 (SSP) を用いた気候変動と土地利用変化による日本全国の洪水被害の変化, 土木学会論文集 G (環境), Vol.78, No.5, pp. I_387-I_396, 2022 [Yanagihara, H., Kazama, S., Tada, T., Yamamoto, T., & Touge, Y.: Changes in Flood Damage Throughout Japan Due to Climate Change and Land-Use Change Using Shared Socioeconomic Pathways. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)*, 78(5), I_387-I_395, 2022]
- 4) Marteaux, O. : Tomorrow's railway and climate change adaptation: Executive report, 2016
- 5) Olivier, M. : Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation, 2016.
- 6) Kostianaia, E.A., Kostianoy, A.G., Scheglov, M.A., Karelov, A.I., Vasileisky, A.S. : Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport, *Transport and Telecommunication*, vol.22, No.2, 2021
- 7) Kostianaia, E. A., Kostianoy, A. G., Scheglov, M. A., Karelov, A. I., & Vasileisky, A. S.: Impact of Regional Climate Change on the Infrastructure and Operability of Railway Transport. *Transport and Telecommunication Journal*, 22(2), 183-195, 2021.
- 8) 中山晶一郎, 朝倉康夫: 道路交通の信頼性評価, コロナ社, pp.298, 2014 [Nakayama, S., Asakura, Y.: *Road Traffic Reliability Assessment*, Corona company, 2014]
- 9) 瀬戸裕美子, 倉内文孝, 宇野伸宏: 脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, 2008 [Seto, Y., Kurauchi, F., Uno, N. (2008) Research on Road Network Connectivity Evaluation Using the Concept of Vulnerability. *Proceedings of infrastructure planning (CD-ROM)*, 37, 130, 2008]
- 10) 国土交通省: 国土数値情報 <https://nlftp.mlit.go.jp/index.html> (閲覧日 2023/1/11) [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: Digital national land information. Reference date: 2023/1/11]
- 11) 国土交通省: 水害の被害指標分析の手引, 2013. https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/pdf/higaisihyou_h25.pdf (閲覧日 2023/1/11) [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Guide to Flood Damage Index Analysis., 2013 Reference date: 2023/1/11]
- 12) 国土交通省: 鉄道統計年報 [令和元年度] https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000053.html (閲覧日 2023/1/11) [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism : Annual Report of Railway Statistics(2019). Reference date: 2023/1/11]
- 13) 日立システムズ: Hyper Dia <https://www.hyperdia.com/ja/> (閲覧日 2023/1/14) [Hitachi-systems: Hyper Dia. Reference date: 2023/1/14]

(Received March 6, 2023)

PREDICTION OF CHANGES IN FLOOD RISK FOR RAILWAY NETWORKS DUE TO CLIMATE CHANGE

Haruki TAJIMA, Feifan XU and Hirokazu KATO

There has been growing concern in recent years about the intensification and frequency of natural disasters due to climate change. The impact of natural disasters is significant on railways. Thus, it is an urgent issue to promote measures against flood damage based on the impact of climate change on transportation networks. This research aims to assess the current and future flood risk of railroads in Japan, by applying three evaluation indices "hazard," "exposure," and "vulnerability. According to the findings, the flood risk at the end of the twenty-first century will increase a little in the sustainable scenario and increase a lot in the fossil fuel-dependent scenario compared to the end of the twenty century.