アクティビティに基づく交通需要推計手法を用いた洪水発生時の交通分野の適応策の評価に関する研究

積田　典泰[1]・Ratthanaporn Kaewkluengklom[2]・Sideney Schreiner[3]
Sittha Jaensirisak[4]・福田　敦[5]

[1]正会員　日本大学助手　理工学部交通システム工学科（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台七丁目 24-1）
E-mail: tsumita.noriyasu@nihon-u.ac.jp

[2]Non Member of JSCE, Ubon Ratchathani University

[3]Non Member of JSCE, Nihon University

[4]Non Member of JSCE, Ubon Ratchathani University

[5]正会員　日本大学教授　理工学部（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1）
E-mail: fukuda.atsushi@nihon-u.ac.jp

東南アジア諸国の都市では洪水が頻繁に発生し，その影響は深刻さを増している．特に，これらの多くの都市では，一度外水氾濫が発生すると広範囲に長期間に亘って浸水状態が継続する．このような状況に適応するためには，洪水発生時の状況に対応した人々のアクティビティの変化を十分に把握し，それらを反映した上で交通需要の推計を行い，適応策を評価する必要がある．しかし，洪水発生時のアクティビティの変化を明示的に取り入れた交通分野の適応策の導入効果を評価する研究は少ない．そこで，本稿では，タイ・ウボンラチャタニ市を対象に，平常時と異なる洪水発生時のアクティビティの変化を把握すると共に，これらを反映した交通需要の推計手法を確立し，交通需要の推計結果から洪水の発生に対する交通分野における適応策の導入効果を評価した．

Key Words: *Riverine Flooding, Activity-Based Model, Traffic Demand Forecasting, Activity Adaptation Measure*

1. はじめに

近年，東南アジア諸国の都市では，洪水が頻繁に発生し，その深刻さは年々増している [1]．これらの多くの都市は低平地に位置している．一方で多くの河川が無堤防河川であり，一度外水氾濫が発生すると広範囲に冠水し都市域まで到達する．加えて，河床勾配が小さいことから排水は進まず長期間（1 ヵ月以上）に浸水が継続する [2]．そのため，道路ネットワークの接続性が長期に亘って損なわれ，都市全体のモビリティは大幅に低下し，都市生活に多大な影響を及ぼす場合が多い．

過去においては，タイでは，このような状況に対して保水機能を担う遊水池などを多数設置し，洪水の被害を回避したり，伝統的な高床式住居に共住し，小舟で移動したりすることで適応するなどしてきた．しかし，都市の人口の増大に伴って，開発需要に対応するために，洪水の被害が想定される地域や遊水機能を有する地域でも市街化を進めてきた [3]．市街地の拡大に対して，既存の治水対策（例えば，防水壁やダムの建設）によって洪水の発生による被害を防ごうとしてきたが，広域に外水氾濫した場合は冠水を避けることは難しく，近年，被害が増大してきた [4]．このような状況に対して，多くの住民は適応しているが，移動性は非常に低下するので，日々のアクティビティを大きく変化させていると想定される．

今後，地球温暖化の進行を抑える目的で如何なる緩和策を導入しても現在の状況が短期間で改善することはなく，むしろ以前にも増して異常気象は深刻となり，洪水の発生が増加し，その影響が拡大することが想定されている [5,6,7]．そのため，現在想定されている規模よりも大きな被害をもたらす洪水が発生する可能性が高い．

したがって，既存の治水対策では都市洪水の被害を完全に防ぐことは出来ず，都市生活へ深刻な影響が及ぶことは避けられない．特に，交通分野においては，洪水発生時においても交通ネットワークの接続性を維持し，最低限のモビリティを確保することが求められており，これに対応する適応策を検討する必要がある [8]．そしてこれらの適応策の効果を評価するためには，洪水が発生した際の人々のアクティビティやその特性を詳細に把握した上で，その結果を交通需要の推計時に反映する必要がある．

しかし，これまで，洪水発生時の住民のアクティビティやそのパターンの変化については，十分に明らかにされていない．前述の通り，これらの都市では，外水氾濫が発生した場合には，1 ヵ月以上にわたって浸水した状態が継続する．そのため，住民は，洪水の状態に合わせて平常時とは異なるアクティビティを行っており，それがある程度習慣化している可能性が高く，事前にその変化を十分に把握し，それに対応した適応策の導入を検討することが重要となる．

そこで，本稿では，タイ・ウボンラチャタニ市を対象に洪水発生時の交通分野の適応策を評価するために，平常時と異なるアクティビティの変化を把握し，交通分野の適応策の導入効果を構築したアクティビティに基づく交通需要の推計手法を用いて評価することを目的とする．

本稿の構成は以下の通りである．2 では，これまでの交通分野における適応策やその評価手法に関する研究および洪水発生時におけるアクティビティに関する分析に関する研究について整理する．3 では，本稿で交通分野における適応策の評価に用いるアクティビティに基づく交通需要の推計手法の概要について概説する．4 では，交通分野における適応策の評価に向けた導入方法の検討および適応策シナリオ設定について述べる．5 では，3 で構築したアクティビティに基づく交通需要の推計手法を用いて，4 で設定した適応策シナリオの評価を行った結果について示す．最後に 6 では，得られた知見をまとめて述べる．

2. 既存研究の整理

これまで，洪水の発生に対する都市のモビリティの確保の観点から交通分野における適応策に関する研究が実施され，国内外問わず議論されてきた．洪水発生時における交通状況の分析についても，交通需要の推計手法の観点から幾つかの研究が実施されてきた．

都市洪水の発生に対する都市のモビリティの確保の観点からの交通分野における適応策に関する議論は IPCC 第 4 次報告書で適応策の必要性について述べられて以降，進められてきた [9]．例えば，Stamos, et al.[10] は，交通分野におけるソフト・ハード面からみた適応策を列挙し，短期・中期・長期の交通分野における適応策を組み合わせたロードマップを作成している．Quinn ら [11]は，気候変動による異常気象が交通インフラに及ぼす影響を軽減するために，災害の発生を前提とした交通インフラの構築に向けた枠組みを提案している．このフレームワークから，実際的な意思決定のプロセスの中心として，特に気候変動の影響が生じる範囲とその不確実性を考慮して，適応策を設定することが求められており，段階的なアプローチが必要であることを示した．また，Vajjarapu, et al. [12]は，インド・バンガロール首都圏を対象として，都市洪水の発生が交通状態に与える影響の軽減に向けて，交通分野を中心とした適応策と治水対策を組み合わせた複数のシナリオを設定し，四段階推定法を用いて交通需要を推計し，総走行距離，総走行時間を用いて評価している．Gulzar et al. [13] は，洪水が発生した際の道路交通のモビリティの確保に向けた適応策の評価の枠組みを四段階推定法と洪水・土地利用モデルを統合し，評価する方法を提案している．Pregnolato et al. [14,15] は，洪水の発生が道路交通に与える影響を把握するために浸水深と旅行速度の関数を推定し，表現した．さらに，この影響を軽減するために，“断面交通量”および“浸水深”を組み合わせて優先的に適応策を導入する道路区間を選定し，代替の道路区間の建設を実施した際の導入効果を総走行距離，総走行時間を用いて評価している．また，山下ら [16]，Chang, et al. [17]や神田 [18]も同様に，交通分野における適応策の導入に向けた評価手法の開発や分析を行っている．このように交通分野における適応策とその効果に関しては多くの研究がなされているが，洪水による人々のアクティビティの変化を明示的に考慮した研究は少ない．

そのような中で，近年，個人の活動と交通行動の関係を定式化し，交通需要を推計する手法である Activity Based Model を用いて洪水発生時におけるアクティビティへの影響を分析する研究もみられる．例えば，Pyatkova,et al.[19]は，洪水発生時の道路交通への浸水の影響を自由流速度の低下として表現して Activity Based Model を適用し，交通状態の変化を分析している．また，Yu, et al.[20]は，アメリカ・フロリダ州マイアミ・デイド群を対象として，Activity Based Model を用いて 2045 年の将来時点の交通需要を推計した上で，台風発生による都市洪水に対する適応策を評価している．結果として，洪水の規模によって総走行時間に与える影響は大きく異なり，洪水の発生が交通行動へ与える影響がアクティビティ毎に異なることを示した．また，Cools and Creemers[21]や Saddi, et al.[22]も同様に Activity Based Model を用いて，洪水発生時の交通状態への影響を分析している．し

かし，これらの研究で，想定している洪水は突発的に発生する内水洪水を対象としており，本研究で対象とする長期間（1 か月以上）にわたって浸水状態が継続し大幅にアクティビティが変化する外水氾濫発生時における分析は少ない．著者ら[23]は，タイ・ウボンラチャタニ市における長期間に亘って冠水が継続する洪水を対象に，交通分野における適応策を分析したが，これまでは，トリップベースの四段階推定法を用いて交通需要推計を行い，評価してきた．また，アクティビティに基づく交通需要の推計手法を用いて交通需要の推計に関して検討し，洪水発生時におけるトリップベースのアンケート調査から交通行動の変化を分析し，交通需要の推計時に反映している．しかし，洪水の発生による人々のアクティビティの変化を明示的に考慮し，反映した交通分野における適応策の評価は実施できていない[24]．

3. アクティビティに基づく交通需要推計手法を用いた適応策の評価

本章では，都市洪水の発生に対する交通分野における適応策の評価に用いたアクティビティに基づく交通需要の推計手法について概説した．また，洪水の発生によるアクティビティの変化を把握するために実施したアンケート調査についても記述した．

(1) アクティビティに基づく交通需要の推計手法の概要

これまで，多くの既往研究で，アクティビティに基づく交通需要モデルが構築されている．アクティビティに基づく交通需要の推計モデルは，(1)個人のアクティビティを離散選択モデルに基づいて確率的に推計する手法（Ben-Akiva, et al.[25]，Yagi, et al.[26]），(2)一定のルールに基づいて個人のアクティビティを規定する手法（藤井ら[27]，Arentze, et al.[28]），(3)上記モデルの 2 つを統合したハイブリット型モデル（Yu, et al.[20]，Saddi, et al.[22]）の 3 種類に分類することができる．

本稿では，Scherr, et al.[29]が開発したハイブリットモデルの 1 つである Mobi.plan モデルをベースとして洪水の発生による影響を考慮できるように改良を行い，洪水発生時の交通需要の推計および交通分野の適応策の評価を行った．本稿で用いたモデルの交通需要の推計フローは図-1 に示すとおりである．a)合成人口データの作成，b)アクティビティの変化の把握と必要なパラメータの推定，c)アクティビティに基づく交通需要の推計，d)交通量配分，e) 洪水の発生による影響の表現の 5 つのプロセスで構成されている．

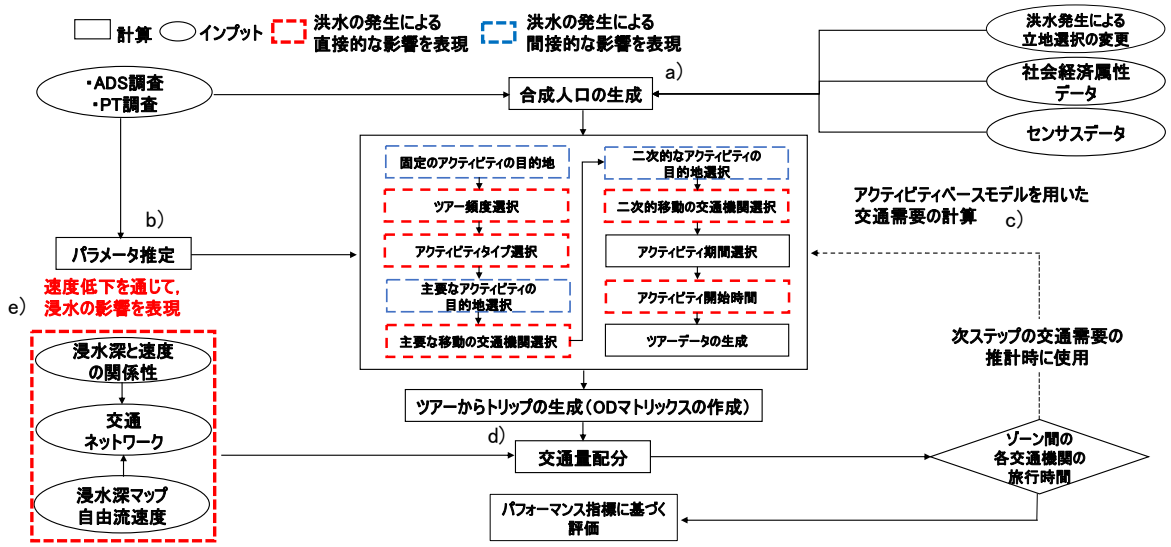


図-1　アクティビティに基づく交通需要の推計手法の概要

a) 合成人口データの作成

アクティビティに基づく交通需要の推計モデルは，個人および世帯属性を考慮し，個人毎にアクティビティと交通行動の関係を定式化して都市全体の交通需要を推計する．そのため，アクティビティに基づく交通需要の推計には，非集計の都市全体の個人データを生成する必要がある．

そこで，本稿では，Ye ら[29]が提案した IPU（Interactive Proportional Updating）法を用いて拡大係数を計算し，属性を含む都市全体の合成人口を生成した．IPU 法は，複数の集計表の周辺度数を制約条件として拡大係数を計算する手法であり，IPU 法のベースとなった IPF 法の課題

とされていた個人および世帯属性について同時に考慮して計算することができる．本稿では，集計された統計データおよび 2015 年に実施されたパーソントリップ調査データを用いて，IPU 法を適用した．生成した合成人口の年齢と所得に関して，統計データと比較した結果について**図-2** および**図-3** に示す．

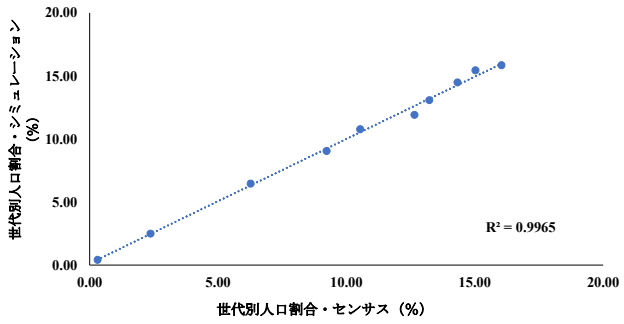


図-2　合成人口とセンサスデータの所得分布比較

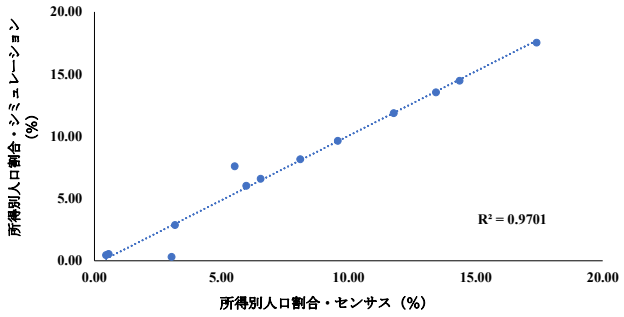


図-3　合成人口とセンサスデータの所得分布比較

結果として，それぞれの決定係数は 0.9965，0.9701 となり，年齢および所得の分布ともに良好な結果が得られた．この個人属性および世帯属性を含む合成人口データを利用することで，アクティビティに基づく交通需要の推計モデルを用いた交通需要の推計が可能となる．

b)洪水発生時のアクティビティの変化の把握と必要なパラメータの推定

洪水の発生によるアクティビティの変化を把握するために，同都市を対象にアクティビティダイアリー調査を実施した（**表-1**）．本稿では，タイ・ウボンラチャタニ市を対象として，合計 300 世帯，810 名の方に対面でのご回答をいただき，洪水の発生によるアクティビティの変化について把握した．**図-4** および**図-5** には，アクティビティダイアリー調査結果から洪水発生時に特徴的なアクティビティの変化のあった世帯（夫婦＋子供）の時空間パス図を比較した．

結果として，洪水発生時には，子供のアクティビティについては変化が見られないが，妻は 1 日中滞在し，その代わりに，夫が経路の変更及びショッピングの立ち寄りを行うように変化した．

表-1　アンケートの調査概要

サンプル数	810 名（300 世帯）
調査期間	2022 年 7 月
調査内容（個人票）	交通行動： ・移動手段 ・移動時間（出発／到着時間） ・目的地 活動： ・活動開始時刻，終了時刻 ・活動内容 ・活動の訪問先
調査内容（世帯票）	・世帯構成員全員の性別 年齢，続柄，免許保有有無 ・職業，勤務／通学先および勤務形態，住宅タイプ，自動車保有有無

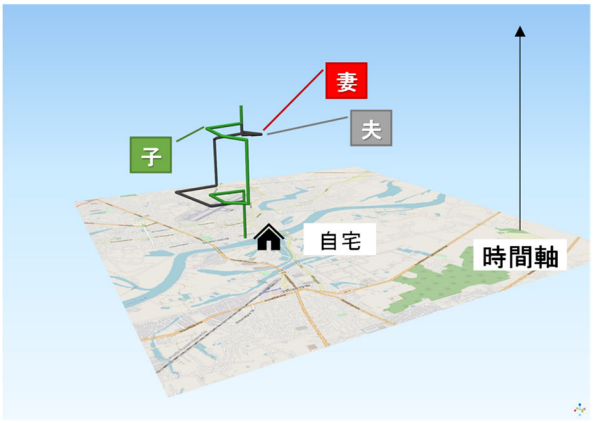


図-4　ある世帯の時空間パス図（定常時）

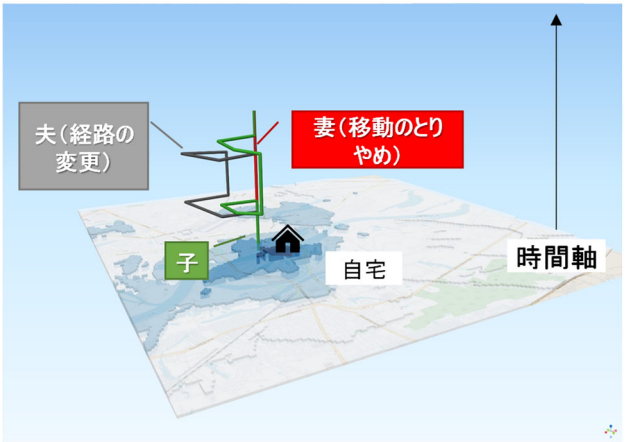


図-5　ある世帯の時空間パス図（洪水発生時）

さらに，回答者を就業者，就学者，非就業者の 3 種類に分けて，アクティビティパターンを数え上げ，それぞれの分類の定常時と洪水発生時のアクティビティパターン数の割合を比較した（**表-2**）．

結果として，就業者については，定常時には自宅から就業地へ向かい自宅に戻るパターン数の割合が 34.7%であったが，洪水発生時には 24.7%まで，約 10%減少した．一方で，洪水発生時には，就業の休憩中に買い物をするアクティビティパターン数の割合が約 5.5%増加した（定常時：31.5%，洪水発生時：37.0%）．この理由としては，就業者が非就業者の代わりに買い物をするために，就業中の休憩時に買い物をするパターン数の割合が増加したことが挙げられる．次に，就学者については自宅から就学地に行き，そのまま帰宅するパターンが定常時および洪水発生時のそれぞれで約 70%となっており，その他のパターンについても大きな差はなかった．最後に，非就業者については，定常時については，約 45%が買い物のみをするパターンであったが，そのうちの約 20%が 1 日中自宅に滞在するパターンに変化していた（定常時：45.7%，洪水発生時：36.2%）．買い物については，非就業者の代わりに就業者が行い，私事については必ずしも実施する必要がない活動であるため，洪水発生時にはとりやめられたことが理由として挙げられる．

表-2　定常時と洪水発生時のアクティビティパターンの比較

分類	アクティビティパターン	パターン数（定常時）	パターン数（洪水発生時）	パターン数の増減
就業者（合計:620）	自宅→就業→自宅	215 [34.7]	153 [24.7]	−62 [−10.0]
	自宅→買い物→就業→自宅	81 [13.1]	83 [13.4]	2 [0.3]
	自宅→就業→買い物→自宅	18 [2.9]	21 [3.4]	3 [0.5]
	自宅→就業→買い物→就業→自宅	195 [31.5]	229 [37.0]	34 [5.5]
就学者（合計:96）	自宅→就学→自宅	69 [71.9]	64 [66.7]	−5 [−5.2]
	自宅→就学→買い物→自宅	16 [16.7]	12 [12.5]	−4 [−4.2]
	自宅→買い物→就学→自宅	5 [5.2]	5 [5.2]	0 [0.0]
非就業者（合計:94）	自宅→私事→自宅	9 [9.6]	7 [7.5]	−2 [−2.1]
	自宅→送迎→自宅	7 [7.5]	5 [5.3]	−2 [−2.2]
	自宅→買い物→自宅	43 [45.7]	34 [36.2]	−9 [−9.5]
	自宅	147 [18.1]	192 [23.6]	45 [5.5]

本稿で使用したアクティビティに基づく交通需要の推計モデルでは，移動頻度，目的地，活動パターン，交通機関選択に関してのパラメータが必要である．モデル内では，離散選択モデル（多項ロジットモデル）の結果が適用されている．そのため，モデル内の選択モデルで必要なパラメータについては，対象都市で実施したアクティティビティダイアリー調査の結果に基づき，推計した．

必要なパラメータの推計結果の一例として，**表-3** にアンケート調査結果から推定した就業者の移動頻度に関するパラメータの推定結果を示す．**表-3** に就業者の移動頻度のパラメータの推定結果を示す（なお，ASC は選択肢固有定数項および括弧内は t 値を表す）．推定結果から自宅から就業地までの距離および自動車利用可能性の変数が有意となり，尤度比は 0.414 となった．結果として，自宅から就業地までの距離が移動頻度の選択に大きく影響を与えており，移動距離が大きくなると移動頻度が小さくなることを示している．

表-3　就業者の移動頻度のパラメータの推定結果

変数	Tour0	Tour1
選択肢固有定数	−	1.651 (−2.164)
年齢	2.505 (0.988)	−2.507 (−0.989)
就業地までの距離	0.0167 (4.646)	−0.0167 (−2.646)
車両保有有無	−	0.766 (14.67)
尤度比	0.414	
的中率	85.16%	

c)アクティビティに基づく交通需要の推計

a)生成した合成人口データと b)必要なパラメータを使用して，アクティビティの選択確率を用いた計算を実行し，1 日の交通需要を推定した．具体的には，はじめに，主要な目的地の選択を行い，その移動頻度を決定する．その後，主要なアクティビティの目的地および交通機関を選択し，中間アクティビティの目的地および交通機関を選択する．最終的に，アクティビティの開始時間および時間が決定することで，個人のツアーデータが生成される．そのデータをトリップ毎に分割し，交通機関別の OD 表を作成する．

d)交通量配分

c)で作成した交通機関別の OD 表と道路ネットワークデータを用いて，四段階推定法と同様に配分交通量の計算を行う．本稿では，利用者均衡配分を適用し，交通量を配分した．配分結果から得られたそれぞれの交通機関の OD 間の旅行時間および最短経路距離をサービスレベルとして，次ステップのアクティビティに基づく交通需要の推計時に利用することで，洪水発生時における交通需要を推計する．なお，本稿では，これらを繰り返し計算し，前後ステップの配分交通量の差が 1%以内に収まるか，または 100 回計算が行われた時点の結果を，最終的な推計結果としている．

e) 洪水発生による影響の表現

洪水の発生による交通需要への影響を，アクティビティに基づく交通需要の推計モデルを用いて分析するために，洪水の発生による冠水または道路閉塞の影響を各道路区間のサービスレベルを変更することで表現した．具体的には，iTIC(Thai Intelligent Traffic Information Center)が提供するプローブデータ用いて，各道路区間の定常時の速

度別にデータを分類した上で，洪水発生時の浸水深に応じて，冠水による速度の低下量を算出した．これらのデータを用いて，定常時の速度に基づく，各浸水深別の速度低下量を表す関数を推定した（**図-6**）．なお，分析に用いた浸水深については同都市を対象に著者ら[31]が過去に実施したアンケート調査結果に基づいて推定した浸水深データを用いて分析した．また，推定した関数については，タイ・ナコンラチャシマ市において実際の浸水深と旅行速度の低下量について実地調査を行った上で，比較したところ同様の傾向があることを確認している．

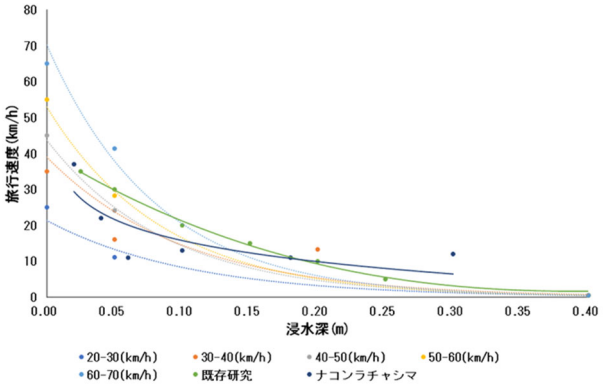


図-6　推定した浸水深と速度の低下量の関数

図-6 の関数と任意の浸水深を各道路区間に所与として設定し，組み合わせて利用することで，各道路区間の洪水発生時の旅行速度の低下や閉塞状況を表現することができる．このネットワークを用いた配分結果から得られた，各交通機関の OD 間の旅行時間および最短旅行距離をアクティビティに基づく交通需要の推計時の入力変数として利用し，洪水発生時の交通需要を推計した．

3.2　タイ・ウボンラチャタニ市における洪水の発生に伴うこれまでの被害状況とその対応

本稿では，タイ東北部の中規模都市であるウボンラチャタニ市を対象として分析した．同都市では，都市中央に南北に分断するようにムン川が流れており，上流側でチー川と合流することも相まって雨季（5～10 月）には上流から大量の水が流出してくる（**図-7**）．それによって，ムン川周辺の住宅で浸水するだけでなく，多くの道路区間で冠水や寸断が発生する．同都市では，雨季に都市洪水が頻繁に発生しているが，特に，1938，1950，1978，1998-2002，2019，2022 年に例年と比べて規模の大きな洪水が発生したことが記録されている．その中でも特に，2002 年に発生した洪水では，非常に長期間（浸水期間：76 日）に亘って南北をつなぐ 4 つの道路区間の全てが冠水あるいは寸断し，都市のモビリティが著しく低下する状況に陥った[32]．この洪水の発生による経済的な被害は総計で 8.5 億バーツ（1 バーツ≒4 円）であったと記録されている．

これに対して，地方政府は，**図-7** に示す西側および東側バイパスの一部区間（赤マーカー部分）の嵩上げ（50～150 cm）するとともに，河川周辺のバイパス区間では土嚢を積み重ねることで河川からの喫水を道路区間へ侵入することを防いでいる．これと同時に，都市の南側の沿岸部では冠水を防ぐために，防水壁が建設された．これによって，2019 年や 2022 年の洪水発生時には東側バイパスは通行可能であり，西側バイパスは 4 車線（片側 2 車線）のうち 2 車線は利用であった．しかし，西側バイパスおよび東側バイパスともに平常時よりも旅行速度は非常に低下し，中央の橋が通行不可能となったことで多くの車両が迂回する必要が出てきた（**図-8**）．

そのため，洪水の発生に伴う被害が深刻化していく中で，既存の治水対策に加えて，都市のモビリティの確保に向けた交通分野における適応策の更なる導入が急務となっている．

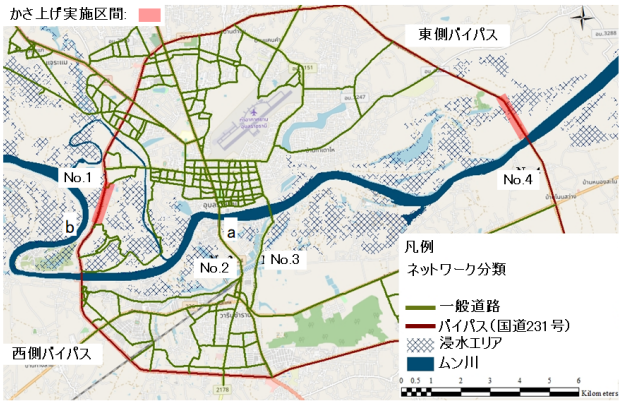


図-7　対象都市の道路ネットワークと浸水エリア



図-8　洪水発生時の道路交通の様子

3.3 構築したアクティビティに基づく交通需要推計手法の妥当性の検証

アクティビティに基づく交通需要の推計結果が交通状況を表現できているか検証するために，アクティビティパターンおよび配分交通量を比較した．具体的には，ア

ンケート調査から得られた結果とアクティビティに基づく交通需要の推計から得られたアクティビティパターンの割合およびピーク 1 時間の配分交通量と 2015 年に実施されたパーソントリップ調査の付随調査で得られた観測交通量データを分析した [33].

初めに，アクティビティダイアリー調査結果から得られたアクティビティパターン数の割合とアクティビティに基づく交通需要の推計結果から得られたアクティビティパターンの割合を比較した（**表-3**）．

結果として，多くのアクティビティをパターン毎に 5%以内の誤差で推定することができたが，一部のパターンでは最大 8%の誤差が発生した．これは，就業者については，ツアー頻度の割合を推定する際に，自宅に滞在（1 日中自宅に滞在）する割合が過大に推定されてしまったことが理由として挙げられる．また，非就業者の私事を含むパターン数が調査結果と比較すると大きくなっているが，自宅に滞在する割合が過小に推計されてしまったが結果として，一部のアクティビティパターンを除いて，定常時におけるそれぞれのアクティビティパターン数の割合の傾向は概ね同様であり，十分に現況を表現できていることを確認した．

表-3 推計値と観測値のアクティビティパターン数の割合の比較

分類	アクティビティパターン	パターン数の割合（調査結果）	パターン数の割合（モデル）	差分（%）
就業者	自宅→就業→自宅	43.43	42.87	-0.56
	自宅→就業→私事→自宅	3.14	0.24	-2.9
	自宅→就業→買い物→自宅	2.86	0.27	-2.59
	自宅→就業→買い物→就業→自宅	18.57	25.52	6.95
	自宅→就業→私事→就業→自宅	18.29	15.34	-2.95
就学者	自宅→就学→自宅	55.29	61.04	5.75
	自宅→就学→私事→自宅	5.88	4.74	-1.14
	自宅→私事→就学→自宅	11.76	12.14	0.38
非就業者	自宅→私事→自宅	36.63	43.19	6.56
	自宅→送迎→自宅	8.42	4.8	-3.62
	自宅→買い物→自宅	26.73	23.83	-2.9
	自宅	20.57	21.29	0.72

次に，**図-9** に示した 2015 年に実施された PT 調査の付随調査として実施された 16 地点（図中赤丸地点の両方）の交通量調査の結果（夕ピーク 1 時間（16:30－17:30）の観測交通量）と，アクティビティベースモデルを用いた 1 日の交通需要の推計結果から，夕ピーク時の OD 表を作成して配分交通量を計算し，比較した．

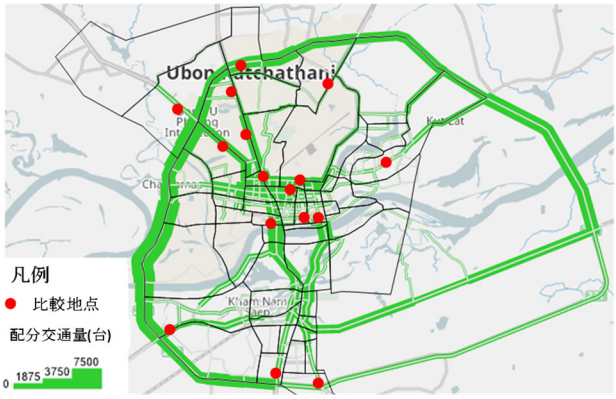


図-9 配分交通量と観測交通量の比較

また，夕ピーク 1 時間（16:30-17:30）の配分交通量と観測交通量のデータを用いて回帰分析を実施した（**図-10**）．その結果として，決定係数は 0.8925 となり，良好な結果が得られ，アクティビティに基づく交通需要の推計が交通状態を表現していることを示した．

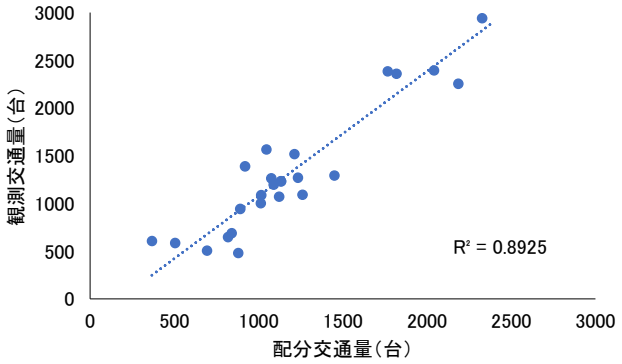


図-10 観測交通量と配分交通量の比較（ピーク 1 時間）

4. 交通分野における適応策の整理とシナリオ設定

4.1 交通分野における適応策の整理

都市洪水の発生に対する交通分野における適応策のうち本稿で評価する交通分野における適応策を選定するために，ガイドラインや既存文献の中で示されている適応策を整理した（**表-4**）．具体的には，独立行政法人国際協力機構（JICA）が発効している気候変動適応対策支援ツール（JICA Climate-FIT(Adaptation)）[34]，我が国における気候変動適応計画 [35]，European Environment Agency[36]，アジア開発銀行が発行している適応策に関する報告書 [37]および既存文献 [10),12)]で示された交通分野における適応策を**表-4** にまとめた．この中で，道路嵩上げ政策を選定した．道路嵩上げ政策は，すでに，対象都市を含めた多くの都市（例えば，タイ・バンコク，日本・福知山市，カンボ

ジア・プノンペン）で導入されており，適用可能性が高いと判断したため，選定した．

表-4　交通分野における適応策の整理

区分	適応策
交通	洪水の発生による冠水区間の情報提供
	道路寸断に対する緊急ルートの整備と計画
	道路嵩上げ
	高架道路の建設
	ピロティ建築（高床式住居）

4.2 道路嵩上げに向けた優先順位付け手法の検討

これまで，効率的な道路整備に向けて多くの既往文献[38),39)]で優先順位付け方法の検討や開発がされてきた．その中で，時間的距離および空間的距離あるいは空間的な近接性が平常時と近いほど高いという観点から，災害発生時におけるアクセシビリティ指標を用いて改善効果を推定する方法に着目し，事象の生起確率を考慮せずに災害が発生した際の影響のみに基づいて優先順位付け手法が多くの文献で検討されている（大澤ら[40)]，Talylor, et al.[41)]）．

そこで，本稿では，アクセシビリティは個人が希望する時間および場所でのアクティビティの行いやすさと定義し，各ゾーンの中心から閾値を 15 分以内として設定した上で，アクセスできる施設の数の割合として算出した．具体的には，**図-11** に示すように，はじめに対象都市のゾーン中心（55 点）とネットワークデータを作成し，職場（134 点），学校（34 点），病院（73 点），ショッピングセンター・市場（192 点）および公園（26 点）の POI (Point Of Interest)を作成した．このデータを用いて，各施設のタイプ毎の定常時におけるアクセスできる施設数を分析した．

次に，洪水発生時のアクセシビリティを算出するために，洪水の発生による影響を対象都市の道路ネットワーク上で浸水による速度低下や寸断の状況を推定した浸水深データと道路ネットワークを重ね合わせ，各道路区間に対して浸水深に応じた各道路区間での速度低下または通行不可の属性を付与して表現した．この結果と定常時のアクセシビリティの算出結果を比較することで，都市洪水によるアクセシビリティの低下量を把握した．

その後，洪水発生時に影響を受ける 104 の道路区間を対象として，定常時と同様に利用可能であると仮定した場合に，どの程度アクセシビリティが改善するのかを算出することで，各道路区間の道路嵩上げ導入の優先付けを行った．具体的には，式 1 で示したように，15 分以内に各ゾーンから到達可能な施設数の割合を算出した．その後，都市全体でのアクセシビリティを算出（式２）し，洪水発生時のアクセシビリティを比較した上で，その改善効果を示した（式３）．

上式から得られた都市全体のアクセシビリティの改善度が 5%以上ならば中，10%以上ならば高と閾値を設けた上で優先付けを行った．洪水発生時に冠水によって，速度低下あるいは寸断する道路区間を対象として計算を行った結果を**図-11** に示す．結果として，洪水が発生した際に影響が生ずる 104 区間のうち優先度中：8 区間，優先度高：7 区間を選定した．各シナリオでは，この優先順位付けの結果に基づいて，選定された各道路区間を嵩上げした場合の効果を推計した

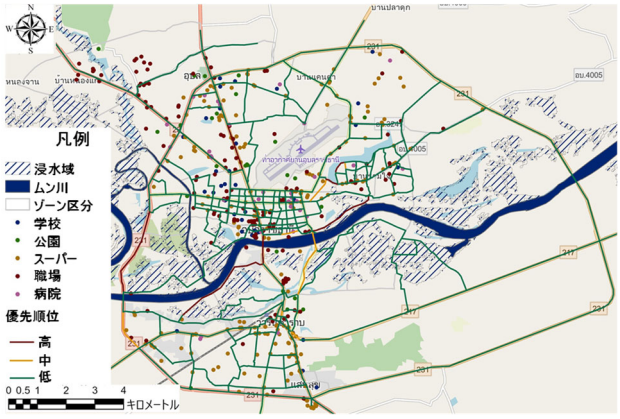


図-11　道路整備の優先順位付け結果

$$ACC_i = \frac{\sum_{f=1}^{n} ACC_{if}}{X_f} \tag{1}$$

$$TA = \sum_{i=1}^{i} ACC_i \tag{2}$$

$$TAR^{with} = \frac{TA^{with} - TA^{without}}{TA^{usual} - TA^{without}} \tag{3}$$

4.3 適応策シナリオの設定

前節で選定した優先的に整備を実施するべきド往路区間に対して，道路嵩上げを導入した場合の効果を評価するために複数のシナリオを設定した（**表-5**）．具体的には，対策なしのシナリオを A，優先順位付けの結果に基づいて，優先度中（シナリオ B）と優先度高（シナリオ C）および優先度中＋高（シナリオ D）を実施した場合の 3 つのシナリオを設定した．これらのシナリオとシナリオ A と比較することで道路嵩上げの実施による導入効果を明らかにした．

表-5 設定した適応策シナリオ

シナリオ	パターン設定
A	道路嵩上げの導入なし
B	道路嵩上げの導入有（優先度中）
C	道路嵩上げの導入有（優先度高）
D	道路嵩上げの導入有（優先度中＋高）

5. 交通分野における適応策の評価結果

5.1 アクティビティパターン

構築したアクティビティに基づく交通需要の推計モデルを用いてそれぞれの適応策シナリオの交通需要の推計結果から，アンケート調査の集計結果と同様に，就業者，就学者および非就業者の 3 つのタイプに分類し，アクティビティパターンを比較した．その結果を**表-6** に示す．

平常時と比較して，洪水発生時にはアンケート調査と同様に自宅に一日中滞在する非就業者が約 15%増加しているが，就業者が自宅に帰宅中あるいは就業時の休憩時に買い物のアクティビティを行うパターンが約 10%増加している．洪水発生時には，就業者が非就業者の代わりにアクティビティを行っている．

一方で，道路嵩上げを実施した場合には，自宅に滞在するパターン数が増加した．これは，道路嵩上げの実施によって，移動が確保されたためことで定常時のパターンと同様のアクティビティを行うことができている．また，同様に，就業者が帰宅あるいは休憩中にショッピングをするパターン数が減少している．これは，非就業者が対策実施をしなかった場合に移動できなくなっていた状況が解消され，移動できるようになったため，定常時のパターンに戻った．

表-6 シナリオ別のアクティビティパターンの比較

	アクティビティパターン	平常時	A	B	C	D
就業者	HWH	50,098	47,455	49,779	50,688	52,693
	HWOH	283	29(5)	38(7)	29(6)	41(9)
	HWSH	316	46(23)	48(22)	56(29)	58(20)
	HWSWH	29,828	35102 (2628)	31441 (2128)	30172 (6208)	30007 (6198)
	HWOWH	17,924	16364 (80)	18802 (142)	16865 (241)	18203 (196)
就学者	HEH	31,665	32,115	33,688	34,562	35,459
	HOEH	2,460	1912 (18)	2006 (22)	2005 (25)	2410 (32)
	HEOH	6,298	4844 (49)	5081 (51)	5327 (53)	6152 (59)
非就業者	HOH	38,174	27957 (1772)	29326 (1753)	30099 (2064)	29424 (1541)
	HLH	4,244	3936 (54)	3931 (25)	3944 (252)	3096 (138)
	HSH	21,058	16515 (251)	17117 (305)	18371 (290)	15963 (1926)
	H	54,759	70,832	63,857	62,988	61,601

5.2 交通量配分結果

次に，それぞれのシナリオで交通量配分を行った結果を**図-12** から**図-15** に示す．各図では，各道路区間の高さが交通量，色の濃さが旅行速度を表現している．洪水発生時に対策を実施しない場合（シナリオ A）では，ピーク 1 時間で約 7,500 台の車両が迂回をしているが，シナリオ B：約 5,400 台，シナリオ C：1,780 台，シナリオ D：1,680 台と道路嵩上げを実施することで，大幅に迂回する車両を減少出来ている．特に，西側バイパスおよび中央（左側）の橋を整備することで，迂回する車両を減少させることができている．西側や東側バイパスでは，嵩上げを実施すること，都市全体で旅行速度が向上している．

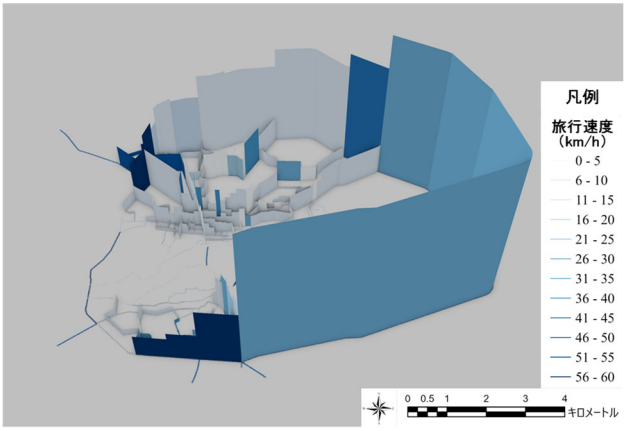


図-12 交通量の配分結果（シナリオ A）

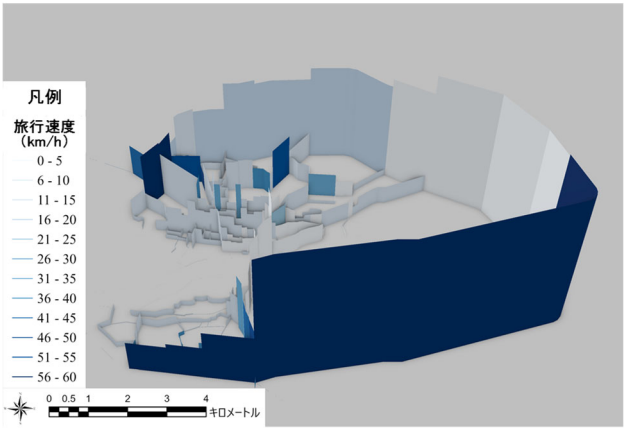


図-13 交通量の配分結果（シナリオ B）

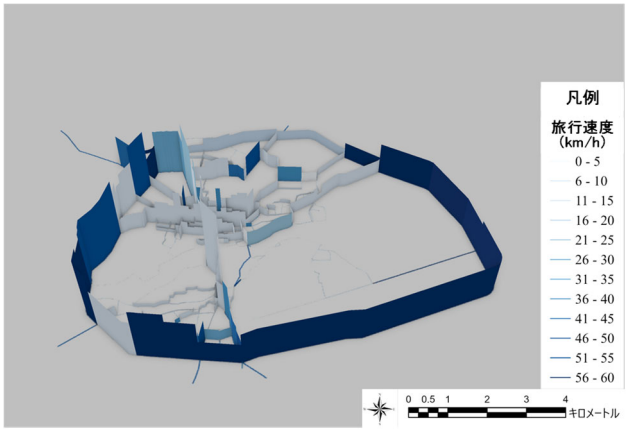


図-14　交通量の配分結果（シナリオ C）

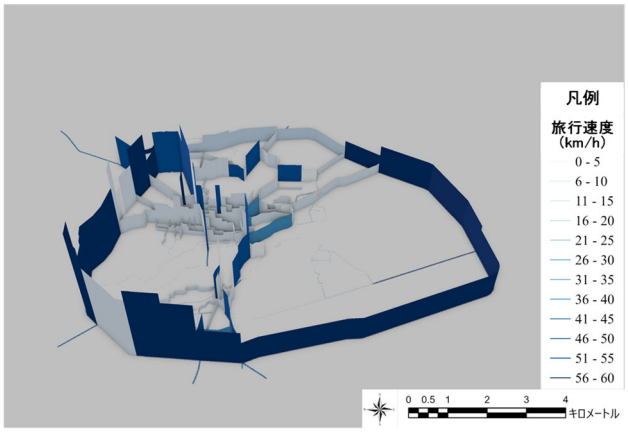


図-15　交通量の配分結果（シナリオ D）

5.3　費用便益分析

設定した適応策シナリオの経済的な効率性を把握するために，費用便益分析を実施し，費用便益比を算出した．具体的には，適応策の実施有無時における被害額を算出し，その差分を被害軽減効果（便益）として計上し，適応策の実施にかかる費用で割ることで，費用便益比を算出した．道路嵩上げ政策の導入効果を推計するために，道路嵩上げの導入に伴う旅行時間の短縮による便益を国土交通省が公開している費用便益分析マニュアル[7]で公開されている走行時間短縮便益を用いて推計した．

なお，道路嵩上げ導入後の 20 年間の便益を計算し，社会的割引率を 4%として算定を行った．その結果，全てのシナリオで費用便益比が 1 を超えており，道路嵩上げを実施することが経済的に見合うものであるということを示した．特に，交通分野における適応策の導入の優先度が高い区間のみを嵩上げした際には，経済的な効率が良いことを示した（シナリオ C）．

表-7　費用便益分析の算定結果

シナリオ	道路嵩上げの実施費用（Mil-THB）	被害軽減効果（Mil-THB）	費用便益比
A1（道路嵩上げ：中）	508.1	959.6	1.89
A2（道路嵩上げ：高）	708.3	1555.6	2.20
A3（道路嵩上げ：中＋高）	1216.4	1971.7	1.62

6.　おわりに

タイ・ウボンラチャタニ市を対象に，洪水発生時の住民のアクティビティの変化をアンケート調査から分析し，アクティビティに基づく交通需要の推計モデルを構築した上で，洪水発生時における交通分野の適応策として道路嵩上げを取り上げ，評価を行った．

洪水発生時のアクティビティに関するアンケート調査の結果から，洪水発生時には，アクティビティが就業者は，洪水発生時には平常時のアクティビティパターンと比較して，就業時の休憩中および帰宅途中の買い物等を行っている住民が増加した．これは，非就業者が日常的に行っている買い物を就業者が帰宅途中に代わりに行っていることが挙げられる．これらのアンケート調査結果に基づいて，アクティビティに基づく交通需要の推計モデル構築した．また，交通分野における適応策を整理した上で，道路嵩上げを選定し，アクセシビリティ指標に基づき交通分野における適応策の優先順位付けを行い，シナリオ設定を行った．各シナリオの導入効果をアクティビティパターン，配分交通量に基づいて評価した．結果として，道路嵩上げを実施することで，都市のモビリティを確保することができ，洪水発生時に変化したアクティビティパターンが定常時のパターンへと変化した．また，各シナリオの配分交通量の計算結果から，優先度の高い道路嵩上げを実施することで，約 5,000 台が迂回することなく移動することができることを示した．そして，道路嵩上げを実施する場合の経済的な妥当性を示すために，費用便益分析を実施し，道路嵩上げを実施した場合の費用便益比を推計し，費用便益比は 1.00 を超え，経済的に見合うものであることを示した．特に，優先順位の高い道路区間を嵩上げすることで，経済的な効率が良く，大きな効果を得ることができることを明らかにした．

REFERENCES

1)　Hijioka, Y., E. Lin, J.J. Pereira, R.T. Corlett, X. Cui, G.E.

Insarov, R.D. Lasco, E. Lindgren, and A. Surjan, 2014: Asia. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1327-1370, 2014.

2) Kimuli, B. J., Di, B., Zhang, R., Wu, S., Li, J. and Yin, W.; A Multisource Trend Analysis of Floods in Asia-Pacific 1990-2018: Implications for Climate Change in Sustainable Development Goals, International Journal of Disaster Risk Reduction, 59, 102237, 2021.
3) 玉田芳史，星川圭介，船津鶴代：タイ 2011 年大洪水 - その記録と教訓（情勢分析レポート），アジア経済研究所，2013.
4) 吉川勝秀：都市化が急激に進む低平地緩流河川地域における治水に関する都市計画的考察，都市計画論文集，第 42 号，pp.62-71，2007.
5) 田平由希子，川崎昭如：東南アジアの洪水常襲地帯における住民の災害対応と支援の関係タイとミャンマーの比較分析から，水文・水資源学会会誌，Vol.30，No.1，pp.18-31，2017.
6) 日本学術会議土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会：低平地等の水災害激甚化に対応した適応策推進上の重要課題，32pp，2020.
7) IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
8) Regmi, B. M. and Hanaoka, S.: Impacts of Climate Change on Transport and Adaptation in Asia, Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.7, 18pp., 2009.
9) 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省：IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約，URL: http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/syr_spm.pdf（最終アクセス：2022 年 12 月 19 日）.
10) Stamos, I., Mitsakis, E. and Grau, S. M. J: Roadmaps for Adaptation Measures of Transportation to Climate Change, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2532(1), 1-12, 2015.
11) Quinn, D. A., Ferranti, J. S. E., Hodgkinson, P. S., Jack, R. C. A., Beckford, J. and Dora, M. J.: Adaptation Becoming Business as Usual: A Framework for Climate-Change-Ready Transport Infrastructure, Infrastructures, 3(2):10, 1-12, 2018.
12) Vajjarapu, H., Verma, A., Allirani, H.: Evaluating Climate Change Adaptation Policies for Urban Transportation in India, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol.47, 101528, 2020.
13) Gulzar, S., Verma, A. and Vajjarapu, H.: Adaptation Policy Framework for Climate Change Impacts on Transportation Sector in Developing Countries, Transportation in Developing Economies, 5(3), 1-19 ,2019.
14) Pregnolato, M., Ford, A., Glenis, F., Wilkinson, S., Dawson, R.: Impact of Climate Change on Disruption to Urban Transport Networks from Pluvial Flooding, Journal of Infrastructure Systems, Vol.23, No.4, 1-13, 2017.
15) Pregnolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. and, Dawson, R.: The Impacts of Flooding on Road Transport: A Depth-Disruption Function, Transportation Research Part D, Vol. 55, 67-81, 2017.
16) 山下優輔，中村晋一郎，杉本賢二，林良嗣：2011 年タイ洪水における道路交通利便性の推計と対策評価手法の検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.73, No.4，I_301-I_306，2017.
17) Chang, H., Lafrenz, M., Jung, W, Miguel, F., Platman, D. and Pederson, C.: Potential Impacts of Climate Change on Flood-Induced Travel Disruptions: A Case Study of Portland Oregon, USA, Annals of the American Association of Geographers, 100 (4), 938-952, 2010.
18) 神田佑亮，富永凌太郎，赤木大介，重光裕介，藤原章正：災害時の交通マネジメントの経済被害抑制効果に関する―考察―平成 30 年 7 月豪雨の広島～呉間の交通を対象として―，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.78，No. 6，II_400-II_408，2022.
19) Pyatkova, K., Chen, S. A., Butler, D., Vojinović, Z. and Djordjević, S.: Assessing the Knock-on Effects of Flooding on Road Transportation, Journal of Environmental Management, 244, 48-60, 2019.
20) Yu, H., Changjie, C., Zhong-Ren, P. and Pllab, M.: Evaluating Impacts of Coastal Flooding on the Transportation System Using an Activity-Based Travel Demand Model: a Case Study in Miami-Dade Country, FL, Transportation, 49, 163-184, 2022.
21) Cools, M., and Creemers, L.: The Dual Role of Weather Forecasts on Changes in Activity-travel Behavior, Journal of Transport Geography, Vol. 28, pp. 167-175, 2013.
22) Saddi, I., Mustafa, A., Teller, J., and Cools, M.: Investigating the Impact of River Floods on Travel Demand based on an Agent-based Modeling Approach: The Case of Liége, Belgium, Transport Policy, 67, pp.1-17, 2017.
23) Tsumita, N., Sittha, J. and Fukuda, A.: Evaluation of Adaptation Measures to Urban Flooding in Transport Sector: The Case Study of Ubon Ratchathani City, Thailand, Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.14, 230-245, 2022.
24) 積田典泰，Rizky Wahyulinata，Sideney Schreiner，Sittha Jaensirisak，福田敦：Activity-Based Model を用いた洪水発生時の交通需要の推計手法の検討－タイ・ウボンラチャタニ市を対象として－，第 64 回土木計画学研究会講演集，2021.
25) Ben-Akiva, E. M. and Bowman, L. J.: Activity Based Travel Demand Model Systems, Equilibrium, and Advanced Transportation Modelling, pp27-46, 1998.
26) Yagi, S., and Mohammadian, K. A.: An Activity-Based Microsimulation Model of Travel Demand in the Jakarta Metropolitan Area, Journal of Choice Modeling, 3(1), pp.32-57, 2010.
27) 藤井聡，大塚祐一郎，北村隆一，門間俊幸：時看的空間的制約を考慮した生活行動軌跡を再現するため

の行動シミュレーションの構築，土木計画学研究・論文集，No.14，pp.643-652，1997.
28) Arentze, T. A. and H. J. Timmermans, A Learning-based Transportation Oriented Simulations System, Transportation Research Part B: Methodological, 38(7), 613-633, 2004.
29) Scherr, W., Joshi, C., Manser, P., Frischknecht, N. and Metrailler, D.: Mobi.plans: A Microscopic, Activity-Based Travel Demand Model of Switzerland, 19th Swiss Transport Research Conference, 1-22, 2019.
30) Ye Xin, Konduri K. Charan, Pndyala M. Ram, Sana Bhargava, Waddell Paul: Methodology to March Distribution of Both Household and Person Attributes in Generation of Synthetic Populations, Transportation Research Board 88th Annual Meeting 24pp., 2009.
31) Tsumita, N., Jaensirisak, S., Kikuchi, H., and Fukuda, A.: Analysis of Travel Behaviors during Floods in Ubon Ratchathani City, Thailand, *IOP Conference Series Earth and Enviro*nmental Science, 832(1), 012034, 2021.
32) Bhohka, S., Sangtian, N. and Kuntiyawichai, K.: Future Paradigm and Approaches for Sustainable Planning, Design and Management of Bridge in Flood Plain, A Case Study: Bridge in Ubon Ratchathani, Thailand, Proceeding the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASC-7), 6pp, 2006.
33) The Office of Transport and Traffic Policy and Planning. The study of the master plan development of the public transportation system in cities, regions of the country, 2015, 37pp. (in Thai)
34) JICA 地球環境部　気候変動対策室：気候変動対策支援ツール／適応策，JICA，https://www.jica.go.jp/activities/issues/climate/ku57pq00001o9h2v-att/climate_fit_J.pdf.
35) 環境省：気候変動適応策計画，http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf.
36) European Environment Agency: Adaptation of Transport to Climate Change in Europe Challenges and Options across Transport Modes and Stakeholders, EEA Report, 2014.
37) Asian Development Bank: Climate Proofing ADB Investment in the Transport Sector Initial Experience, 120pp. 2014.
38) Sohn, J.: Evaluating the Significance of Highway Network Links under the Flood Damage: An Accessibility Approach, Transport Research Part A, 40, pp.491-506, 2006.
39) 原田剛志，倉内文孝，高木朗義：リダンダンシーを考慮したアクセシビリティに基づく道路ネットワークの接続脆弱性評価，土木学会論文集 D3：（土木計画学），第 70 巻 1 号，pp.76-87，2014.
40) 大澤脩司，中山晶一朗，藤生慎，高山純一，溝上章志：アクセシビリティ指標を用いた自然災害時の道路網の復旧順位設定方法に関する研究，土木学会論文集 D3：（土木計画学），Vol.73，No.5（土木計画学研究論文集第 34 巻），I_281-I_289，2017.
41) Taylor, A. P. M., Sekhar, V. C. S. and E'Este, E. M.: Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks, Networks and Spatial Economics, 6, 267-291, 2006.

(Received ????, ????)
(Accepted ????, ????