

東南アジア諸国での都市洪水に対する

適応策の評価に関する研究

—主に洪水発生時のアクティビティの変化に着目して—

令和5年1月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程

交通システム工学専攻

積 田 典 泰

博 士 論 文

東南アジア諸国での都市洪水に対する適応策の評価に関する研究
ー主に洪水発生時のアクティビティの変化に着目してー

令和5年1月

積 田 典 泰

主査：福田 敦 教授

副査：小早川 悟 教授

副査：大沢 昌玄 教授

副査：武藤 慎一 教授

論文要旨

近年、地球温暖化の進行による異常気象の影響によって、世界各地で洪水が頻発し、甚大な被害が発生している。特に、東南アジア諸国の都市は、低平地に位置しているため、一度洪水が発生すると長期に亘って影響が継続する。そのため、直接的な被害だけでなく、都市のモビリティが著しく制限され、人々のアクティビティが大きく変化することによる都市生活への影響も大きいと考えられる。このような状況に対して、既存の治水対策では完全にその影響を防ぐことは難しいため、洪水の発生を前提とした影響の軽減に向けた適応策について検討する必要がある。しかし、このような都市のモビリティの確保を含めた適応策の評価を行うためには、人々のアクティビティの変化を的確に把握し、交通システムを構築する際にそれらを考慮する必要があるが、そのような研究は殆ど行われていない。

以上のような課題に対して答えを得るためには、長期に亘る洪水の発生が、どの様に人々のアクティビティを変化させているのかを把握した上で、適応策の実施によってどの程度その影響を軽減できるかを推計し、交通計画に反映する必要がある。

そこで、本論文では、洪水の発生によって変化する人々のアクティビティを詳細に把握した上で、それらを反映した交通需要の推計方法を確立し、適応策の導入効果を推計する手法を提案した。具体的には、人々のアクティビティの変化を明示的に捉えることができるアクティビティベースモデルを用いることで、洪水の発生によるアクティビティの変化を的確に把握し、適応策の評価が可能であると考え、この方法に基づいて適応策を評価する手法を提案した。さらに、構築した手法を用いて設定した複数の適応策シナリオの導入効果を推計し、適応策の実施によって、人々のアクティビティがどの程度定常時に近づけられているのかを明らかにした。最終的には、長期に亘る洪水の発生に適応することを前提とした交通計画の枠組みを示した。

本論文は8章から構成されており、各章の内容は以下のとおりである。

「第1章 序論」では、本論文の背景と目的を述べた。

「第2章 既存文献の整理と本論文の位置づけ」では、国内外の既存文献より、洪水の発生による影響の軽減に向けた適応策の導入効果と評価手法、アクティビティと移転行動の分析および洪水発生時の交通需要の推計手法に関する文献を中心に整理した。その結果、洪水発生時における治水対策では防げない広範囲で冠水が発生した場合の対応を検討した研究は少ないことを示した。その中でも、洪水の発生による人々のアクティビティや移転行動との関係性についてはこれまでに十分に分析されていないことを確認し、人々のアクティビティおよび移転行動を明示的に表現し、交通需要を推計するためには、アクティビティベースモデルの適用が必要であることを示した。

「第3章 洪水の発生がアクティビティと移転行動に与える影響の分析」では、洪水の発生によって、アクティビティがどの様に変化するのかについて把握するために、東南アジア諸国の洪水状況を俯瞰した上で、代表的な都市として、タイ・ウボンラチャタニ市を選定し、アクティビティダイアリー調査を実施した。結果として、洪水発生時に就学者および非就業者は外出のとりやめや自宅に滞在するパターン数が増加する一方で就業者は休憩中に買い物をするパターン数が増加することを明らかにした。さらに、洪水の発生が移転行動の判断に与える影響を明らかにするために、

アンケート調査を実施し、移転行動の実施有無に関するモデルを構築した。結果として、洪水発生時の最大浸水深が移転行動の判断に大きく寄与していることを示した。

「第4章 洪水発生時におけるアクティビティの変化を明示的に取り入れた交通需要の推計手法の確立」では、洪水の発生に対する適応策の評価するために、既存のアクティビティベースモデルに基づいて、洪水発生時の交通需要を推計する手法を確立した。具体的には、洪水の発生による影響を考慮したアクティビティパターンの生成、道路区間の冠水による速度低下や寸断の影響の内生化、洪水の影響を回避するための移転行動モデルの適用を行った。このモデルを用いた定常時の交通需要の推計結果から生成されたアクティビティパターン数の割合とアンケート調査の結果を比較した。モデルから生成されたアクティビティパターン数の割合は、概ね定常時のアンケート調査結果と同等であり、精度の高い交通需要の推計モデルが構築できた。また、洪水発生時のアクティビティを考慮しない四段階推定法とアクティビティベースモデルによる交通需要の推計結果から得られたOD間交通量を比較した。その結果、アクティビティベースモデルを用いた場合には、洪水の発生による目的地の変更を踏まえた交通需要を推計することができた。これらの結果から、洪水発生による交通需要の変化をアクティビティベースモデルに基づいて推計する手法を確立し、その手法が有効であることを示した。

「第5章 洪水の発生に対する適応策の整理とシナリオ設定」では、洪水の発生に対する順応策と撤退策を整理した上で、道路嵩上げとピロティ建築（高床式住居）および移転促進政策を選定し、適応策シナリオとして定義した。道路嵩上げの実施を検討する場合には、洪水発生時に冠水することで、寸断あるいは速度低下する104区間を対象に優先付けした。本論文では、アクセシビリティ指標を用いて影響を受ける区間を定常時と同様に利用できるように整備した場合の改善効果が、5%以上の区間を優先度中、10%以上の区間を優先度高として設定した。なお、ピロティ建築は選定された道路区間の沿道で実施することと仮定した。その結果、8区間で優先度中、7区間で優先度高と評価した。また、移転促進政策は、浸水深が高いゾーンを対象に、第3章で構築した移転行動モデルを適用し、移転する世帯を決定した。これらに基づき、9シナリオおよび定常時、洪水発生時、東側バイパスの整備なし、浸水深が低下した場合の13のシナリオを設定することができた。

「第6章 洪水発生時における影響の軽減に向けた適応策の導入効果の推計方法の提案」では、設定した適応策がどの程度定常時に近づけられているかを把握するために、アクティビティ、モビリティおよび経済的な観点から評価した。具体的には、アクティビティパターン数、アクセス可能な施設の訪問回数、ゾーン間平均旅行時間、トリップ毎の旅行時間に基づいて評価した。また、適応策の実施が経済的に見合うか判断するために、費用便益比を算出した。評価の判断基準は、適応策シナリオ別に推計した交通需要の推計結果と定常時の結果を比較することで適応策の導入効果を把握した。結果として、道路嵩上げ政策と移転促進政策を組み合わせることでアクティビティパターン数の割合が5%程度改善することを示した。また、アクセスできる施設の訪問回数については、移転促進政策を含む場合には3.5%程度大型商業施設でのアクティビティ数が増加するが、道路嵩上げ政策のみ実施した場合には、0.6%増加することを示した。一方で、ゾーン間平均旅行時間については、単に移転促進政策の導入のみでは、対策を実施しない場合と比べて旅行時間に改善効果がないことを示した。それに対して、道路嵩上げ政策または組み合わせた場合には、それぞれ30分および20分程度短縮できることを示した。最後に、トリップ毎の旅行時間のうち就業

を目的としたトリップを比較すると、対策実施なしまたは移転促進政策のみ導入した場合には、定常時と同様に 20~25%程度のトリップが 60 分以上旅行時間を要しているが、道路嵩上げ政策または道路嵩上げ政策と移転促進政策を組み合わせた場合には、旅行時間が全てのトリップで 50 分以内まで低減することを明らかにした。また、いずれの適応策を導入した場合にも費用便益比は 1 を超え、有効であることを確認した。これらの結果から、単に移転促進政策を導入するだけでなく、道路嵩上げを組み合わせて適応策を導入することでアクティビティおよびモビリティへの影響を大きく改善でき、経済的に見合うものであることを示した。

「第 7 章 洪水の発生を前提とした交通計画の在り方の検討」では、第 6 章までの結果を受けてこれまでの交通計画の課題を示した上で、本論文で提案する洪水の発生を前提とした交通計画の在り方を検討した。はじめに、洪水の発生に関するハザードマップ等は示されているが、この影響については現在の交通計画の中では考慮されていないことを示した。これに対して本論文では、交通計画の中で洪水の発生を含めた調査の実施および現況分析を行い、詳細にその影響を把握した上で、それらの影響を考慮して交通需要を推計するために、提案したアクティビティベースモデルを適用し、適応策を評価する方法を提案した。

「第 8 章 結論」では、本論文の成果と今後の展望について整理し、本論文の結論とした。本論文では、東南アジアの都市を中心に頻発する洪水の発生に対する影響の軽減に向けた適応策の中でも特に順応策と撤退策に着目し、長期に亘る洪水の発生が人々のアクティビティと移転行動に与える影響を明らかにした上で、これらを含めた洪水発生時の交通需要の推計手法を確立した。また、構築した手法を用いて順応と撤退からなる策の実施効果を評価する手法を提案し、その導入効果を明らかにした上で、洪水の発生を前提とした交通計画の在り方を検討し、その必要性を示した。今後、東南アジア諸国の都市で、本論文で提案した方法を用いることで、洪水の発生を前提とした交通計画を実施することが可能であり、本研究における提案が大変有用であることを示した。

目次

第1章	序論	1
1.1	本論文の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	6
	参考文献	9
第2章	既存文献の整理と本論文の位置づけ	11
2.1	洪水の発生に対する交通分野を中心とした適応策の整理とその評価手法の構築および適用に関する研究の整理	11
2.1.1	洪水の発生に対する交通分野を中心とした適応策に関する研究の整理	11
2.1.2	洪水発生時の交通分野の適応策の評価手法の開発とその適用に関する研究の整理	12
2.2	洪水の発生がアクティビティへ与える影響の分析に関する研究の整理	15
2.3	洪水による影響回避のための移転行動の分析に関する研究の整理	16
2.4	洪水発生時における交通需要の推計手法の開発とその適用に関する研究の整理	17
2.4.1	洪水発生時における四段階推定法を用いた交通需要の推計に関する研究の整理	17
2.4.2	洪水発生時におけるアクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計に関する研究の整理	17
2.5	既存研究の課題と本論文の位置づけ	18
	参考文献	20
第3章	洪水の発生がアクティビティと移転行動に与える影響の分析	23
3.1.1	対象都市の概要	25
3.1.2	対象都市における洪水の発生およびその被害状況	27
3.2	洪水の発生がアクティビティに与える影響の把握に向けた調査の概要と分析結果	29
3.2.1	洪水発生時のアクティビティに与える影響の分析に向けたアンケート調査の概要	29
3.2.2	洪水の発生がアクティビティに与える影響の分析結果	31
3.2.3	洪水の発生に伴う交通行動の変化の分析結果	44
3.3	洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けた調査の概要とその結果	47
3.3.1	洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けたアンケート調査の概要	47
3.3.2	洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けたアンケート調査の結果	48
3.4	第3章まとめ	51
	参考文献	52
第4章	洪水発生時におけるアクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計手法の確立	54
4.1	アクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計モデルの概要	54
4.1.1	アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計モデルの概要	54
4.1.2	本研究で対象とするアクティビティベースモデルの概要	58
4.2	洪水発生時における交通需要の推計に向けたモデルの確立	65
4.2.1	交通ネットワーク上での洪水の発生に伴う浸水と寸断状況の内生化	65

4.2.2	洪水の発生を考慮したアクティビティパターンの生成.....	69
4.2.3	洪水の発生の影響回避のための移転行動のモデル化.....	70
4.3	対象都市におけるモデルの適用に向けたデータ整理.....	71
4.3.1	合成人口に必要なデータの整理と生成方法およびその結果.....	71
4.3.2	アクティビティベースモデルの構築に必要なデータの整理.....	72
4.3.3	モデルの検証に必要なデータの整理.....	78
4.4	交通需要の推計結果と精度の検証.....	79
4.4.1	モデルの精度の検証と適用可能性.....	79
4.4.2	定常時と洪水発生時のアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果の比較.....	83
4.4.3	洪水発生時の四段階推定法とアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果の比較.....	86
4.5	第4章まとめ.....	88
	参考文献.....	89
第5章	洪水の発生に対する適応策の整理とシナリオの設定.....	91
5.1	洪水の発生に対する適応策の整理と選定.....	91
5.2	適応策シナリオの設定.....	96
5.3	適応策の実施に向けた優先付けの方法の検討と結果.....	96
5.3.1	道路嵩上げ政策を導入する場合の優先順位付け方法の提案とその適用.....	97
5.3.2	浸水リスクを考慮した移転政策を導入する場合の移転世帯の設定方法.....	99
5.4	第5章のまとめ.....	100
	参考文献.....	101
第6章	洪水発生時における影響の軽減に向けた適応策の導入効果の推計方法の提案.....	103
6.1	適応策の導入効果の推計方法の設定.....	103
6.1.1	アクティビティの評価項目.....	103
6.1.2	モビリティの評価項目.....	103
6.1.3	経済的な観点からみた評価項目.....	104
6.2	分析指標に基づく各シナリオの導入効果の推計結果.....	105
6.2.1	アクティビティパターン数の比較.....	105
6.2.2	アクセスできる施設の訪問回数の比較.....	106
6.2.3	ゾーン間平均旅行時間の比較.....	116
6.2.4	旅行時間別のトリップ数の比較.....	118
6.2.5	費用便益分析.....	121
6.3	第6章のまとめ.....	121
	参考文献.....	123
第7章	洪水の発生を前提とした交通計画の在り方の検討.....	124
7.1	現在の交通計画と洪水被害の推定方法.....	124
7.2	洪水の発生を前提とした交通計画の在り方.....	125

7.3 第7章のまとめ.....	126
参考文献.....	127
第8章 結論.....	128
8.1 本論文の成果.....	128
8.2 本論文における主張する点.....	128
8.3 今後の課題.....	129

図表一覧

表 1-1	都市洪水の発生に対する適応策の整理	1
表 1-2	我が国において導入されている流域治水の整理	3
図 1-1	2011 年のタイ王国における洪水発生時の浸水エリア	4
図 1-2	本論文の構成	8
図 2-1	四段階推定法に基づく交通分野の適応策の評価方法の例	13
表 3-1	東南アジア諸国の洪水被害の整理	23
図 3-1	東南アジア諸国における都市の人口と人口密度の比較	24
図 3-2	対象都市の位置と土地利用状況	25
表 3-2	2015 年の交通計画で検討された政策	26
図 3-3	対象都市における交通機関分担割合	26
図 3-4	対象都市の道路ネットワークと浸水域	27
図 3-5	対象都市で実施されている防護策	28
図 3-6	洪水発生時（2019 年）における道路交通の様子	29
図 3-7	アクティビティダイアリー調査の回答例	30
表 3-3	アクティビティダイアリー調査内容の概要	31
表 3-4	回答者の社会経済属性の集計結果	32
表 3-5	定常時と洪水発生時のアクティビティパターンの比較	33
図 3-8	定常時における単身の世帯の時空間パス例 1	34
図 3-9	洪水発生時における単身の世帯の時空間パス例 1	35
図 3-10	定常時における単身の世帯の時空間パス例 2	35
図 3-11	洪水発生時における単身の世帯の時空間パス例 2	36
図 3-12	定常時における夫婦世帯の時空間パス例 1	36
図 3-13	洪水発生時における夫婦の世帯の時空間パス例 1	37
図 3-14	定常時における夫婦世帯の時空間パス例 2	37
図 3-15	洪水発生時における夫婦の世帯の時空間パス例 2	38
図 3-16	定常時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 1	39
図 3-17	洪水発生時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 1	39
図 3-18	定常時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 2	40
図 3-19	洪水発生時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 2	40
図 3-20	定常時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 1	41
図 3-21	洪水発生時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 1	41
図 3-22	定常時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 2	42
図 3-23	洪水発生時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 2	42
図 3-24	定常時における友人と同居世帯の時空間パス例 1	43
図 3-25	洪水発生時における友人と同居世帯の時空間パス例 1	43
図 3-26	定常時における友人と同居世帯の時空間パス例 2	44
図 3-27	洪水発生時における友人と同居世帯の時空間パス例 2	44

図 3-28	目的別の定常時と洪水発生時の交通機関分担割合の比較	45
図 3-29	旅行時間別のトリップ数の割合	46
図 3-30	定常時と洪水発生時の移動経路の比較 1	46
図 3-31	定常時と洪水発生時の移動経路の比較 2	47
表 3-6	洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けたアンケート調査の概要	48
表 3-7	移転の経験の有無とその理由	48
図 3-32	居住地選択の際に重視する項目	49
表 3-8	洪水の発生に関する情報伝達手段と最大浸水深および家財への被害状況	49
表 3-9	移転行動モデルの変数間のピアソンの相関係数の算出結果	50
表 3-10	ロジスティック回帰モデルを用いた移転行動モデルの推計結果	50
表 4-1	アクティビティベースモデルと四段階推定法を用いた交通需要推計手法の比較	55
図 4-1	離散選択モデルに基づくアクティビティベースモデル	56
図 4-2	ルールベースモデル型のアクティビティベースモデルの例	57
図 4-3	ハイブリット型のアクティビティベースモデルの例	58
図 4-4	アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推定の概要	59
表 4-2	IPU 法を用いた拡大係数の算出方法	61
図 4-5	アクティビティベースモデルを用いた交通需要の計算過程	64
図 4-6	経験した浸水深に基づく洪水発生時の浸水深の分布	66
図 4-7	定常時と洪水発生時の旅行速度の比較	67
図 4-8	定常時におけるプローブカーの走行軌跡	67
図 4-9	洪水発生時におけるプローブカーの走行軌跡	68
図 4-10	推定した浸水深と旅行速度の低下量に関する関数	69
図 4-11	アクティビティパターンの生成方法	70
表 4-3	IPU 法の計算に利用したデータ	71
図 4-12	センサデータと合成人口の生成に基づく年齢構成の比較	72
図 4-13	センサデータと合成人口の生成に基づく所得の比較	72
表 4-4	就学者のツアー頻度のパラメータ推定結果	73
表 4-5	就業者のツアー頻度のパラメータ推定結果	73
表 4-6	非就業者のツアー頻度のパラメータ推定結果	74
表 4-7	就学者の交通機関選択のパラメータ推定結果	74
表 4-8	自動車保有無の交通機関選択のパラメータ推定結果	74
表 4-9	非就業者の交通機関選択のパラメータ推定結果	75
表 4-10	アクティビティタイプ毎の活動開始時間の分布	76
表 4-11	アクティビティタイプ毎の活動開始時間の分布	77
図 4-14	対象都市で作成した POI データと浸水深	78
図 4-15	対象都市における交通量調査の観測地点	79
表 4-12	アンケート調査とモデルから得られた定常時のアクティビティパターン数の比較	80
図 4-16	配分交通量と観測交通量の比較 1 (朝ピーク 1 時間)	81

図 4-17	配分交通量と観測交通量の比較 2 (朝ピーク 1 時間)	81
図 4-18	配分交通量と観測交通量の比較 1 (夕ピーク 1 時間)	82
図 4-19	観測交通量と配分交通量の比較 2 (夕ピーク 1 時間)	82
表 4-13	アクティビティベースモデルとパーソントリップ調査の交通機関選択割合の比較	83
表 4-14	定常時と洪水発生時のアクティビティパターンの比較	84
図 4-20	定常時におけるアクティビティベースモデルを用いた交通量配分の結果	85
図 4-21	洪水発生時におけるアクティビティベースモデルを用いた交通量配分の結果	85
図 4-22	アクティビティベースモデルを用いた定常時と洪水発生時の配分交通量の増減	86
図 4-23	洪水発生時の四段階推定法を用いた希望線図	87
図 4-24	洪水発生時のアクティビティベースモデルを用いた希望線図	87
表 5-1	洪水の発生に対する順応策および撤退策の整理	91
図 5-1	道路嵩上げ政策の導入例 1 (タイ王国・国道 9 号線)	92
図 5-2	道路嵩上げ政策の導入例 2 (カンボジア王国・国道 1 号線)	92
図 5-3	道路嵩上げ政策の導入例 3 (日本・国道 175 号線)	92
図 5-4	道路嵩上げ政策の導入例 4 (タイ・ウボンラチャタニ)	93
図 5-5	洪水の発生に対応する家屋の分類	93
図 5-6	本論文で実施する道路嵩上げ政策の導入時のイメージ 1	94
図 5-7	本論文で実施する道路嵩上げ政策の導入時のイメージ 2	94
図 5-8	タイ・コンケン市における洪水を考慮した土地利用計画の策定例	95
図 5-9	フィリピン・カガヤンデオロ市で実施された移転政策の移転先の住居	95
表 5-2	設定した適応策シナリオ一覧表	96
図 5-10	道路嵩上げを実施する場合の優先順位付けの結果	99
図 5-11	浸水リスクを考慮した移転促進政策の導入ゾーンの設定	100
表 6-1	シナリオ別のアクティビティパターン数の比較 1	105
表 6-2	シナリオ別のアクティビティパターン数の比較 2	105
表 6-3	アクセスできる商業施設の訪問回数 1	106
表 6-4	アクセスできる商業施設の訪問回数 2	107
表 6-5	アクセスできる就業地の訪問回数 1	108
表 6-6	アクセスできる就業地の訪問回数 2	109
表 6-7	アクセスできる就学地の訪問回数 1	110
表 6-8	アクセスできる就業地の訪問回数 2	111
表 6-9	アクセスできる私事 (病院) の訪問回数 1	112
表 6-10	アクセスできる私事 (病院) の訪問回数 2	113
表 6-11	アクセスできるレジャー施設の訪問回数 1	114
表 6-12	アクセスできるレジャー施設の訪問回数 2	115
表 6-13	シナリオ別ゾーン間平均旅行時間 1	116
表 6-14	シナリオ別ゾーン間平均旅行時間 2	117
図 6-1	就業を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較	118

図 6-2	就学を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較.....	119
図 6-3	買い物を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較	119
図 6-4	私事を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較.....	120
図 6-5	その他を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較	120
表 6-15	各シナリオの費用便益比の算出結果	121
図 7-1	現在の交通計画と洪水の発生による被害状況の把握との関係性.....	124
図 7-2	洪水の発生を前提とした交通計画の枠組み	126

第1章 序論

1.1 本論文の背景と目的

近年、地球温暖化の進行による異常気象の深刻化によって、様々な自然災害が発生している。この中でも、特に、洪水の発生が頻発化しており、世界各地で甚大な被害を及ぼしている。これに対して、これまで主に、地球温暖化の進行を抑制して根本的に解決するために、温室効果ガスの排出削減に向けた緩和策の導入を中心とした議論が進められてきた¹⁾。

しかし、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を短期間で改善することは不可能である。そのため、以前にも増して異常気象は深刻化し、それに伴って、洪水がより激甚化し、その被害が拡大することが想定されている。したがって、緩和策と同時に適応策についても検討することが急務となっている^{2),3)}。

これまで、地球温暖化問題に対する適応策については、1992年に採択された国連気候変動枠組み条約に基づいて、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）が1995年に開催され、それ以降国内外問わず適応策の議論が進められてきた。特に、2007年にIPCC第4次評価報告書WGIIが公開されたことで、気候変動への適応の重要性が広く認知され始めた⁴⁾。これ以降、世界各地で適応策や適応計画の策定に向けた検討が進められてきた。IPCC第4次評価報告書によると、適応策は①防護策、②順応策、③撤退策の3つに分類することができる。本論文では、この分類に基づいて、表1-1に示すように都市洪水の発生に対する適応策を整理した。

表 1-1 都市洪水の発生に対する適応策の整理

分類	概要	具体的な適応策
①防護策	<ul style="list-style-type: none">地球温暖化による異常気象によって生ずる都市洪水から被害を主に、構造物で防ぐ方策想定よりも小さな洪水については、全ての人と資産を守ることが可能	<p>(既存の治水対策)</p> <ul style="list-style-type: none">防護壁の設置ダム建設
②順応策	<ul style="list-style-type: none">都市洪水の発生が起こったとしても被害を軽減するように生活様式を工夫する方策想定を超えるような洪水が発生した場合に対応しやすいという長所を持つが、日常生活はある程度の制限を受ける	<p>(交通分野の適応策はここに位置づけられる)</p> <ul style="list-style-type: none">道路嵩上げ高架道路の建設ピロティ建築
③撤退策	<ul style="list-style-type: none">都市洪水の発生に対して脆弱な地域から退避させ、被害が生じる範囲を減ずる方策住民がいない地域や少ない地域では、防護することなしに、撤退して自然に合わせて影響を受け入れる	<p>(土地利用分野の適応策はここに位置づけられる)</p> <ul style="list-style-type: none">浸水リスクを考慮した移転促進政策集団移転や高台移転

はじめに、①防護策については、従来の治水対策がこの分類にあたり、都市洪水の発生に対する被害を生じないようにするダムや防水壁の設置などのハード面からみた政策が該当する。この政策

は、河川の氾濫が発生しないようにすることで、洪水の発生による影響を完全に避けるための方策である。

次に、②順応策については、洪水の発生によって、都市の生活に影響が生ずることを前提として被害を軽減するために生活様式を工夫する方策である。想定以上の洪水が発生し、防護策で対応することが難しい洪水が発生した際に影響を軽減するための方策であり、道路の嵩上げ、高架道路の建設およびピロティ建築等が含まれる。

最後に、③撤退策については、都市洪水の発生に対して、脆弱な浸水リスクの高いエリアから退避させることで、被害が生ずる範囲を減らす方策であり、集団移転や洪水のリスクを考慮した移転促進策が該当する。

このように世界的に適応策の重要性が認識されている中で、我が国においても、2000年代後半以降に各省庁で気候変動の影響に関する調査や適応策の議論が始められ、気候変動への賢い適応や社会資本整備審議会の提言等でその必要性が述べられてきた^{5,6)}。特に、2018年に気候変動適応法が策定され、地球温暖化対策として、根本的な問題の解決に向けた温室効果ガスの排出削減に対する緩和策の実施と同時に、災害の被害の回避・軽減に向けた適応策の両輪で進める必要が明確化された⁷⁾。この法律によって、適応策の導入の必要性が地球温暖化問題の1つの対策として位置づけられ、2021年には気候変動の影響への適応計画（政府適応計画）が閣議決定された⁸⁾。この計画では、21世紀末までの長期的な展望を意識しながら、今後10年間で行うべき適応策をまとめた上で、目指すべき社会の都市像を、気候変動の被害の最小化と迅速な回復ができる持続可能な社会の構築として設定され、そのための方向性が示されている。

一方で、前述の適応策に関して議論が盛んに行われる以前から我が国においても、古くから治水や土木技術の発展とともに大河川の氾濫によって生まれた平野部での水田開発や河川の特徴に応じた治水事業が進められてきた。また、大河川を水源とした大規模な灌漑施設の整備や新田開発が進められると同時に、河川による交通・運輸機能についても担うようになり、河川沿いに都市が発展してきた歴史がある。

その一方で、河川の増水による喫水や堤防の破堤等によって、洪水の発生による被害によって都市生活に非常に甚大な被害を被ってきた。この状況に対して、現在では地球温暖化の進行による短時間強雨等の増加に伴って、都市の洪水は激甚化しており、治水計画を過去の降雨実績に基づく計画から、気候変動による降雨量の増加等を考慮した計画への移行が進められている。

洪水の発生については、その発生原因によって、内水氾濫（短時間強雨等によって、雨水の排水能力が追いつかないために発生する洪水）と外水氾濫（河川の水位が上昇し、堤防を破壊する等して河川から水が流れ出すことによって発生する洪水）に分類することができる⁹⁾。特に、外水氾濫が発生した際には、河川の水が堤防を越えて多くの喫水が一度に河川に隣接する住宅地等に流れ込むことで、人的な被害が発生する可能性も非常に高く、これに対する対応が急務となっている。その中で、河川、下水道等の管理者が主体となって実施する従来の治水対策に加えて、集水域と河川区域だけでなく、氾濫域についても管理対象の流域として捉えた上で、その流域全体のあらゆる管理者が協働して管理する流域治水の概念が導入されている¹⁰⁾。

この概念に基づいて、2021年には、全国の一級水系を対象として流域治水プロジェクトが策定された（表 1-2）。これについては、①氾濫をできるだけ防ぎ・減らすための対策に加えて、②被害対

象を減少させるための対策および③被害の軽減，早期復旧・復興のための対策をハード／ソフト一体で多層的に進める方策として，流域治水の考え方が導入されており，全国の一級水系で整備が進められている。

この中では，従来の治水対策に加えて，都道府県が策定する都市計画区域マスタープランや市町村が策定する市町村マスタープランを検討していく際に，氾濫域単位でのあるべき都市の姿を検討した上で，浸水危険区域に住む住民の高台移転や浸水危険リスクを考慮した居住禁止区域等の設定や線引きを行うことが求められている。今後の流域治水プロジェクトの中では，洪水が発生した際の洪水浸水想定区域図やハザードマップに基づいて，水害リスクの高い区域を考慮した都市づくりを進めていく必要があるとされている。

表 1-2 我が国において導入されている流域治水の整理

分類	概要	具体的な対策
①氾濫をできるだけ減らすための対策	氾濫を防ぐ堤防等の治水施設や流域における貯留施設等の整備	・治水ダムの建設／再生 ・堤防の強化
②被害対象を減少させるための対策	氾濫水を制御し，氾濫範囲を限定するための水害リスクが低い区域への誘導	・土地利用規制や移転促進 ・二線堤の整備
③被害の軽減，早期普及・復興のための対策	氾濫の発生に際し，早期の復旧および復興のための施設整備	・排水能力の強化 ・水害リスク情報の提供

一方で，東南アジア諸国の多くの都市は低平地に位置しており，都市周辺を流れる河川の河床勾配（標高／河口からの距離）は我が国における河川と比較すると非常に緩く，無堤部を含む河川が多く存在する。そのため，外水氾濫（河川の氾濫）が発生した際には，我が国の洪水の被害とは異なり，インフラの崩壊や家屋の流出および倒壊は発生しないが，広範囲に影響が広がり，排水が進まないことで洪水の発生によって影響が及ぼされる状況が長期に継続し，住民は甚大な被害を受けている¹¹⁾。

例えば，2011年に発生したチャオプラヤ川大洪水は，これまでの観測史上最大の洪水が発生し，8月から12月の4ヵ月に亘って影響が生ずる状態が継続した（図 1-1）。タイ・内務省の発表によると，この洪水の発生によって影響を受けた全国の農地被害面積は，18,291km²と，関東平野とほぼ同じだけの面積が被害を受けたと記録されている¹²⁾。タイ国の河川は全般的に緩流河川であり，チャオプラヤ川の下流域は1/10,000～1/15,000と著しく緩やかであるため，流下能力が非常に乏しくなっている。

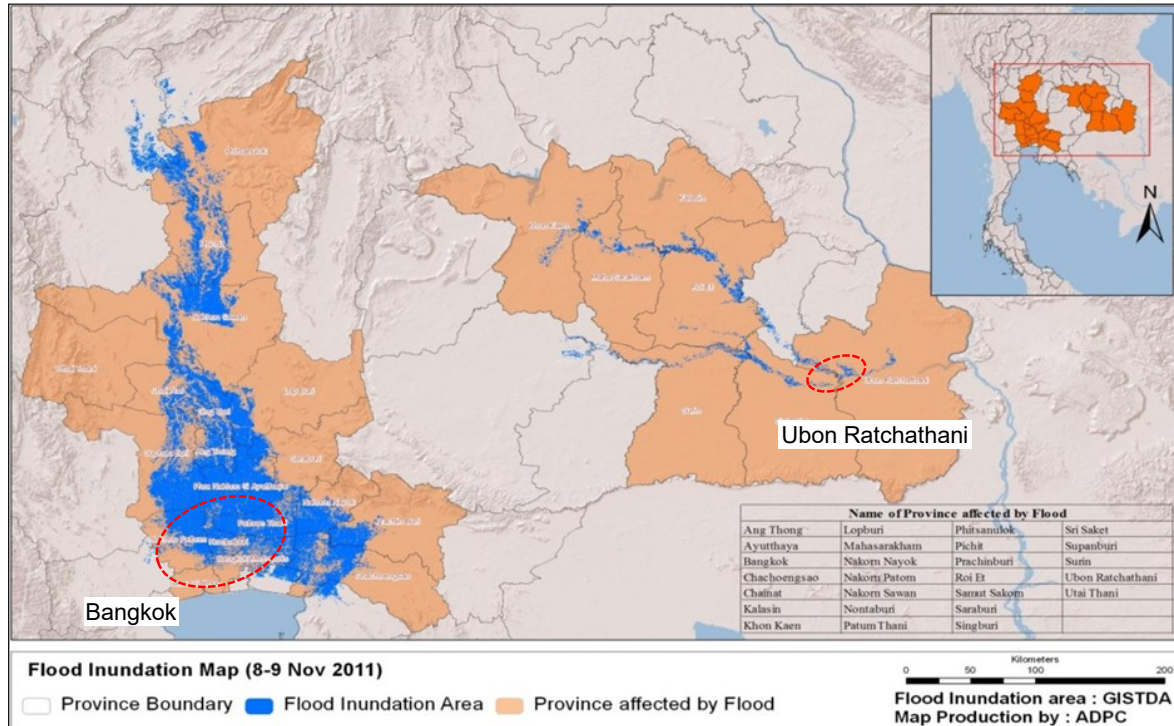


図 1-1 2011 年のタイ王国における洪水発生時の浸水エリア
 (引用: The WorldBank(2012), Original Source of Satellite Image is GISTDA)¹²⁾

このように、冠水するエリアが非常に広範囲に亘ることで、都市全体のモビリティが大幅に低下する。また、東南アジア諸国の都市では、長期に亘って都市生活に甚大な影響を及ぼすため、定常時と比較して、人々のアクティビティが大きく変化する。

この状況に対して、既存の治水対策に加えて、以前は、都市洪水の発生による影響を前提として、住民が高床式住居で生活を営むことや洪水が頻繁に発生しているエリアの土地開発の抑制および遊水池としての設定等によって対応していた。それによって、洪水の発生による被害を軽減することで、その状況を前提とした生活を営んでいた。

例えば、タイ・バンコクでは、土地利用計画の中で、開発を規制する地域を明確に位置づけられ、新たな開発が避けられてきた¹³⁾。また、古来より、住民自身が洪水の発生によって冠水するエリアを把握した上で、その影響が生ずることを前提とした生活を営んでいた。

しかし、急速な人口増加に伴って拡大した需要に対応するように、洪水の被害が大きなエリアでも都市化が進められた。そのため、本来は遊水池等として利用し、居住地等として開発をするべきではないとされているエリアについても開発された。それによって、洪水が発生した際の被害のポテンシャルが大幅に増大した¹⁴⁾。これも 1 つの誘因となって、従来の治水対策では都市洪水の被害を完全に防ぐことができず、都市生活へ深刻な影響が及ぶことは避けられない。

これに対して、タイ政府は、2015 年から 2050 年までの期間を対象として、適応策の導入に向けた方針として国家適応計画 (NAP) を策定した。しかし、この計画の中では、具体的な適応策の導入に関する議論は実施されておらず、本論文で対象とする洪水発生時における都市のモビリティの確保に向けた議論については、含まれていない¹⁵⁾。

前述の我が国における流域治水と都市洪水に対する適応策を比較してみると、流域治水の①氾濫をできるだけ減らすための対策と適応策の①防護策については、どちらも住民の都市生活において被害が生じないようにする方策である。これは、従来の治水対策が該当しており、どちらの概念においても重複しており、根本的な対応つまり治水対策として一致している。次に、流域治水の②被害対象を減少させるための対策および③被害の軽減、早期復旧・復興のための対策については、主に、適応策の③撤退策にあたる。どちらの方策についても長期にみて土地利用を変更することで、洪水の発生による影響を回避する方策である。具体的には、洪水の発生による被害を考慮した都市へと転換することを目的としている。

しかし、適応策の②順応策（洪水の発生を前提とした生活のための方策）については、流域治水の中では十分な議論は行われておらず、非常に限定的なものとなっている。つまり、洪水が発生した地域で継続して生活を営む住民の対応については、十分に検討されていない。特に、本論文で対象とする都市生活が長期に亘って制限される東南アジア諸国の都市では、適応策の導入、特に、順応策の導入によって、洪水の発生による影響を軽減することを検討することが重要となる。

また、流域治水においては、本論文で対象とする順応策と撤退策のうち撤退策については、議論の対象とされており、浸水リスクが高いエリアからの移転やそれらを都市計画上で考慮したまちづくりを進めていく必要であることが謳われている。将来的には、洪水リスクを考慮した都市を実現する必要があるが、住民の移転を促進するためには多くの障壁があるため、短期的に実現することは非常に難しい。

したがって、今後も、洪水の発生による影響が生ずるエリアでの生活を継続する住民は多く存在する。そのため、洪水の発生を前提とした都市生活を実現するためには、洪水の発生による人々のアクティビティ変化を十分に把握した上で、それらに対する影響を軽減するための順応策を検討し、都市のモビリティの確保をはじめとした定常時と同様の都市生活を営めるように対応を検討していくことがより一層重要となる。

今後、このような都市では、適応策（特に、順応策と撤退策）の実施によって、洪水が発生した際の影響を軽減し、その状況に適応する交通計画を策定し、洪水の発生に対応する交通システムを実現する必要があるが、そのためには、以下のような課題がある。

- ① 洪水が発生した際には、人々のアクティビティ（外出率、訪問先、出発時間、移動経路、移動手段、移動目的）が、定常時と比較して大きく変化する。そのため、既存の交通需要の推計手法である四段階推定法では、これらの変化を十分に表現して交通需要の推計時に考慮することができない。したがって、適切に道路嵩上げ等の順応策の導入効果を十分に分析することができないため、評価できない。
- ② 洪水の発生による影響回避のために、住民が居住地を洪水の被害が生じないエリアへ移転することが想定されるが、既存文献では、本論文で対象とするような長期にわたる洪水の発生に対する移転行動を表現するモデルに関しては、十分な分析が実施されていない。
そのため、洪水の発生が住民の居住地の選択にどのような影響を与えるのか把握されていない。したがって、洪水の発生による被害状況を考慮した移転促進政策等の撤退策の実施による

導入効果やその影響が適切に把握できない。

- ③ 現在の交通計画の中では、定常時のみを対象として議論が進められている。そのため、洪水が発生した際に、長期に亘って冠水が継続する状況下で、都市のモビリティを確保する適応策については議論されていない。また、そのような適応策を評価するための評価手法については確立されていない。

以上のような課題に対して答えを得るために、洪水の発生による人々のアクティビティの変化や世帯の移転行動の意思決定に与える影響を詳細に把握した上で、これらの変化を明示的に取り入れた交通需要の推計手法を開発する必要がある。また、その手法を用いて、適応策の導入効果を推計する方法を提案した上で、実際に適応策を評価し、洪水の発生に適応するための交通計画を検討する必要がある。

そこで、本論文では、洪水の発生による都市のモビリティへの影響を軽減するための適応策の導入に向けて、アクティビティを考慮した交通需要の推計手法を確立した上で、適応策の評価方法を提案することを目的とする。そして、提案する方法を組み込むことで、洪水の発生に適応する交通計画の在り方を検討する。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は、図 1-2 および以下の通りである。

まず、第 1 章では、本論文の背景と目的を述べる。

第 2 章では、国内外の既存文献を用いて、洪水の発生に対する交通分野を中心とした適応策の整理とその評価手法の構築および適用に関する研究、洪水の発生による人々のアクティビティへ与える影響の分析に関する研究、洪水による影響回避のための移転行動の分析に関する研究、洪水発生時の交通需要の推計手法に関する研究を整理し、既存文献における課題を示した。これを受けて、本論文の位置づけを示した。

第 3 章では、東南アジア諸国における洪水の発生による被害状況と各都市の人口規模や人口密度を俯瞰し、これらの都市の代表としてタイ・ウボンラチャタニ市を選定した。その後、対象都市としたタイ・ウボンラチャタニ市におけるこれまでの洪水の発生による被害の状況と適応策の実施状況について整理した。また、同都市における交通計画の策定状況と交通状況について示した。

そして、対象としたウボンラチャタニ市における洪水の発生によるアクティビティの変化と移転行動の意思決定に与える影響を把握するために、対象都市で実施したアンケート調査の概要とその結果を示した。この結果に基づいて、洪水の発生による人々のアクティビティの変化と移転行動の意思決定に与える影響を明らかにした。

第 4 章では、既存文献からアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計手法を整理し、本論文で用いたアクティビティベースモデルの特徴を示した。また、洪水発生時の交通需要を推計するためにモデルの改良および洪水の影響を表現する方法について述べた。

また、構築したモデルの交通需要の精度を検証するために、アクティビティベースモデルの推計結果と第 3 章で示したアンケート調査の結果およびウボンラチャタニ市を対象として、2015 年に

実施されたパーソントリップ調査の結果から得られた観測交通量および交通機関分担割合と比較した。この結果からモデルの精度を確認し、改良したアクティビティベースモデルが、対象都市としたウボンラチャタニ市に適用可能であることを示し、洪水発生時における交通需要の推計には、この手法の適用が有効であることを明らかにした。

第5章では、洪水の発生に対する適応策を整理した上で、評価する順応策および撤退策を選定し、適応策シナリオを設定した。本論文では、順応策として道路嵩上げおよびピロティ建築（高床式住居）と撤退策として浸水リスクを考慮した移転促進政策を設定した。

これらの適応策を導入するための優先順位付けの方法を提案し、この結果および組み合わせに基づいて9つのシナリオ、洪水発生時の対策なしのシナリオ、洪水発生時に浸水深が低下したシナリオ、洪水発生時にこれまでに対象都市で導入された道路嵩上げが実施されなかったシナリオおよび洪水なしシナリオ（定常時）の合計13のシナリオを設定した。

第6章では、洪水発生時に適応策を実施することで、定常時と比較してどの程度近づけられているかを把握するために、適応策の導入効果の推計方法を提案した。具体的には、モビリティおよびアクティビティの観点からみた複数の評価指標を設定し、シナリオ別に評価する方法を述べた。この方法を用いて、**第5章**で設定した適応策シナリオ毎にアクティビティベースモデルによる交通需要を推計した上で、評価した。さらに、適応策シナリオの導入が経済的に見合うものなのかを判断するために費用便益分析を適用して、各適応策を導入した場合の費用便益比を算出し、分析した。

第7章では、洪水の発生を前提とした交通計画の在り方を検討するために、現在の交通計画と洪水の発生による被害の把握の手法について示した上で、洪水の発生を前提とした交通計画の在り方について本論文でこれまでに示した方法に基づいて、検討する手法を提案した。

第8章では、本研究の成果と今後の課題について述べた。

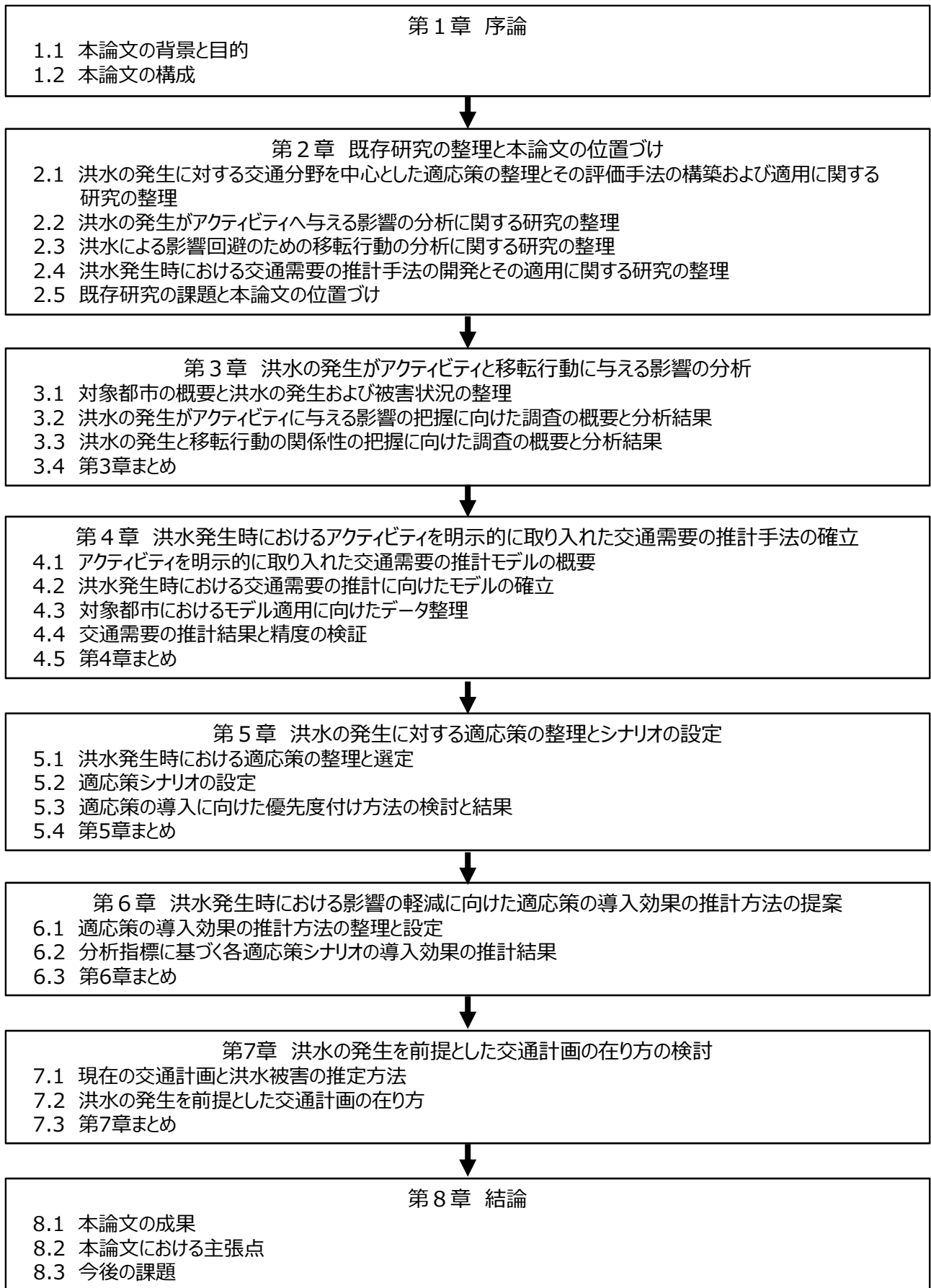


図 1-2 本論文の構成

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書 2021, URL: <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r02/hakusho/r03/pdf/np102500.pdf> (最終アクセス：2022 年 12 月 17 日).
- 2) Joseph Balikuddembe Kimuli, Baofeng Di, Ruixin Zhang, Shaolin Wu, Jienrui Li, Wanqing Yin, 2021: 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, Vol.59, 102237.
- 3) 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.
- 4) 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).
- 5) 環境省 地球温暖化影響・適応研究委員会：気候変動への賢い適応, URL: https://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/index.html (最終アクセス：2022 年 12 月 16 日).
- 6) 国土交通省 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策の在り方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～, URL: https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouiinkai/kikouhendou/pdf/1508_02_toushinhonbun.pdf, (最終アクセス：2022 年 12 月 4 日).
- 7) 香西恒希：気候変動適応策の概要と論点－気候変動適応法案の提出－, 立法と調査, No.399, pp.49-65, 2018.
- 8) 環境省：気候変動適応計画, URL: <http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf>, (最終アクセス：2022 年 12 月 4 日).
- 9) 宇城市 HP：内水浸水想定区域図を作成しました, URL: <https://www.city.uki.kumamoto.jp/2027265> (最終アクセス：2021 年 12 月 9 日).
- 10) 国土交通省 水管理・国土保全局：「流域治水」の基本的な考え方～気候変動を踏まえ、あらゆる関係者が協働して流域全体で行う総合的かつ多層的な水災害対策～, https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/pdf/01_kangaekata.pdf (最終アクセス：2022 年 11 月 16 日).
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 独立行政法人国際協力機構 (JICA)：The Study on Integrated for Flood Mitigation in Chao Phraya River Basin (Final Report), https://openjicareport.jica.go.jp/617/617/617_122_11527967.html (Accessed on December 12, 2022).
- 14) World Bank Thai Flood 2011. Rapid Assessment for Resilient Recover and Reconstruction Planning. Bangkok: The World Bank, URL: https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Thai_Flood_2011_2.pdf, (Accessed on December 22, 2022).
- 15) Thai Government: Climate Change Master Plan, Climate Change Coordination Management Division,

Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Ministry of Natural Resources and Environment, URL: https://www.preventionweb.net/files/60582_thailandclimatechangemasterplan.pdf (Accessed on December 19, 2022).

第2章 既存文献の整理と本論文の位置づけ

本章では、国内外の既存文献を用いて、洪水の発生に対する交通分野を中心とした適応策の整理に関する研究、適応策の評価手法の開発および適用に関する研究、洪水の発生によるアクティビティの変化と移転行動の判断に与える影響の分析に関する研究、洪水発生時における交通需要の推計手法の開発に関する研究を整理した上で、これらの既存文献の課題を示し、本論文の位置づけを述べた。

多くの既存文献では、洪水の発生に対して適応策を導入することが、有効な対応の1つであると述べられている。一方で、既存文献においては、適応策のうち順応策と撤退策の導入効果を適切に推計する手法が開発されていないこと、洪水の発生によるアクティビティの変化の把握および移転行動の判断への影響については十分に分析されていないことを示した。また、これまで多くの既存文献で、洪水発生時の交通需要を推計する手法の構築やその適用を試みているが、その多くは既存の交通需要推計手法である四段階推定法に基づいて、分析している。しかし、四段階推定法に基づく交通需要の推計では、洪水の発生によって変化する人々のアクティビティを十分に表現できない。そのため、適切に適応策の導入効果を推計できず、都市のモビリティへの影響の軽減効果を分析し、評価することができないことを指摘した。

したがって、洪水の発生に対する適応策（特に、順応策）の評価のためには、アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計手法の確立した上で、交通需要を推計し、適応策を評価することが必要であることを述べた上で、本論文の位置づけを示した。

2.1 洪水の発生に対する交通分野を中心とした適応策の整理とその評価手法の構築および適用に関する研究の整理

2.1.1 洪水の発生に対する交通分野を中心とした適応策に関する研究の整理

これまで、気候変動による異常気象に対する適応策の導入に向けて、その概念や政策の整理等が実施されてきた。例えば、三村ら¹⁾は、これまでの適応策に関する研究が概念的な域にとどまっていることを指摘した上で、今後の地球温暖化対策における適応策の導入に向けた課題を整理している。特に、開発途上国での適応能力の強化や具体的な適応策に関して明確な方針が示されていないことを指摘している。この問題を解決するためには、適応策の指針やメニューを分野別に整理し、それぞれの地域の特性に合った適応策を検討した上で、その効果を評価する必要があることや伝統的な相互扶助と近代的な技術をどのように結び付けに関して検討が必要であると述べている。また、Hayら²⁾は、適応は「気候変動の影響を軽減した上で、それに順応し、あるいは利用するための政策を開発・立案・実行するプロセス」と定義し、その基本的な内容を以下の4点に整理している。

- ① リスクの回避と悪影響の発生可能性の低減：予想される影響に対して、予防的な対策を取った上で、危険地域の開発抑制や防災システムを整備するための方策
- ② 悪影響の緩和：災害の発生による影響をなるべく低く抑える減災するための方策
- ③ リスクの分散：発生する影響を住民の間や時間的に分散させ、影響の集中を避けるための方策
- ④ リスクの受容（無対策）：現時点では何もせず、悪影響が発生する可能性を受容する方策

この中で①～③に関しては、IPCC 第4次報告書³⁾、Smitら⁴⁾、土木学会から地球温暖化対策特別委員会の報告書⁵⁾や白井ら⁶⁾の中でまとめられており、適応策を①防護策、②順応策、③撤退策の3種類に分類している(表 1-1)。この分類に基づいて、都市洪水の発生に対する適応策は整理することができる。防護策は、洪水の発生した際に影響を生じさせない方策、順応策は、洪水の発生による影響が生じることを前提としてその状況に対応して生活するための方策、撤退策は、洪水が発生した際に影響が生じないように脆弱な地域から安全な地域へ退避させる方策と定義することができる。

これまで順応策として位置づけることができる交通分野に関する適応策については、災害の発生による都市の交通インフラ、モビリティの確保および交通行動への影響を軽減する観点から議論が進められてきた。例えば、Quinnら⁷⁾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現在レベルの知識や準備するための枠組みを提案している。このフレームワークから、実際的な意思決定を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。Stamosら⁸⁾は、気候変動の影響による洪水を含む都市災害の発生に対する交通システムの脆弱性の軽減に向けて、交通機関別に適応策を整理した上で、短期、中期、長期のロードマップを作成することを目的としている。結果として、対象とする地域の特性を考慮して、適応策の実施による適応能力の向上および脆弱性の減少させていくことが必要であることを明らかにした。

これらの既存文献から、具体的な交通分野の適応策の提案や地域の特性に合わせた導入の検討が必要であることを明らかにしている。しかし、これまで適応策の導入に向けた概念の整理が先行しており、その導入事例や適応策の導入に向けた枠組みについては十分に整理されておらず、分析や評価が実施されていない。

2.1.2 洪水発生時の交通分野の適応策の評価手法の開発とその適用に関する研究の整理

洪水発生時の交通分野を中心とした適応策の評価手法は、これまで、既存の交通需要の推計手法である四段階推定法に基づいて開発が進められてきた。この手法を用いた交通需要の推計結果から、総走行距離や総走行時間等のモビリティに関する評価項目を設定した上で、適応策の導入効果を推計し、評価している。例えば、Gulzarら⁹⁾は、これまで、先進国での適応策の導入は優先順位が低く、選択肢が限られていることを指摘した上で、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(図 2-1)。

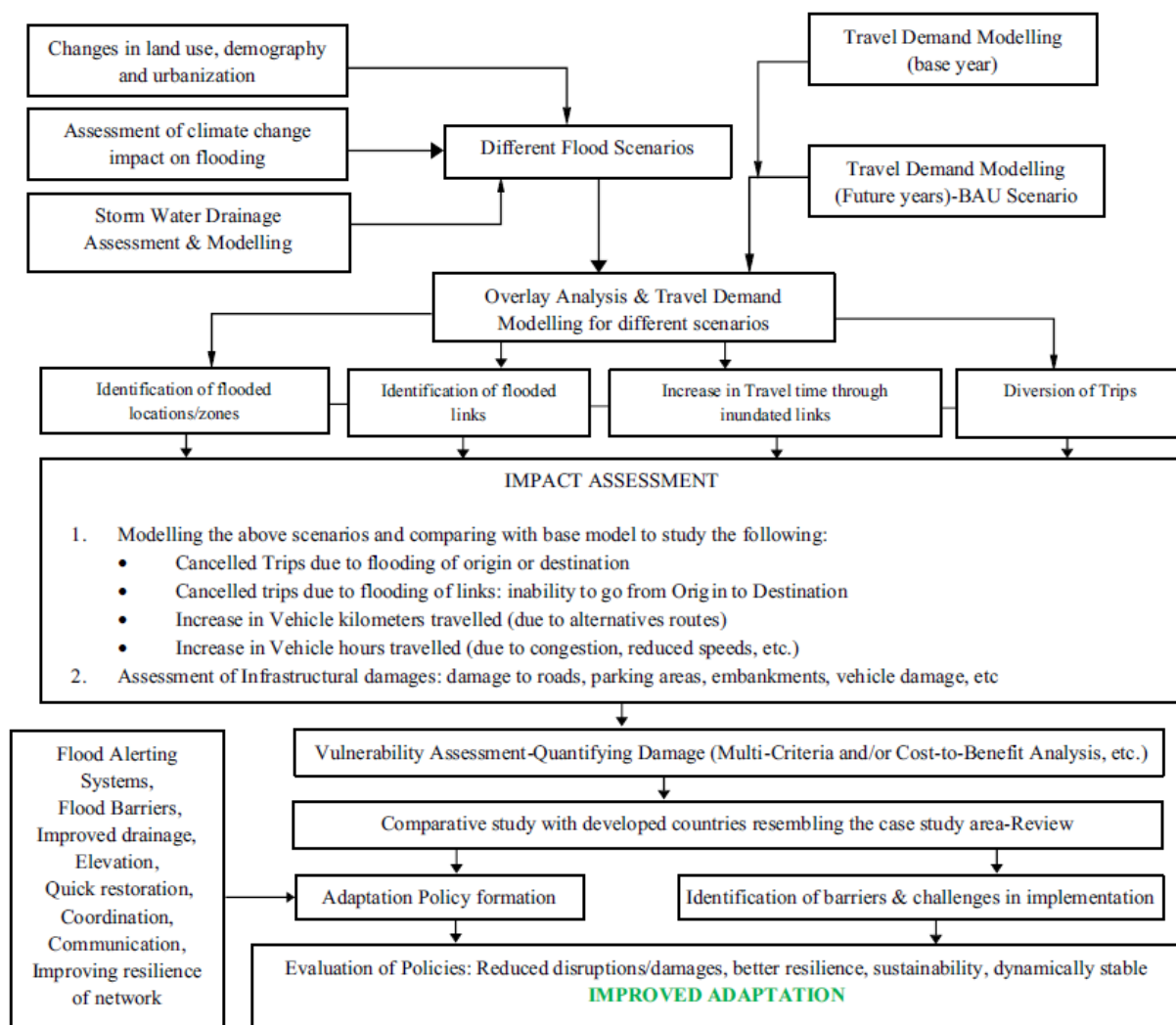


図 2-1 四段階推定法に基づく交通分野の適応策の評価方法の例

(引用：Guzlar ら，Adaptation Policy Framework for Climate Change Impacts on Transportation Sector in Developing Countries, Transportation in Developing Economies, (2019)⁹⁾)

この中で、提案した適応策の評価手法に基づいて、実際に開発途上国での交通分野の適応策の導入に向けた問題点について整理している。結果として、この手法を用いることで交通分野の適応策を評価することが可能となるが、適応策の導入に向けては優先順位づけの方法や気候変動の影響による不確実性の考慮が必要であると結論付けている。

Pregno^{10),11)}らは、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た上で、表現した。また、この影響を軽減するために、“断面交通量”および“浸水深”を組み合わせる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推計している。さらに、代替道路の建設による経済的な効率性を分析するために費用便益分析を適用し、評価している。結果としてこの関数を適用して洪水の影響を表現することで、単に洪水が発生した状況を道路の途絶として表現するよりも現実的にその状態を表現し、分析することができたと述べている。また、提案されている優先順位付け

の方法が適応策の導入をしていく上で、非常に有効であることを示した。特に、優先的に整備すべき2つの道路区間に適応策を導入することで、洪水の発生によって生ずるモビリティへの影響のうちの30%の軽減することが可能であることを示した。また、費用便益分析の結果から必ずしも全ての道路区間を整備することが、経済的な観点からみると効率的ではないことを明らかにした。山下¹²⁾は、2011年に発生したチャオプラヤ川大洪水によって、道路ネットワークで深刻な被害が発生したタイ・バンコクを対象に、広域かつ長期に亘って冠水が生ずることによる道路交通利便性の低下量の推計手法を構築し、道路嵩上げをはじめとしたいくつかの適応策を導入した場合の影響の軽減効果を分析している。具体的には、都市全体を500mメッシュに分割した上で、目的地を大型商業施設として設定した上で、各メッシュの道路交通利便性の低下量を算出し、洪水の発生が都市のモビリティに与える影響を分析している。結果として、洪水発生時には都市全体のうち、6割以上のエリアで道路交通利便性が0(途絶状態)となり、洪水の発生が道路交通利便性に大きく影響を与えていることを明らかにした。また、対策の実施した場合の道路交通利便性の分析から、単に主要道路を対策するだけでなく、浸水深が70cm以下の道路区間を保護した場合の方がより大きな軽減効果が得られることを示した。この結果から、主要な道路区間の冠水が道路ネットワーク全体にもたらす影響は大きく異なり、ネットワークの要となる道路が十分に保護されることや、近年、重要性が指摘されるコンパクト・プラスネットワークを検討する際は災害の影響も考慮する必要があると結論付けている。神田ら¹³⁾は、2018年に発生した平成30年7月豪雨が都市のモビリティに与えた影響に対して実施された災害時BRTおよび自動車の所要時間の短縮を対象として、交通路の途絶の経済被害の抑制効果について走行時間短縮便益に基づいて評価している。結果として、自動車交通と災害時BRTシステムを活用することで、約50億円と極めて大きい経済被害抑制効果があり、費用が3300万円と非常に経済的な効率が良いことを示した。今後、交通マネジメント施策を実施していくことが重要であることを明らかにした。Vajjarapuら¹⁴⁾は、洪水の発生が都市のモビリティに与える影響を分析するために、既存の四段階推定法の枠組みに基づいて交通需要の推計し、インド・バンガロール都市圏を対象として適応策の評価を行った。具体的には、代替道路の建設、スラムの移転、排水性アスファルトの導入、低平地での建築規制、排水ポンプの設置の5つを選定した上で、3つの組み合わせを設定した。その後、それぞれの組み合わせについてモデル上で表現した。それぞれのシナリオの導入効果を2015年、2030年、2050年の3時点における交通需要予測を行った上で、トリップのキャンセル率、総走行距離および総走行時間の3つの評価指標を設定し、評価している。結果として、排水性アスファルトおよび排水用のポンプを適切に設置し、代替道路を建設することで、モビリティへの影響を大きく減少させることを示した。また、大量輸送システムを適切に導入することで、通勤者の移動パターンへの影響を適切に減少させることができる可能性があり、ネットワークがカバーしているエリアの洪水の発生による影響を考慮して構築していくことがモビリティに与える影響の中でも重要であることを明らかにした。

これらの既存文献から洪水発生時における交通分野を中心とした適応策の検討に向けて、様々な優先順位付けの方法や評価方法が提案されていることを確認した。とりわけ、交通分野における適応策については既存の交通需要の推計手法に基づいて評価され、その導入効果を総走行距離や総走行時間に基づいて分析されていることを示した。また、これらの既存文献の分析結果から、単に幹線道路を整備するだけでなく、その他のアクセス道路についても整備の検討するための方法が必要

であることが指摘されている。しかし、これらの多くの既存文献では、四段階推定法に基づいて評価手法が開発されている。そのため、洪水の発生によって変化した人々のアクティビティを詳細に把握し、分析することができない。したがって、洪水発生時における都市のモビリティへの影響の軽減に向けた適応策を適切にその導入効果を推計し、評価することができない。

2.2 洪水の発生がアクティビティへ与える影響の分析に関する研究の整理

これまで、既存文献では、洪水をはじめとした自然災害が発生した際の人々のアクティビティへの影響については、アンケート調査等を実施し、その結果を用いて分析されてきた。

例えば、Liu ら^{15),16)}は、異なる気象条件下における交通需要やアクティビティへ与える影響を調査するために、活動と交通行動の関係性を個人属性の異質性を考慮してグループ分けを行い、スウェーデン全土を対象として分析している。この研究では、人々の活動と交通行動に関して同時方程式トビットモデルを構築し、様々な変数が与える影響を分析した。特に、気象条件によって日常的なアクティビティと非日常的なアクティビティの時間・トリップ数・旅行時間については、トレードオフの関係があることを明らかにした。この結果から、気象条件は、大きくアクティビティと交通行動へ影響を与えていることを示した。Cools ら¹⁷⁾は、気象情報（降雨を含む）を提供した際の活動と交通行動に与える影響を把握するために、アンケート調査を実施し、その結果からカイニ乗検定およびロジットモデルの構築を通じて分析している。結果として、交通機関選択や出発時刻の選択に大きく影響を与えていることを明らかにした。また、就業や就学のような日常的なアクティビティよりも、レジャーやショッピングのような非日常的なアクティビティの方が大きく影響を受け、定常時と異なるアクティビティへ変更される可能性が高いことを示した。Rudloff ら¹⁸⁾は、オーストリアのウィーン都市圏の交通需要やアクティビティに対する天候の影響を把握するために、都市圏全体の長期の世帯の交通調査のデータを用いて、分析した。この調査結果に基づいて統計モデルを適用し、天候が多くの人々の交通行動やアクティビティに大きく影響を与えていることを示した。また、天候の影響が移動手段や個人属性と関係していることを明らかにした。片田ら¹⁹⁾は、津波による洪水が発生した際の人的被害の規模や発生原因を考慮し、対応策を検討していく中で、住民の空間分布やアクティビティを用いた分析の必要性を示している。そのため、アクティビティに基づくシミュレータを構築した上で、三重県・尾鷲市の中心部を対象として適用している。結果として、平常時における人々のアクティビティを表現し、被災シナリオのプロセスについて検討した上で、地域防災計画の策定に向けて、都市のアクティビティの分析が重要であることを示した。浦田ら²⁰⁾は、災害発生時における都市内や都市間の交通混雑が発生することで、住民の通勤などの移動が平常時と比べて大きく変化しているため、避難や救助のために事前に耐災害に向けたインフラ整備をする必要があるとの認識の下で、災害復旧期の交通需要の計算を目的としたアクティビティシミュレータを開発し、災害発生直後におけるアクティビティを分析している。この文献では、被災活動需要シミュレータ SPACE と日常生活需要シミュレータ ASTRO を組み合わせることで、復旧期の交通需要を再現した。このモデルでは、比較的短距離のトリップや詳細な経路配分を組み合わせることで、施設配置による交通混雑への影響を評価可能とした。また、パラメータのキャリブレーションを通じて、災害復旧期という状況の変化の大きい場合でもシミュレータの再現性を担保することができ、災害発生時の交通需要の再現を可能とした。さらに、この結果から、被災

時には、人々のアクティビティが大きく変化していることを示している。

しかし、これまで、本論文で対象とする長期の洪水が発生した際の人々のアクティビティの変化の把握に向けた分析を実施した研究は少なく、その分析は十分に実施されていない。そのため、洪水が発生した際にどのように人々のアクティビティが変化しているかは明らかにされておらず、適応策の評価時にこの影響を考慮することができない。

2.3 洪水による影響回避のための移転行動の分析に関する研究の整理

洪水の発生による影響回避のための移転行動については、主に、アンケート調査を実施した上で、その結果に基づいて分析されてきた。例えば、Sawada ら²¹⁾は、2011年に約1兆円の大きな被害をもたらしたチャオプラヤ川大洪水による影響を受けた地域の日系企業に対して、アンケート調査を実施し、企業の移転意向について明らかにしている。結果として、2011年のチャオプラヤ川大洪水発生後の企業の立地選択には、洪水リスクを加味して選択するようになったことを示した。また、洪水の被害が大きかった地域は、洪水の発生後に大きく地価が低下したことを明らかにした。

及川ら²²⁾は、東海豪雨災害後の住民の移転意向に関して、甚大な被害にあった人々のうち合計3,800名にアンケート調査を実施し、浸水被害や生活再建の実態および移転意向の形成要因について分析した。アンケート調査結果から、移転意向の形成には、浸水被害が甚大なことによる生活の再建の断念およびリスク回避手段として移転が位置付けられ、約20%程度の人々が移転を検討していることを明らかにした。この結果から、洪水発生時における影響が大きかった地域の住民の方が移転を受容しやすい傾向があることを示した。Henry ら²³⁾は、2011年にタイ・バンコクを中心として発生したチャオプラヤ川の大洪水の際の所得格差、情報格差による被害状況と居住地の関係性についてロジスティック回帰モデルおよび通常回帰モデルを適用することで、どのような項目が影響を与えているのかについて分析している。結果として、所得が低い地域で洪水が発生した際の被害が大きくなる傾向があることを示した。この理由として、低所得者の方が情報を得る手段が少なく、正しい情報が伝達されないことでその影響が大きくなっていることを明らかにした。Lu ら²⁴⁾は、洪水が発生した後の人々の居住地選択および職場の選択行動の変更についてバングラデッシュの複数の都市を対象に、アンケート調査を実施した。調査結果に基づいて、居住地選択モデルを構築した上で、大きな影響を及ぼす要因を分析している。結果として、居住年数、以前の災害の被害の状況、年齢、およびアクセシビリティが大きく関係することを示した。また、洪水の被害が発生した地域の人々は、より安全な地域を求めて居住地を変更する可能性が高いことを明らかにした。

今井ら^{25), 26)}、竹間ら²⁷⁾、石徹白ら²⁸⁾、瀬田ら²⁹⁾は、我が国で広く利用されている応用都市経済(Computable Urban Economics)モデルの効用関数を変数として浸水リスクを組み込むことで、洪水発生時の住民の転居行動を表現するモデルを構築し、将来の人口分布を推計している。モデルの構築に向けた浸水リスクを表現するためのパラメータに関しては、転居に対する重要度を住民に対してアンケート調査を実施することで把握し、分析している。結果として、職場や就業地および商業施設までのアクセシビリティや地価および水害リスクの項目が転居を考える際の重要な項目であることを示した。この結果とプロフィールアンケート調査の結果から、効用関数の変数として加え、将来の人口分布の推計時に複数のパターンを想定して分析している。最終的には、構築したモデルを用いて、住民移転に関する政策を導入した際の影響の評価を行った。

これらの既存文献では、主に、住民のアンケート調査の結果から移転行動の決定要因に関して分析されており、アクセシビリティや人々の所得の影響だけでなく、洪水の発生による被害が大きく寄与していることを明らかにした。しかし、世帯の移転行動についてモデル化している研究は少なく、十分に分析されていない。特に、本論文で対象とした長期に亘る洪水の発生については、大きく移転意向に関係する可能性があるが、その点については分析されていない。

2.4 洪水発生時における交通需要の推計手法の開発とその適用に関する研究の整理

2.4.1 洪水発生時における四段階推定法を用いた交通需要の推計に関する研究の整理

これまで、洪水発生時における交通需要の変化を既存の四段階推定法を用いて、主に交通ネットワーク上で冠水の影響を表現した上で、分析している既存文献が多く存在する。例えば、Chang ら³⁰⁾は、洪水の発生による交通インフラや道路への影響を速度低下や寸断として表現した上で、米国・ポートランド都市域を対象として交通需要を推計し、その影響を分析している。具体的には、2005年（現在）と2035年（将来）の二時点での洪水発生時の交通需要の推計し、その結果から総走行距離、総走行時間および総遅れ時間を用いて影響の分析を実施した。結果として、洪水発生時には、総走行時間よりも総遅れ時間の方が大きく増加することを示した。Dragana ら³¹⁾は、洪水を含む災害の発生が都市のモビリティへ与える影響について、特に、交通需要の発生および交通機関選択に焦点を当てて、既存文献を整理した上で示している。結果として、ローカルレベルでは、気象現象の発生による都市の生活への影響は大きく異なり、それぞれの地域毎に、対応したモデリングをする必要があることを示した。また、将来的により大きく変化する気象現象については、それに対応した交通需要の推計手法の開発が必要であることを明らかにした。Paramet ら³²⁾は、タイ・ハジャイ市を対象として、洪水発生時の避難行動をアンケート調査から把握した上で、10%刻みで交通需要を変更させた場合の配分計算を適用し、旅行時間へ与える影響を分析している。アンケート調査から洪水発生時には、およそ60%程度まで交通量が減少することを示し、旅行時間は全て30分以内に移動することができるとしていることを示した。この結果から、自宅から避難センターへのアクセシビリティを交通需要の推計結果から評価する手法を開発することができることを明らかにし、洪水の発生によるモビリティに対する被害を把握することができる手法を既存の交通需要の推計手法に基づいて、確立した。

2.4.2 洪水発生時におけるアクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計に関する研究の整理

近年では、短期の洪水発生時を対象として、アクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計手法の開発や適用が進められている。例えば、Pyatkova ら³³⁾は、洪水発生時における道路区間の冠水が道路交通へ与える影響を自由流速度の低下および通行止めとしてネットワークのサービスレベルとして表現した上で、スペイン・マルベラを対象としてアクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計手法を適用し、アクティビティパターンおよび旅行時間の変化を分析した。結果として、洪水発生時には、定常時と比較して、全体のうち約27%の人々の交通行動で変化が発生していることを示した。そして、単に寸断した道路区間の周辺のエリアだけでなく、都市全体でモビリティが低下し、アクティビティに大きな変化が生ずることを示した。また、移動距離よりも移動

時間でみた場合の方が洪水の発生による影響が大きくなることを明らかにした。Han ら³⁴⁾は、アメリカ・マイアミ地区を対象として、洪水が発生した際の都市のモビリティ及ぼす影響を把握するために、アクティビティベースモデルによる交通需要の推計結果から分析している。具体的には、マイアミ・デイド群（フロリダ州）の人口データおよびアクティビティダイアリー調査のデータに基づいて、アクティビティシミュレータ MATSim を利用して、将来時点（2045 年）の交通需要を推計した。なお、洪水発生時の交通状態への影響は、それぞれの道路区間の浸水深を把握した上で、自由流速度を変更することで、洪水発生時における冠水による道路区間への影響を表現している。

結果として、100 年規模の洪水が発生した際に対策を実施していた場合には 14 分程度、対策を実施していない場合には 63 分程度増加することを示した。特に、洪水発生時には、ピーク時間帯の総走行時間や 1 トリップ当たりの旅行時間が非常に大きくなることを明らかにした。Saadi ら³⁵⁾は、外水氾濫の発生によって、アクティビティパターンがどのように変化するかを詳細に把握するために、アクティビティベースモデルの 1 つである MATSim をベースとして洪水が発生した際の交通ネットワークの浸水や寸断による交通需要への影響を把握するための手法を開発した。具体的には、ベルギー・リエージュを対象として構築したモデルを適用し、重要な道路区間のサービスレベルを低下させた場合の影響を分析するために、10%、25%、50%、75%の 4 つを設定して比較した。設定したシナリオと定常時における交通需要の推計結果を比較し、アクティビティパターンと移動時間に関する差を算出した。結果として、定常時シナリオと比較して、平均旅行時間が 10%、25%、50%、75%のシナリオでは、それぞれ 16.36%、44.44%、126.77%、144.44%の旅行時間が増加することが示された。また、都市全体でのアクティビティの総数は大幅に減少し、それに伴って交通需要についてもサービスレベルに応じて低下することを示した。

しかし、既存文献では、主に既存の交通需要の推計手法である四段階推定法に基づいて適応策の評価手法を開発しているため、アクティビティへの影響を十分に表現することができない。また、アクティビティベースモデルを適用している既存文献では、短期の洪水を対象として分析が実施されている。そのため、本研究で対象とするような広範囲に冠水し、長期に亘って影響が継続するような洪水が発生した際の人々のアクティビティが制限され、大幅に変化するような場合については十分に分析されていない。

2.5 既存研究の課題と本論文の位置づけ

本章では、洪水の発生に対する交通分野に関する適応策の整理およびその評価手法の構築と適用に関する研究を整理した。さらに、洪水の発生によるアクティビティの変化や移転行動との関係性に関する研究および交通需要の推計に関する研究を整理し、本論文で用いるアクティビティの変化を明示的に取り入れた交通需要の推計手法の必要性を示した。

これらを踏まえ、洪水の発生を前提とした交通計画の在り方を検討するためには、以下の課題が挙げられる。

- ① これまで、洪水の発生が人々のアクティビティに与える影響は十分に分析されておらず、気象予報等の情報提供による影響について分析している文献が多い。そのため、本論文で対象とす

るような長期に亘って広範囲に冠水した状態が継続する洪水が発生した場合における、人々のアクティビティの変化については、十分に明らかにされていない。

- ② 洪水の発生に対する撤退策（例えば、洪水の発生による被害を考慮した土地利用）を検討するためには、移転行動と洪水の発生に関して関係性を明らかにした上で、モデル化する必要がある。そのモデルを洪水に大きく影響を受ける世帯を対象に適用し、どの程度の個人や世帯が移転可能かを明らかにする必要がある。しかし、その関係性については示されているが、十分な分析や移転行動のモデル化は実施されていない。
- ③ 洪水の発生に対して地域性や状況に応じた適応策を検討した上で、適応策の導入効果を推計し、評価することが求められている。しかし、これまでの適応策やその評価手法に関する研究では、人々のアクティビティに対する影響については、十分に分析されておらず、これらは考慮されていない。

これまで、順応策について評価している研究では、既存の四段階推定法の枠組みに基づいて、ネットワーク上でその影響を表現し、導入効果の推計や評価が実施されている。しかし、洪水が発生した際には、人々のアクティビティが大きく変化しているため、それらの変化を明示的に取り入れた交通需要の推計を行うことが求められている。また、撤退策を評価するためには、各世帯の移転行動をモデル化し、表現することが必要となるが、集計的な交通需要の推計手法である四段階推定法を用いた交通需要の推計では、これらを表現することができない。

したがって、洪水の発生に対する順応策および撤退策の評価をするためには、既存のアクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計手法を用いて、交通需要を推計する必要がある。そのためには、アクティビティベースモデルを改良し、これらの適応策を評価することで、人々の洪水の発生によるアクティビティの変化を詳細に表現することが求められている。

そこで、本論文では、洪水の発生による影響の軽減に向けた順応策と撤退策を評価するために、既存のアクティビティベースモデルを改良し、洪水の発生による人々のアクティビティの変化を詳細に表現できる交通需要の推計手法を確立し、その影響を分析する。

さらに、順応策と撤退策を導入する場合の優先順位付け方法を整理した上で、適応策の評価手法を構築する。また、提案した手法を用いて、複数の適応策を評価した上で、その結果から洪水の発生を前提とした交通計画の在り方を検討し、提案する。

参考文献

- 1) 三村信男：地球温暖化対策における適応策の位置づけと課題，地球環境，11(1)，103-110，2006.
- 2) John Hay, Nobuo Mimura: Supporting climate change vulnerability and adaptation assessments in the Asia-Pacific region: An example of sustainability science, Sustainability Science, 1(1):23-35, 2006.
- 3) 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)。
- 4) Barry Smit, Johanna Wandel: Adaptation, Adaptive Capacity and Vulnerability, Global Environmental Change, 16 282-292, 2006.
- 5) 土木学会：地球温暖化に挑む土木工学，土木学会地球温暖化対策特別委員会報告書，157 PP., 2009.
- 6) 白井信雄，田中充，田村誠，安原一哉，原澤英夫，小松利光：気候変動適応の理論的枠組みの設定と具体化の試行－気候変動適応策の戦略として－，環境科学会誌，第27巻5号，pp.313-323，2014.
- 7) Andrew D. Quinn, Emma J. S. Ferranti, Simon P. Hodgkinson, Anson C. R. Jack, John Beckford, John M. Dora: Adaptation Becoming Business as Usual: A Framework for Climate-Change-Ready Transport Infrastructure, Infrastructures, 3(2):10, 1-12, 2018.
- 8) Iraklis Stamos, Evangelos Mitsakis, Josep Maria Salanova Grau: Roadmaps for Adaptation Measures of Transportation to Climate Change, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2532(1), 1-12, 2015.
- 9) Saqib Gulzar Ashish Verma, Harsha Vajjarapu: Adaptation Policy Framework for Climate Change Impacts on Transportation Sector in Developing Countries, Transportation in Developing Economies, 5(3), 1-19, 2019.
- 10) Maria Pregnolato, Alistair Ford, Vassilis Glenis, Sean Wilkinson, Richard Dawson: Impact of Climate Change on Disruption to Urban Transport Networks from Pluvial Flooding, Journal of Infrastructure Systems, Vol.23, No.4, 1-13, 2017.
- 11) Maria Pregnolato, Alistair Ford, Sean Wilkinson and, Richard Dawson: The Impacts of Flooding on Road Transport: A Depth-Disruption Function, Transportation Research Part D, Vol. 55, 67-81, 2017.
- 12) 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_301-306, 2017.
- 13) 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一考察—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.
- 14) Harsha Vajjarapu, Ashish Verma, Hemanthini Allirani: Evaluating Climate Change Adaptation Policies for Urban Transportation in India, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol.47, 101528, 2020.
- 15) Chengxi Liu, Yusak O. Susilo, Karlström Anders: Examining the Impact of Weather Variability on Non-Commuters' Daily Activity-Travel Patterns in Different Regions of Sweden, Journal of Transport Geography, 39, 36-48, 2014.
- 16) Chengxi Liu, Yusak O. Susilo, Nurstihazlin Ahmad Termida: Weather Perception and Its Impact on Out-of-Home Leisure Activity Participation Decisions, Transportmerica B: Transport Dynamics. Vol.8, Issue

1, pp.219-236, 2020.

- 17) Mario Cools, Lieve Creemers: The Dual Role of Weather Forecasts on Changes in Activity-Travel Behavior, *Journal of Transport Geography*, Vol. 28, 167-175, 2013.
- 18) Christian Rudloff, Maximilian Leodolter, Dietmar Bauer, Werner Brög, Knud Kehnscherper: Influence of Weather on Transport Demand: Case Study from the Vienna, Austria, Region, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2482(1), 110-116, 2015.
- 19) 片田敏孝, 桑沢敬行, 金井昌信: 発災時刻の都市アクティビティを考慮した津波による人的被害量の推定に関する研究, *土木学会論文集 D*, Vol.63, No.3, 275-286, 2007.
- 20) 浦田淳司, 佐々木泰, 井料隆雅: 災害復旧期におけるアクティビティシミュレータの開発と適用, 第 61 回土木計画学研究・講演集, pp.1-15, 2019.
- 21) Yasuyuki Sawada, Hiroyuki Nakata, Kunio Segikuchi: Natural Disasters, Land Price, and Location of Firms: Evidence from Thailand, *RIETI Discussion Paper Series 14-E-029*, 38pp, 2014.
- 22) 及川康, 片田敏孝, 小林聡: 東海豪雨災害後の住民の移転意向に関する研究, *水工学論文集*, 第 46 巻, 307-312, 2002.
- 23) Henry Michael, Akiyuki Kawasaki, Ichigaku Takigawa, Kimiro Meguro: The Impact of Income Disparity on Vulnerability and Information Collection: an Analysis of the 2011 Thai Flood, *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 339-348, 2017.
- 24) Qing-Chang Lu, Junyi Zhang, A.B.M. Sertajur Rahman: Location Choice Behavior Adapting to Flood and Cyclone Hazards, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 27, pp.189-198, 2018.
- 25) 今井一貴, 佐藤徹治: 水害リスクを考慮した土地利用施策評価のための将来時系列の人口分布推計モデルの開発—富山県富山市を対象として—, *都市計画論文集*, Vol.50, No.3, pp.656-662, 2019.
- 26) 今井一貴, 佐藤徹治・神永希・杉本達哉・高森秀司: ソフト施策による水害リスク軽減対策が将来の都市内人口分布に与える影響分析, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.72, No.5, I_423-I_434, 2016.
- 27) 竹間美夏, 佐藤徹治: 立地適正化計画に基づく居住誘導施策検討のための都市内人口分布推計手法の開発—愛知県豊橋市を対象として—, *都市計画論文集*, Vol.52, No.3, pp.1124-1129, 2017.
- 28) 石徹白伸也, 天方匡純, 高森秀司, 島田高伸, 神永希, 杉本達哉, 佐藤徹治: 将来の都市構造を考慮した水害リスク軽減対策に関する研究, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.74, No.3, 44-61, 2018.
- 29) 瀬田創, 山形与志樹, 中道久美子, 堤盛人: CUE 型住宅立地モデルを用いた広域都市圏における水害脆弱性評価, *土木計画学研究・論文集*, Vol.44, No.331, 2011.
- 30) Heejun Chang, Martin Lafrenz, II-Won Jung, Figliozzi Miguel, Deena Platman, Cindy Pederson: 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.
- 31) Dragana Petrović, Ivan Ivanović, Vladimir Đorić, Jadranka Jović: Impact of Weather Conditions on Travel Demand - The Most Common Research Methods and Applied Models, *Promet-Traffic & Transportation*, Vol.32, No.5, 711-725, 2020.

- 32) Paramet Luathep, Sittha Jaensirisak: Evaluation of Accessibility to Evacuation Centers in Asian Developing City, *Advanced Materials Research*, Vol.931-932, pp.567-571, 2014.
- 33) Katya Pyatkova, 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.
- 34) Yu Han, Changjie Chen, Zhong-Ren Peng, Pallab Mozumder: 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.
- 35) Ismail Saadi, Ahmed Mustafa, Jacques Teller, Mario Cools: Investigating the Impact of River Floods on Travel Demand based on an Agent-based Modeling Approach: The Case of Liège, Belgium, *Transport Policy*, Vol.67, 102-110, 2018.

第3章 洪水の発生がアクティビティと移転行動に与える影響の分析

本論文が対象とする東南アジア諸国では、洪水が頻発に発生しており、大半の河川が無堤防河川である。そのため、一度氾濫すると広範囲に非常に長期に亘って影響が生ずる。そこで、表 3-1 に、東南アジア各国における 1900 年から 2022 年までに発生した最も死亡者数が多い上位 5 つの洪水について Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CREED) ¹⁾ が公表しているデータに基づいて整理を行った。

表 3-1 東南アジア諸国の洪水被害の整理

タイ王国				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
2011	外水氾濫	813	48,185,413	149
1988	外水氾濫	665	387,570	8
2010	外水氾濫	258	412,564	60
1975	外水氾濫	239	226,577	30
1995	外水氾濫	231	249,839	99
フィリピン共和国				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
2011	内水氾濫	653	1,425,588	-
1993	内水氾濫	416	1,245,281	12
1978	内水氾濫	228	804,464	-
2017	内水氾濫	130	29,281	9
1984	内水氾濫	125	-	2
ベトナム社会主義共和国				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
1999	沿岸洪水	622	385,531	15
2000	外水氾濫	460	393,394	-
1964	-	400	-	-
1994	外水氾濫	310	376,588	106
2001	外水氾濫	310	128,547	95
インドネシア共和国				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
1981	外水氾濫	500	109,169	30
2010	内水氾濫	291	96,928	5
2001	外水氾濫	257	-	22
2003	内水氾濫	241	-	13
2006	内水氾濫	236	74,197	5
マレーシア				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
1970	外水氾濫	61	37,000	-
2021	内水氾濫	56	146,000	17
1967	外水氾濫	50	25,600	-
1993	外水氾濫	30	-	-
2007	外水氾濫	29	363,000	15
カンボジア王国				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
1994	-	506	-	-
2000	外水氾濫	347	271,921	31
2011	外水氾濫	247	677,842	83
2013	外水氾濫	200	628,130	21
1996	外水氾濫	59	-	35
ミャンマー連邦共和国				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
2011	内水氾濫	151	2,212	3
1993	外水氾濫	149	146,934	35
1978	-	115	-	9
2017	内水氾濫	90	-	-
1984	-	68	-	-
ラオス人民民主共和国				
年	洪水タイプ	死亡者数(人)	被害額('000 US\$)	浸水期間(日)
1966	外水氾濫	300	137,950	31
2013	外水氾濫	136	-	33
2013	外水氾濫	34	-	61
1992	外水氾濫	31	-	-
2015	-	30	-	16

結果として、東南アジア各国で大きな被害をもたらしている洪水のうち 70%程度は外水氾濫であり、そのほとんどの浸水期間が長期に亘る場合が多い。そのため、物的被害や人的被害問わず洪水が発生した際の被害は非常に甚大なものとなっている。これらの洪水の影響が生じる範囲には、多くの都市が含まれており、結果的に都市洪水が広範囲に多くの都市で発生していることになる。東南アジア各国の都市の総人口数と人口密度を各国の統計データから整理し、比較を行った（図 3-1）²⁾⁹⁾。これを見ると、人口規模は 0-15 万人程度、人口密度 0-5,000 人/km²の都市が大半であることがわかる。そこで、本研究では、この範囲内にある代表的な都市として、タイのウボンラチャタニ市を選定した。ウボンラチャタニ市は、人口数 7.49 万人および人口密度 2585.4 人/km²である、図中のオレンジの点で示す。

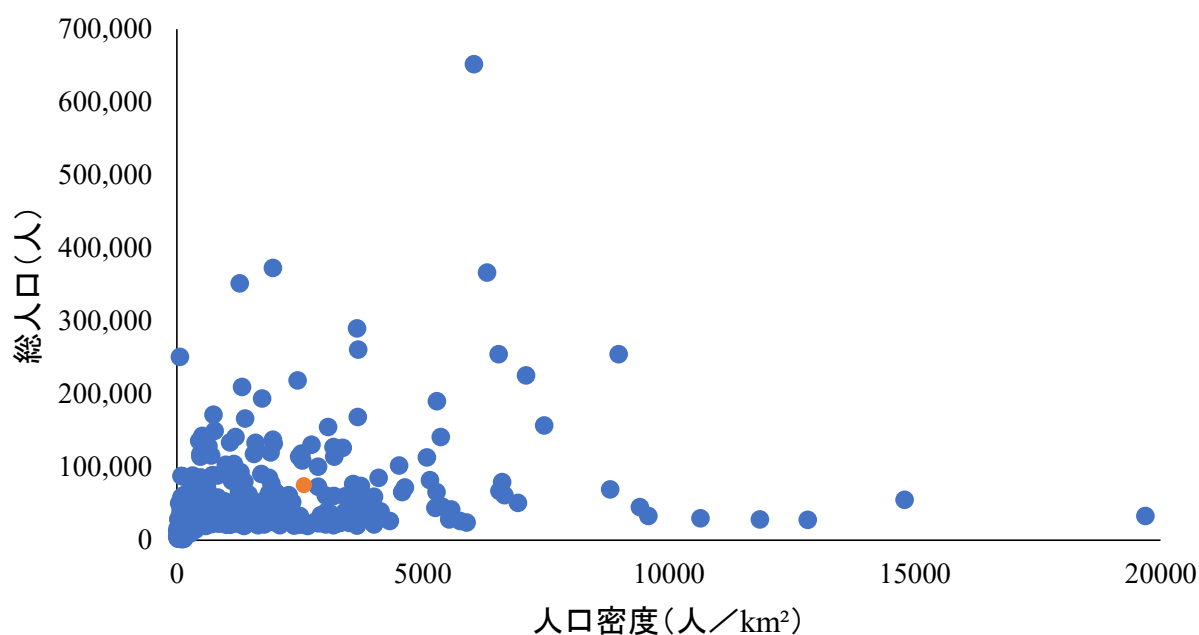


図 3-1 東南アジア諸国における都市の人口と人口密度の比較

各都市の人口規模や各国の洪水の発生およびその被害状況を俯瞰し、代表としてタイ・ウボンラチャタニ市を選定し、同都市の交通計画上で検討されている交通政策や現在の都市の交通状況について整理した。また、ウボンラチャタニ市における都市洪水の発生による被害状況を整理し、その対応（主に、適応策のうち実施されている防護策）について示した。

その上で、洪水が発生した際に人々がアクティビティをどのように変化するか把握するために、アンケート調査を実施した。調査の結果に基づいて、定常時から洪水の発生によってどの様に人々のアクティビティが変化しているかを比較分析した。また、洪水の発生を含む様々な要因のうち移転行動の判断に寄与している要因を把握するために、ウボンラチャタニ市の住民を対象として、移転意向に関するアンケート調査を実施し、その結果から示した。それぞれの分析結果から、洪水の発生によるアクティビティの変化と移転行動の判断に与える影響を明らかにした。

3.1.1 対象都市の概要

本論文では、毎年雨季（5月～10月）に都市洪水が発生し、甚大な被害を受けているタイ・ウボンラチャタニ市を対象都市として選定した。ウボンラチャタニ市は、タイ東北部に位置する中規模都市である（図 3-2）。選定したウボンラチャタニ市は、人口の増加に伴って、郊外化が進み、公共交通機関が十分に整備されていないこと、洪水の発生に対して非常に脆弱な都市であるという東南アジアの多くの都市が抱えている問題が発生しているため、その中の代表例として選定した。

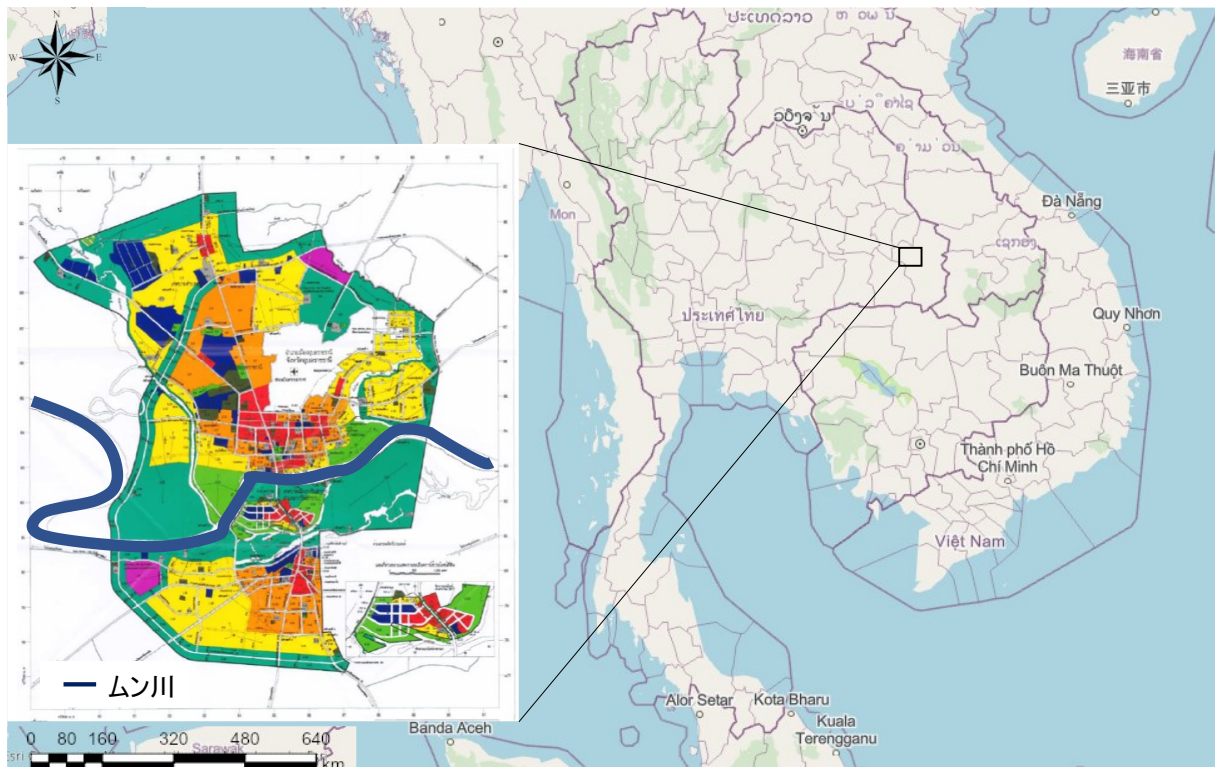


図 3-2 対象都市の位置と土地利用状況

また、同都市では、図 3-2 に示すように線引きや地球温暖化の対策として、大量輸送機関の導入やモーダルシフトの促進をはじめとした緩和策の議論が進められており、公共交通機関を中心とした都市の形成を目指している¹⁰⁾（表 3-2）。

この理由として、ウボンラチャタニ市では、公共交通機関としてソンテウが整備されているが、都市の一部の道路区間のみ走行している。そのため、都市全体の公共交通ネットワークとしての整備はされておらず、住民が目的地まで公共交通だけでアクセスすることができないためであると推察される。したがって、自動車や自動二輪車での移動が非常に多く、今後も車両の登録台数は年々増加することが想定されているため、今後も自動車や自動二輪車等の私的交通機関での移動が中心となる可能性が高い。

また、ウボンラチャタニ市には、都市の中央を南北に分断するようにムン川が流れており、上流側でチー川とムン川が合流している。また、雨季には大量の水が流出することで河川が氾濫する¹⁾。今後、地球温暖化の進行による異常気象によって洪水の発生回数の増加や被害の拡大が想定されており、都市洪水の発生に対する影響の軽減に向けた適応策の導入がより重要性を増してくる。

3.1.2 対象都市における洪水の発生およびその被害状況

ウボンラチャタニ市では、都市の中央を流れるムン川を中心として外水氾濫（河川の氾濫）が発生している。その中でも1938年、1950年、1978年、1998-2002年、2019年に、例年と比較して大規模な洪水が発生したことが記録されている。ムン川は、我が国の河川と比較すると河床勾配（例えば、利根川の場合；1:600）が非常に緩やかである（ムン川；1:15,000）。そのため、一度、洪水が発生すると、非常に長期（1か月以上）に亘って洪水の影響が生じている状態が継続する。その中でも特に、2002年に発生した都市洪水では、同市を南北に移動する際に通行可能な4つの道路区間（No.1：西側バイパス、No.2&3：中央の橋、No.4：東側バイパス）を含む河川周辺の多くの道路区間で冠水し、速度低下や寸断することで、都市のモビリティが著しく低下した（図3-4）。

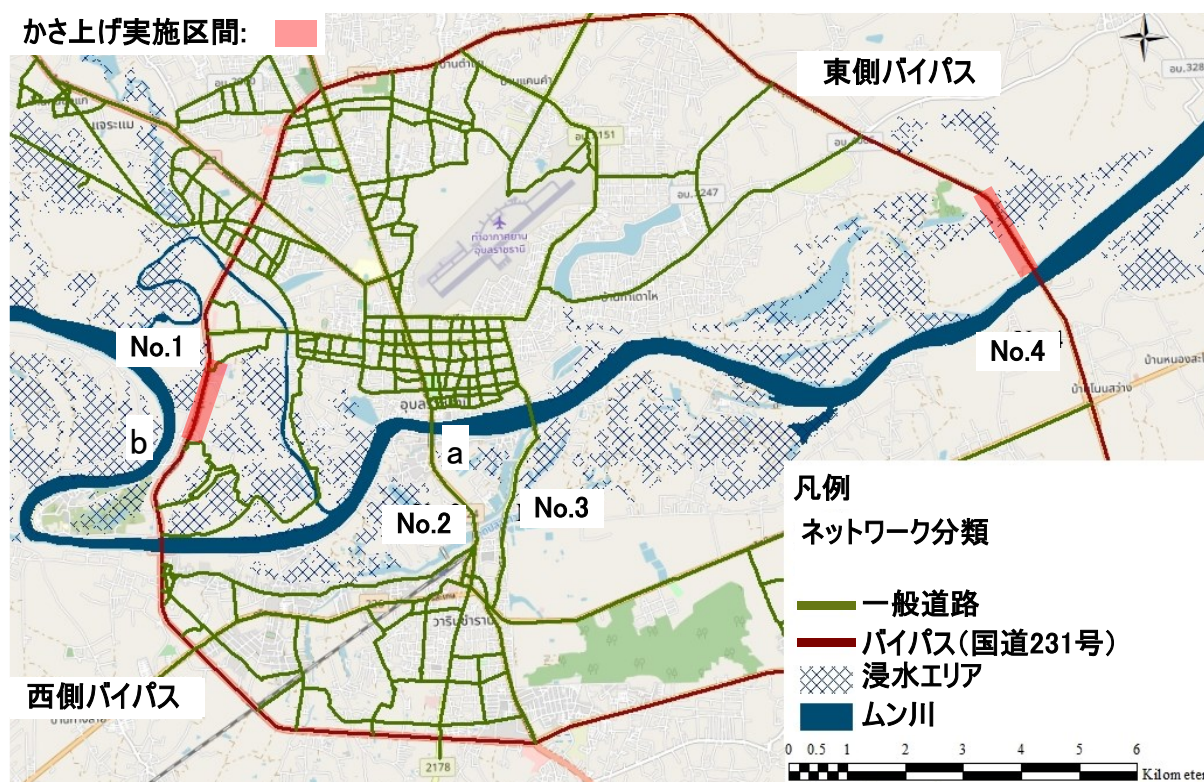


図 3-4 対象都市の道路ネットワークと浸水域

この洪水の発生によって78日間冠水した状態が継続し、総計で10億パーツ（1パーツ≒3.5円）と非常に大きな被害が発生したと記録されている¹²⁾。そのため、地方自治体は、洪水が発生した場合でも都市のモビリティを確保するために、図3-4に示す西側および東側バイパス（赤色マーカー部分）の一部区間を50～150cm嵩上げした。また、洪水の発生による被害を防ぐために、防護策として、ダム建設（図3-5①）、放水路の整備（図3-5②）、防水壁の建設（図3-5③）、遊水池の設定（図3-5④）が進められている。



図 3-5 対象都市で実施されている防護策

しかし、洪水発生時には、ウボンラチャタニ市の上流側から大量の水が都市内へ流れこみ、長期に亘って広範囲に影響が発生して継続する。そのため、依然として洪水の発生による被害は甚大であり、完全にその影響は防ぐことができず、多くの道路区間が冠水することは避けられない。2019年9月中旬に大きな洪水が発生した際には、同都市の中央に位置している2つの橋（図3-4 No.2 & 3）とその周辺の道路区間は通行不可能であった（図3-4 No.4）。一方で、西側バイパス（図3-4 No.1）や東側バイパスの一部の道路区間については2002年の洪水発生後に嵩上げされていたため、定常時よりも速度は低下したが、通行可能であった（図3-6）。

今後、洪水の発生による影響が生じないように防護策の実施と同時に、その影響を軽減するために順応策と撤退策の検討も重要である。特に、ムン川のような緩流河川（河床勾配が緩やかな河川）については、吉川らの研究^{13,14)}によると、洪水の発生による影響を防ぐと同時に、その影響が生じ

た際の被害のポテンシャルを軽減することが非常に重要であると述べられている。したがって、洪水の発生を前提とした交通計画を検討し、都市のモビリティの確保に向けて議論する必要がある。そのためには、洪水の発生によってどの様に人々がアクティビティを変化させるのか、また、移転行動の判断にどのように影響を与えるのかを事前に詳細に把握し、これについて考慮した上で順応策や撤退策の導入を検討し、交通計画に組み込んでいく必要がある。したがって、洪水が発生した際のアクティビティや移転行動を明らかにする必要があるが、十分に分析されておらず、交通計画の際に実施される交通需要予測にこの変化については考慮されていない。



図 3-6 洪水発生時（2019 年）における道路交通の様子

3.2 洪水の発生がアクティビティに与える影響の把握に向けた調査の概要と分析結果

3.2.1 洪水発生時のアクティビティに与える影響の分析に向けたアンケート調査の概要

洪水の発生によるアクティビティの変化を明らかにするために、アクティビティダイアリー調査を実施した。本調査では、調査対象者の 1 日を通じたアクティビティ全体を時間軸に沿って連続的に何う形式となっている（図 3-7）。アクティビティダイアリー調査は、一般的に広く実施されている交通調査のパーソントリップ調査と比較して、代表的な移動以外の立ち寄りの移動（いわゆる中間トリップ）を把握できるとされている。名取ら¹⁵⁾の研究によるとパーソントリップ調査よりもアクティビティダイアリー調査の結果を比較すると、パーソントリップ調査では、20%程度のトリップの抜け落ちていと述べられている。また、アクティビティダイアリー調査は、開発途上国でも徐々に実施され始めており、ボリビア・サンタクルス、インドネシア・ジャカルタ、コートジボワール・アビジャンで行われている¹⁶⁾。しかし、いずれの調査においても洪水発生時のアクティビティの変化については焦点が当てられておらず、洪水の発生によるアクティビティの変化を分析した例は見受けられない。また、我が国においても京阪地域を対象としてアクティビティダイアリー調査が実施されたが、洪水発生時のアクティビティの変化については調査内で扱われていない¹⁷⁾。

そこで、本論文では、洪水発生時における定常時からのアクティビティの変化を把握するために、2022 年 7 月にウボンラチャタニ市の合計 300 世帯・810 名の住民の方々を対象として、アクティビティダイアリー調査を実施した。

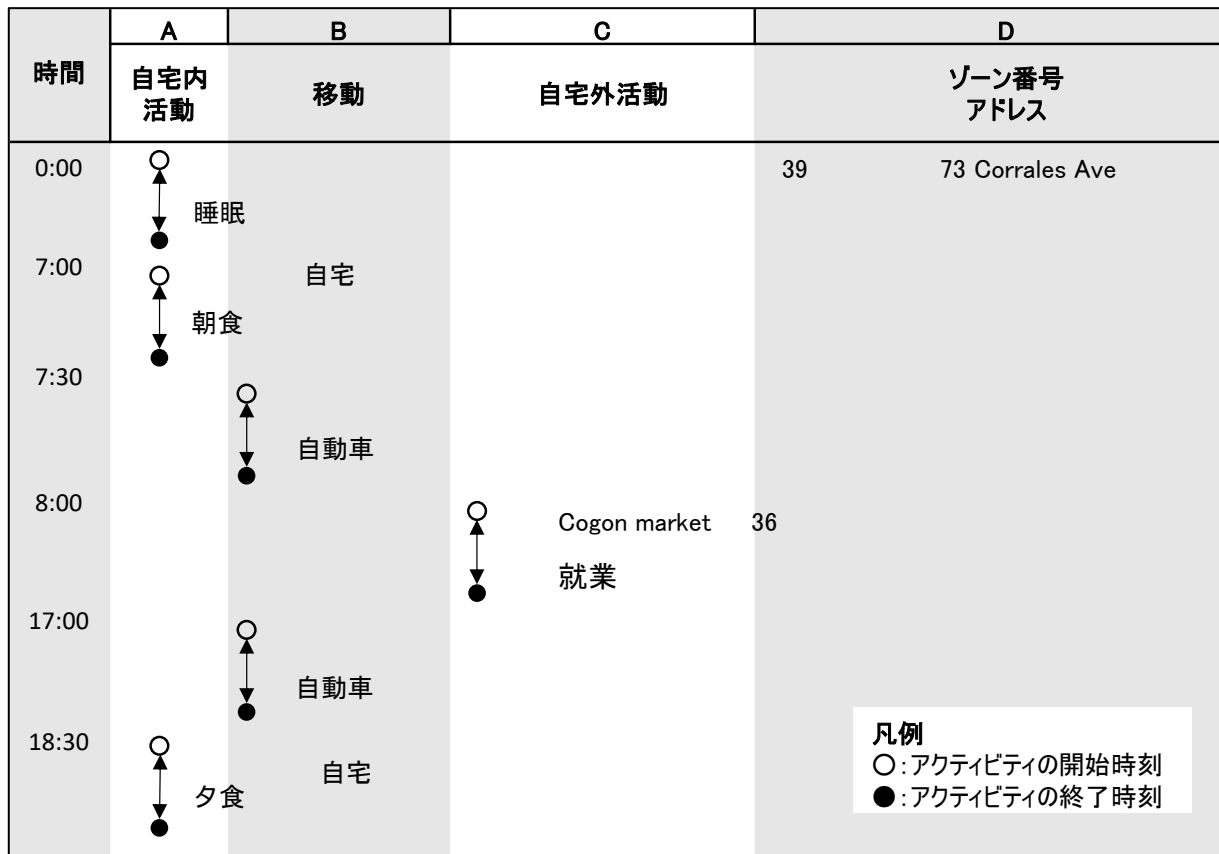


図 3-7 アクティビティダイアリー調査の回答例

アクティビティダイアリー調査の実施にあたっては、個人属性（性別、年齢、自動車保有有無など）およびアクティビティ（活動の開始および終了時間、活動内容、訪問先、交通手段）を把握する。これを定常時および洪水発生時のそれぞれの状況で、個人毎に伺った。その結果を比較することで洪水の発生によって人々がアクティビティをどのように変化させるか分析を行った。また、個人属性とともに世帯の構成状況についても把握することのできる世帯票（世帯構成、世帯の車両保有数および住宅の種類等）を作成し、世帯主に回答をいただいた。表 3-3 にアンケート調査の調査項目を示した。

表 3-3 アクティビティダイアリー調査内容の概要

サンプル数	810 名 (300 世帯)
調査期間	2022 年 7 月
アンケート調査内容 (個人票)	交通行動： ・ 移動手段 ・ 移動時間（移動の開始時間と終了時間） 活動： ・ 活動開始時刻，終了時刻 ・ 活動内容 ・ 活動の訪問先
アンケート調査内容（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

本論文では，伺ったアンケート調査の結果から洪水発生時のアクティビティの変化を，アクティビティパターン（1 日のアクティビティ全体をパターンとして表現したもの）および世帯毎の時空間パスの 2 項目に関して比較分析した．また，交通行動は，目的別の交通機関分担割合，目的別トリップ毎の旅行時間および移動経路に関して比較し，その変化を明らかにした．

3.2.2 洪水の発生がアクティビティに与える影響の分析結果

はじめに，アクティビティダイアリー調査の結果から得られた回答者の社会経済属性データ（個人属性および世帯属性）について表 3-4 にまとめて示した．表から，単身世帯（37.4%）または夫婦世帯（16.8%）および夫婦＋子供世帯（34.3%）がほとんどを占めており，ウボンラチャタニ市のほとんどが戸建て住宅（54.8%）またはアパート（16.6%）およびドミトリー（23.4%）に居住しており，90%以上の世帯が自動車または自動二輪車を所有していることを示している．

表 3-4 回答者の社会経済属性の集計結果

世帯属性	世帯タイプ	割合 (%)
	単身	113 (37.4)
	夫婦	50 (16.8)
	夫婦+子供	103 (34.3)
	夫婦+子供+祖父母	13 (4.4)
	友人と同居	21 (7.1)
	住宅タイプ	割合 (%)
	戸建て住宅	164 (54.8)
	戸建て住宅+ストア	50 (16.6)
	アパート	7 (2.2)
	ドミトリー	70 (23.4)
	商業ビル	7 (2.5)
	世帯の自動車保有	割合 (%)
	0	84 (28.0)
	1	153 (51.0)
2	77 (21.0)	
3	0 (0.0)	
世帯の自動二輪車保有	割合 (%)	
0	25 (8.3)	
1	188 (62.7)	
2	81 (27.0)	
3	6 (2.0)	
個人属性	所得 (THB)	割合 (%)
	無し	114 (14.1)
	1-10,000	108 (13.3)
	10,001-20,000	490 (60.5)
	20,001-30,000	70 (8.6)
	30,001-50,000	22 (2.7)
	50,001-70,000	6 (0.7)
	性別	割合 (%)
	男性	372 (46.0)
	女性	408 (54.0)
	免許保有状況	割合 (%)
	なし	59 (7.3)
	自動車	270 (33.3)
	自動二輪車	127 (15.6)
	自動車+自動二輪車	354 (43.8)
免許保有状況	割合 (%)	
就業者	620 (76.5)	
就学者	96 (11.8)	
非就業者	94 (11.6)	
年齢 (才)	割合 (%)	
0-9	15 (1.9)	
10-19	76 (9.4)	
20-29	245 (30.2)	
30-39	193 (23.8)	
40-49	159 (19.6)	
50-59	93 (11.5)	
60-69	20 (2.5)	
70-79	6 (0.7)	
80-89	1 (0.1)	
90-99	0 (0.0)	

次に、洪水の発生がアクティビティへ与える影響を把握するために、定常時および洪水発生時のアクティビティパターンと時空間パスを比較した。はじめに、回答者を就業者、就学者、非就業者の3区分に分類し、アクティビティパターンを数え上げて、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 3-5）。

表 3-5 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]

※[]内は各分類のアクティビティパターンの割合（単位：%）

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。

次に、個人や世帯毎に定常時から洪水発生時にアクティビティがどの様に変化したかを把握するために、定常時と洪水発生時の時空間パスをGISで作成し、比較した。時空間パスとは、ある個人がいつ、どこで、どのようなアクティビティを行っているかを3次元（時間、場所、目的）で表現

したものである¹⁸⁾。この図から、アクティビティや移動時間等を世帯構成員毎に分析することができると同時に、洪水の発生によるアクティビティの変化を詳細に把握することが可能となる。

世帯タイプ毎に洪水の発生による影響を把握するために、アクティビティダイアリー調査の結果から、①単身、②夫婦、③夫婦+子供、④夫婦+子供+祖父母、⑤友人との同居の計5つのタイプに世帯を分類し、代表的な世帯の時空間パスを作成した。その結果に基づいて、定常時と洪水発生時のアクティビティに関して、比較分析した。

初めに、①単身世帯の代表的な洪水の発生による定常時からのアクティビティの変化について把握するために、作成した時空間パスを例1(図3-8(定常時)と図3-9(洪水発生時))および例2(図3-10(定常時)と図3-11(洪水発生時))に示す。どちらの世帯についても、洪水発生時には、大きく影響を受けない地域に居住していると同時に、訪問先についても自宅周辺であることや浸水深が低いエリアに位置しているため、定常時と比較して大きな変化が生じないと推察された。

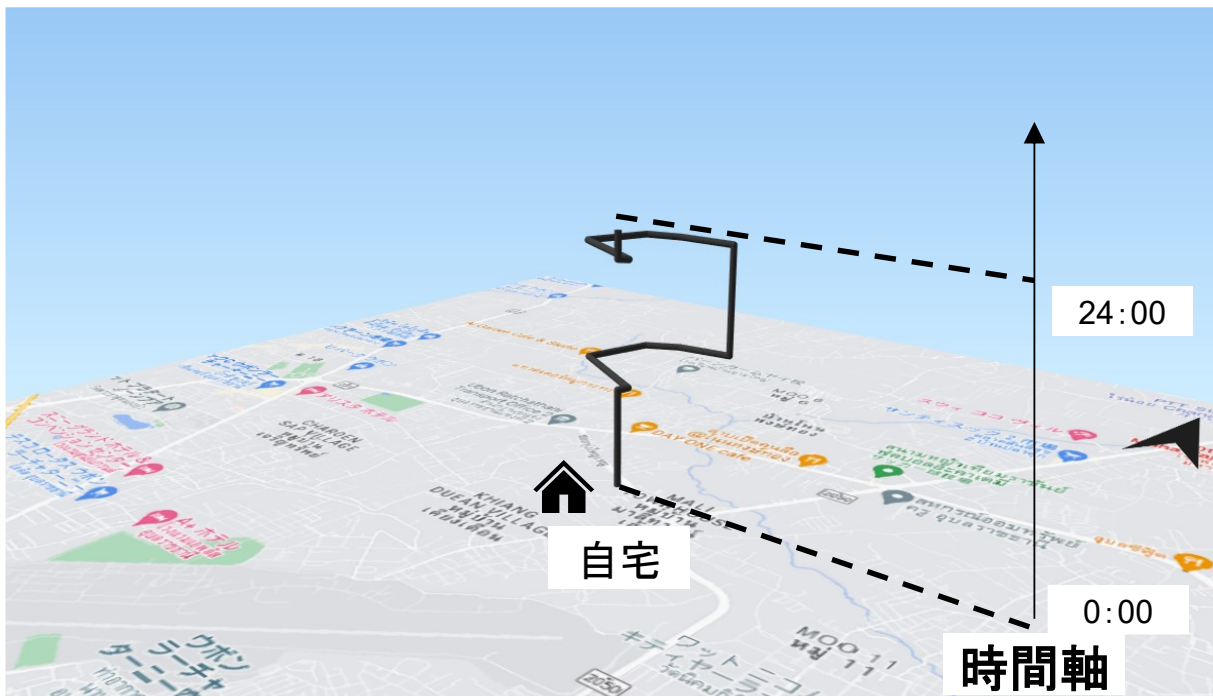


図 3-8 定常時における単身の世帯の時空間パス例 1

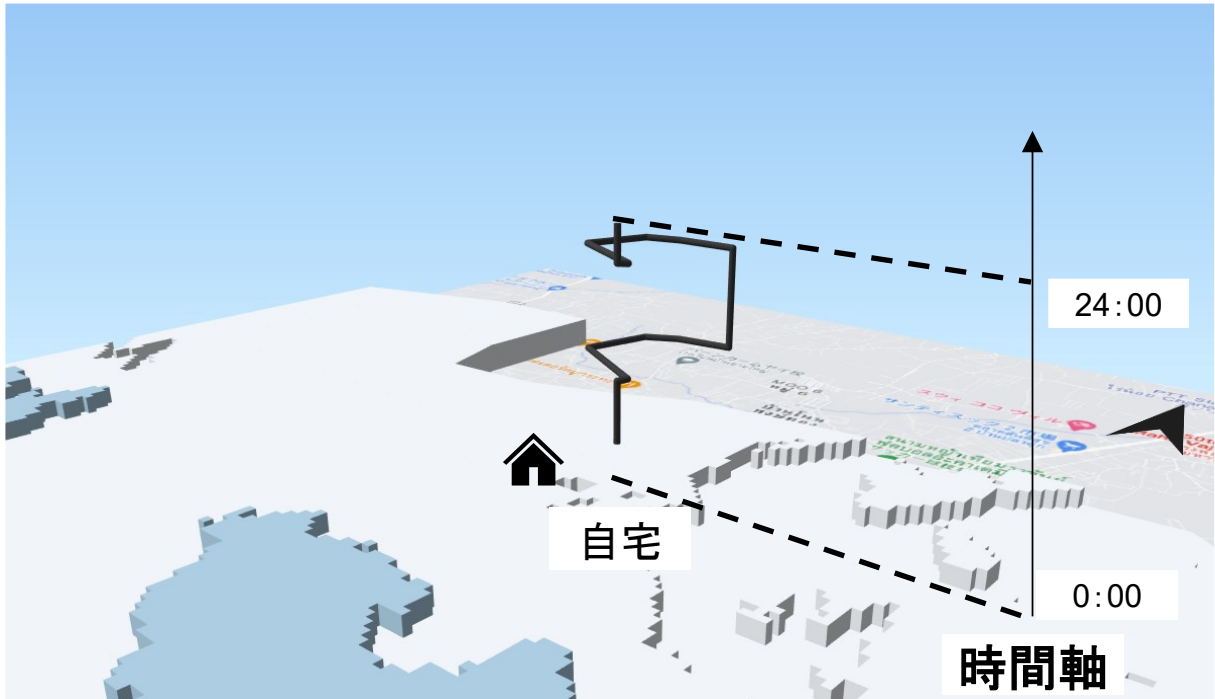


図 3-9 洪水発生時における単身の世帯の時空間パス例 1

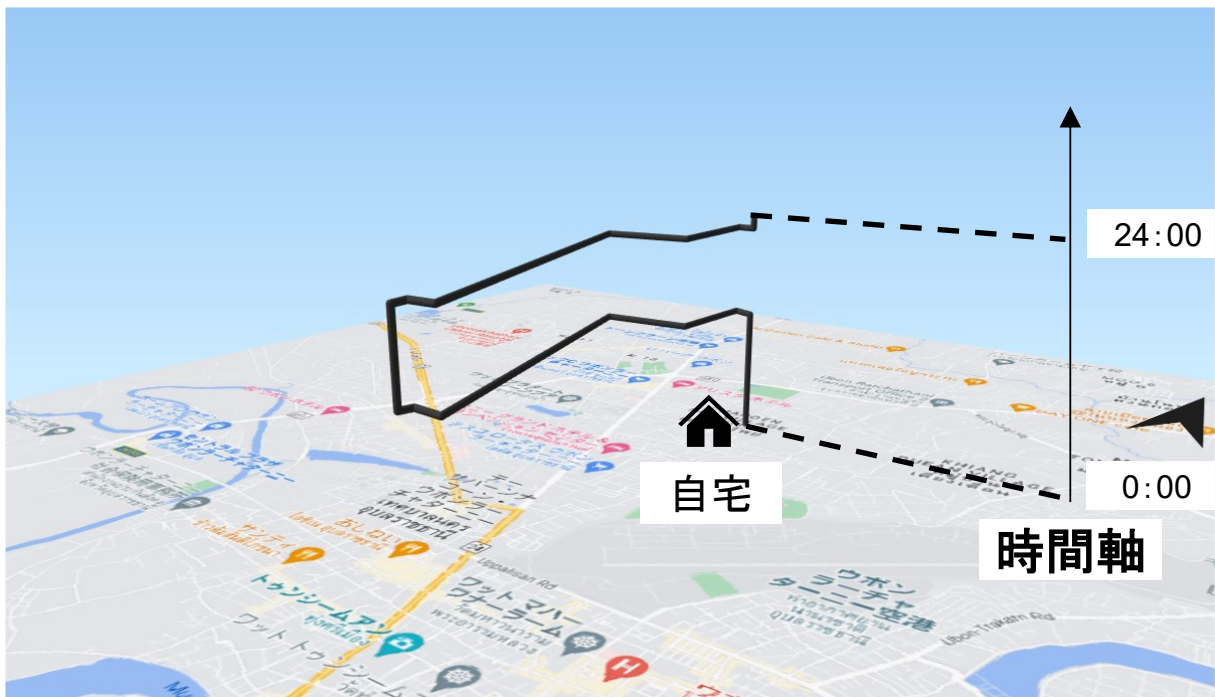


図 3-10 定常時における単身の世帯の時空間パス例 2



図 3-11 洪水発生時における単身の世帯の時空間パス例 2

次に、②夫婦世帯の代表的な洪水の発生による定常時からのアクティビティの変化について把握するために作成した時空間パスを例 1 (図 3-12 (定常時) と図 3-13 (洪水発生時)) および例 2 (図 3-14 (定常時) と図 3-15 (洪水発生時)) に示す. どちらの世帯についても, 定常時と洪水発生時においてムン川から離れたところに自宅が位置している. そのため, 定常時と比べて, アクティビティパターンについては変化していないが, 一部の移動経路については, 洪水の発生によって, 変化していることが図から読み取ることができる. また, 洪水発生時には自宅から職場まで移動時間が伸びるため定常時よりも出発時刻を早めている.

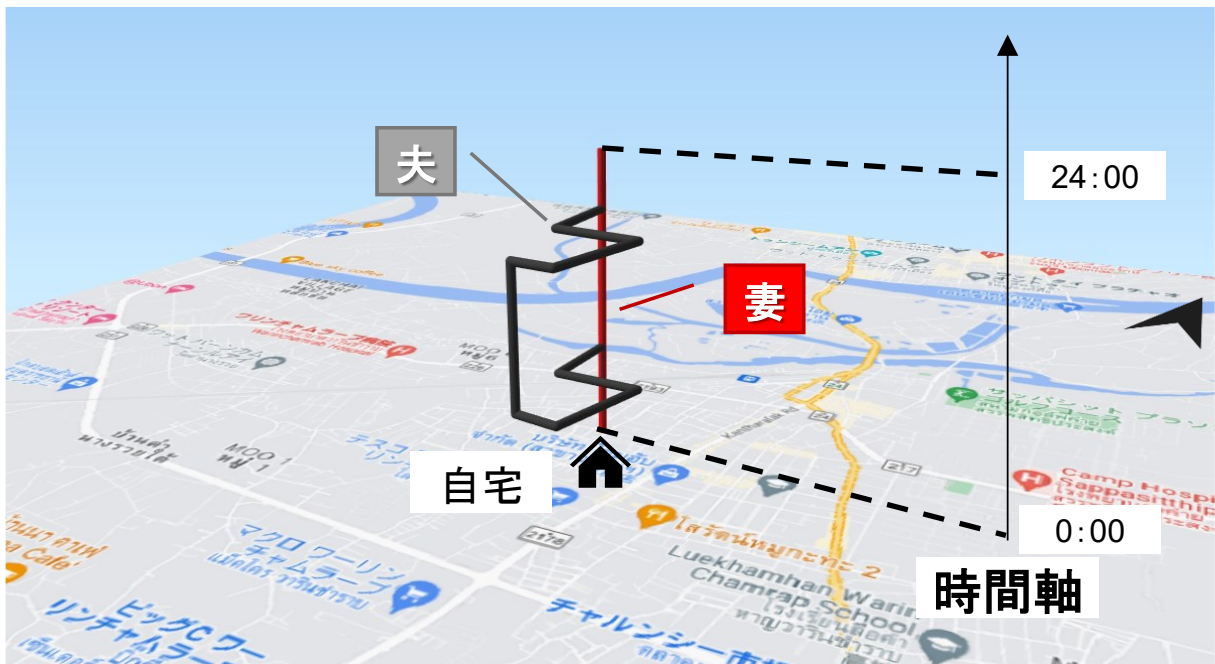


図 3-12 定常時における夫婦世帯の時空間パス例 1

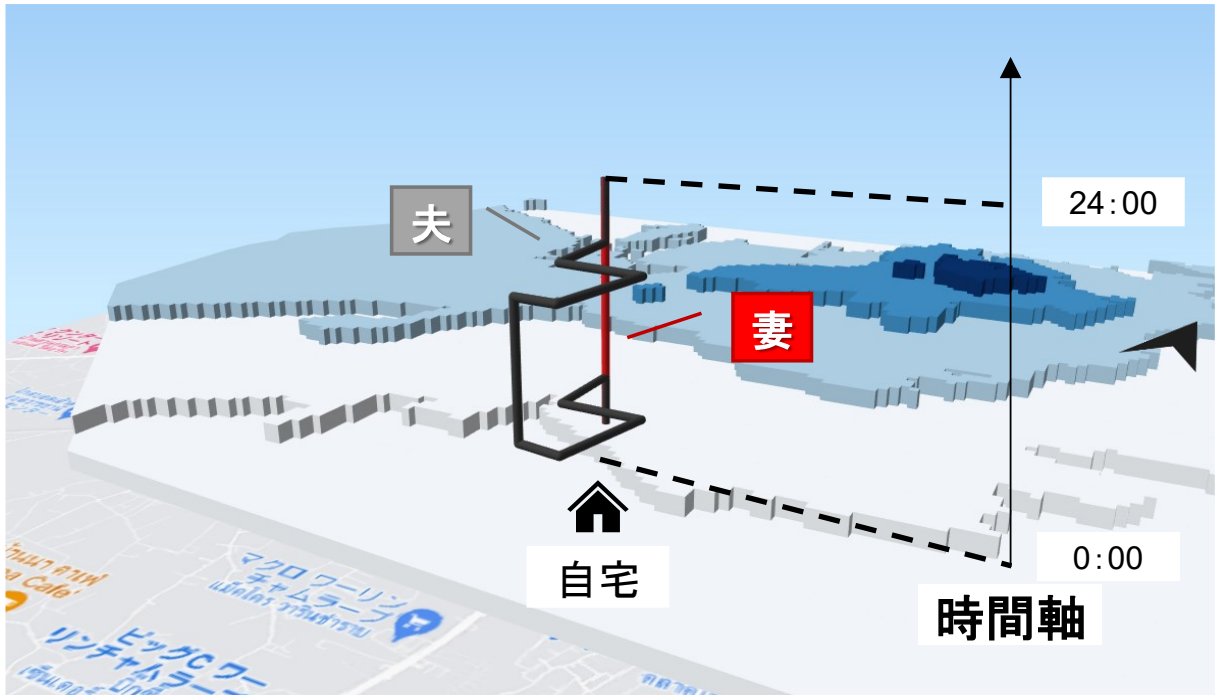


図 3-13 洪水発生時における夫婦の世帯の時空間パス例 1



図 3-14 定常時における夫婦世帯の時空間パス例 2

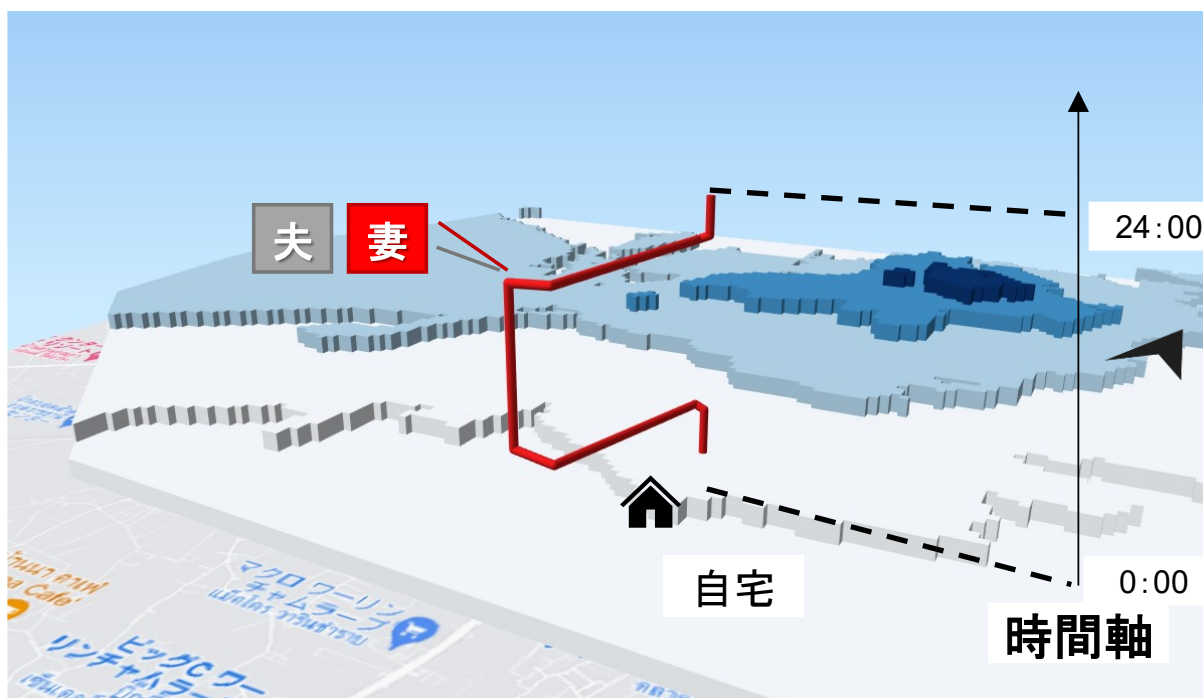


図 3-15 洪水発生時における夫婦の世帯の時空間パス例 2

次に、③夫婦+子供の世帯の代表的な洪水の発生による定常時からのアクティビティの変化について把握するために、作成した時空間パスを例 1 (図 3-16 (定常時) と図 3-17 (洪水発生時)) および例 2 (図 3-18 (定常時) と図 3-19 (洪水発生時)) に示す。例 1 (図 3-16 および図 3-17) については、子供(就学者)は、アクティビティパターンおよび移動経路ともに洪水発生時にも変更されておらず、登下校のみであるために、大きな影響を受けなかったと推察される。一方で、妻(非就業者)は洪水の発生によってアクティビティを夫(就業者)に任せ、一日中自宅に滞在するようになっている。さらに夫(就業者)については、アクティビティパターン自体は変化していないが、移動経路が変更されている。また、例 2 (図 3-18 と図 3-19) についても夫については、洪水発生時においても定常時と比較して、同じアクティビティパターンおよび移動経路を利用していることを示した。一方で、妻については、定常時には浸水深が非常に深い地域を訪問先として選択していたが、洪水発生時には、一日中自宅に滞在するパターンに変更している。なお、子供については、定常時と洪水発生時ともに自宅に滞在するパターンとなっている。



図 3-16 定常時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 1

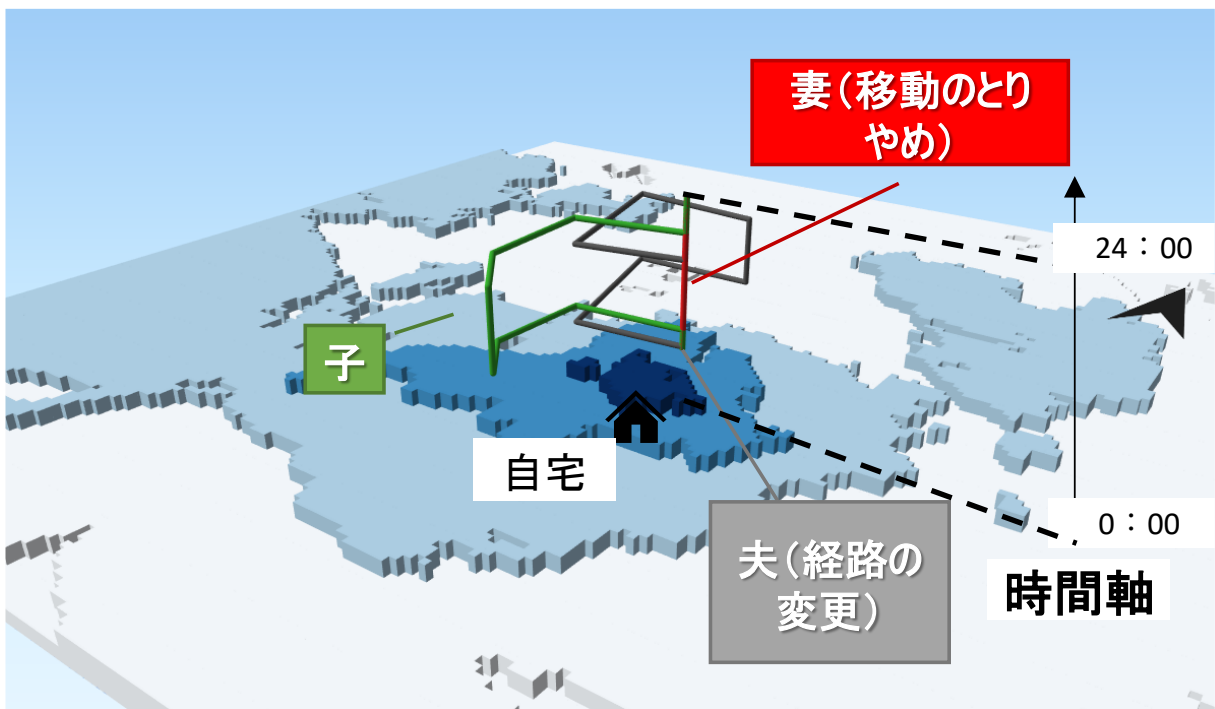


図 3-17 洪水発生時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 1



図 3-18 定常時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 2

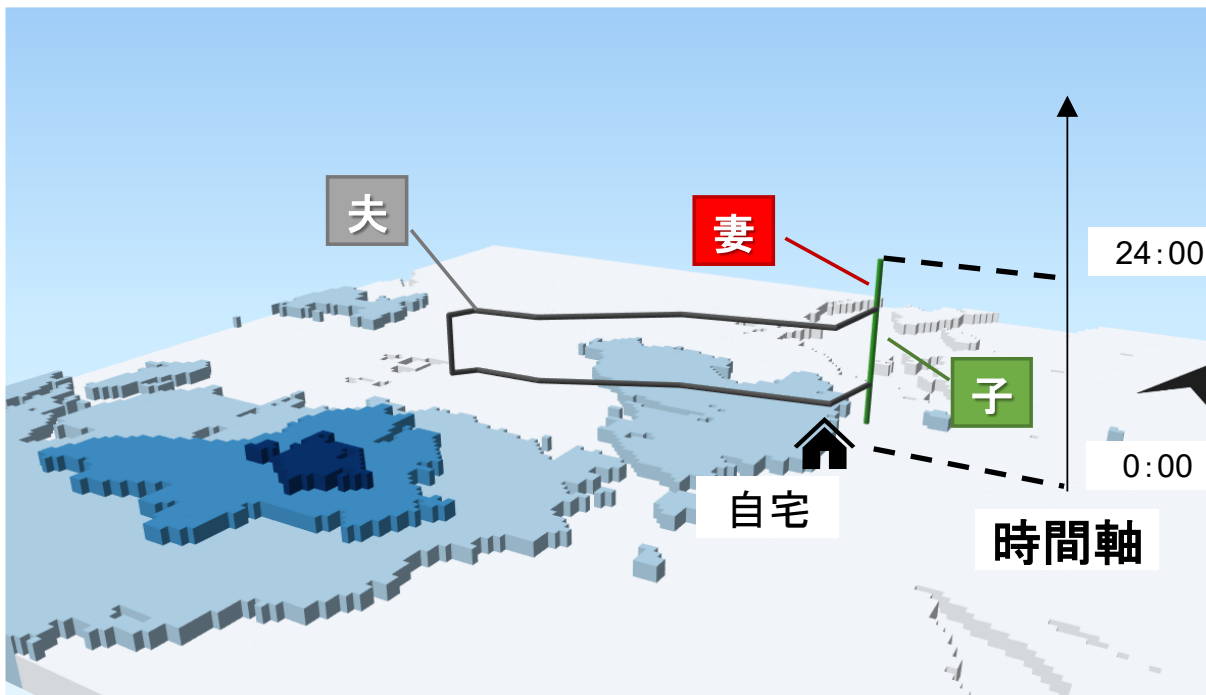


図 3-19 洪水発生時における夫婦+子供の世帯の時空間パス例 2

次に、④夫婦+子供+祖父母の代表的な洪水の発生による定常時からのアクティビティの変化について把握するために、作成した時空間パスを例 1 (図 3-20 (定常時) と図 3-21 (洪水発生時)) および例 2 (図 3-22 (定常時) と図 3-23 (洪水発生時)) に示す。例 1 に示す世帯については、ウボンラチャタニ市の北部に位置しているため、洪水が発生した際に大きく影響がほとんど生じな

ったと推察される。したがって、洪水発生時においても定常時とアクティビティパターンや移動経路の変更が起きていなかったと想定される。例 2 に示す世帯についても例 1 で示した世帯と同様に、都市の北部に位置しているため、大きな影響を受けなかったことを示した。



図 3-20 定常時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 1

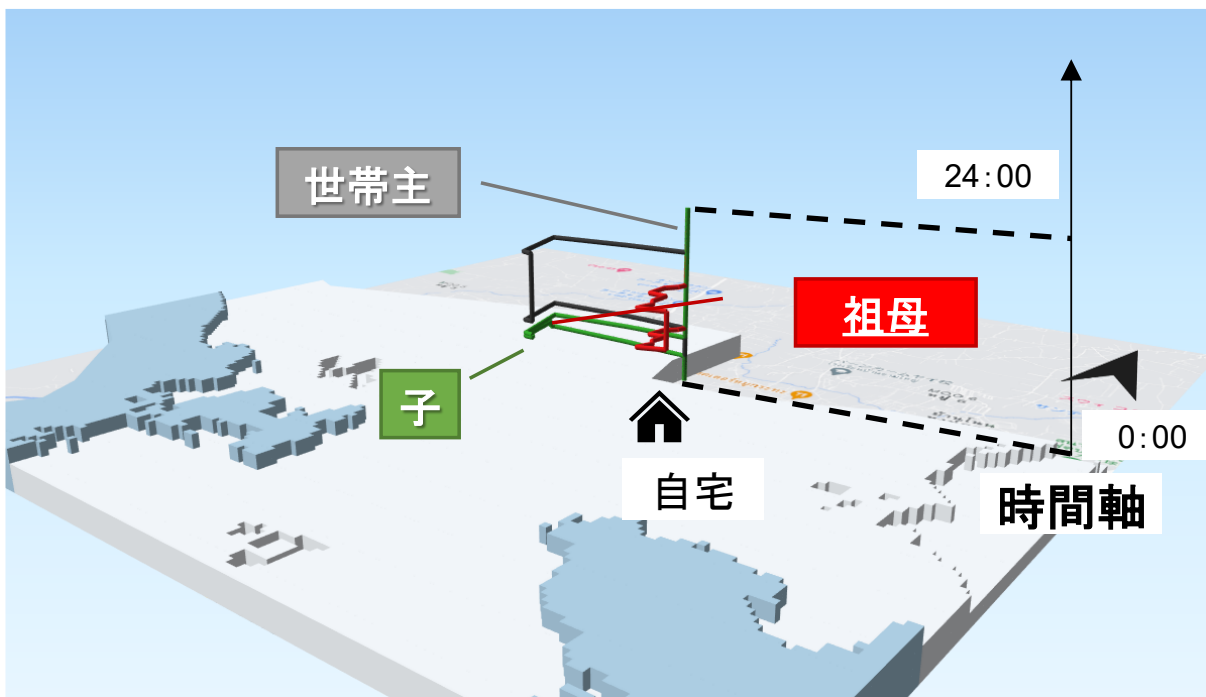


図 3-21 洪水発生時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 1

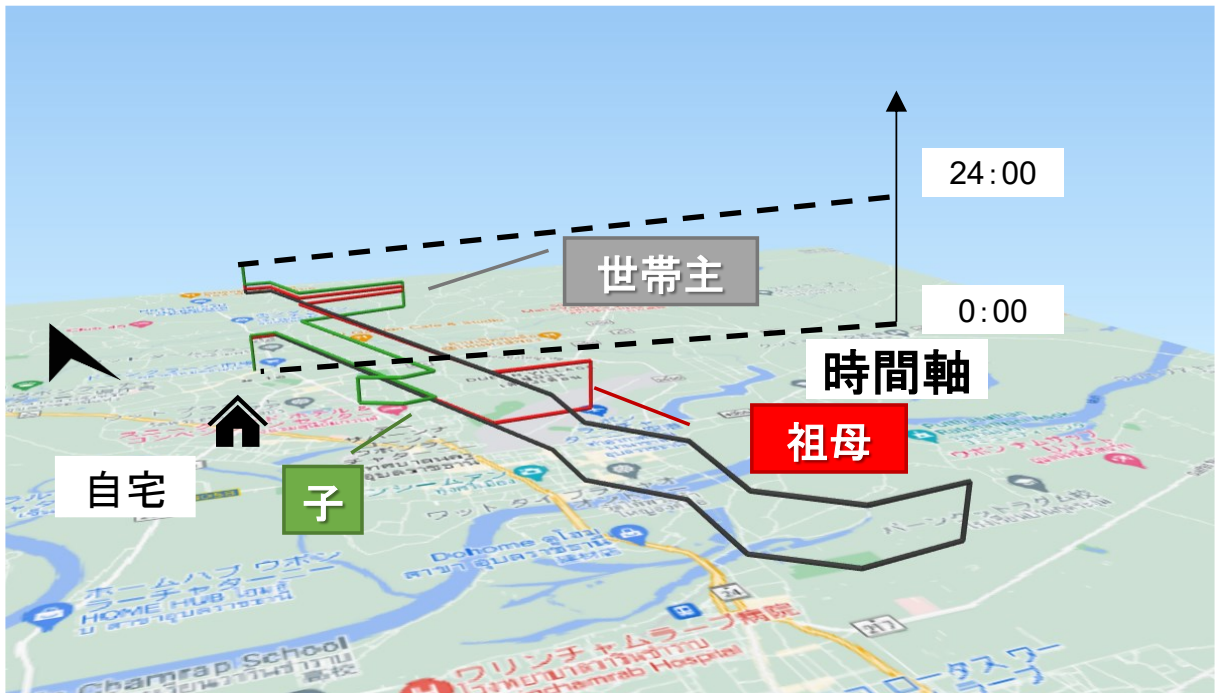


図 3-22 定常時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 2

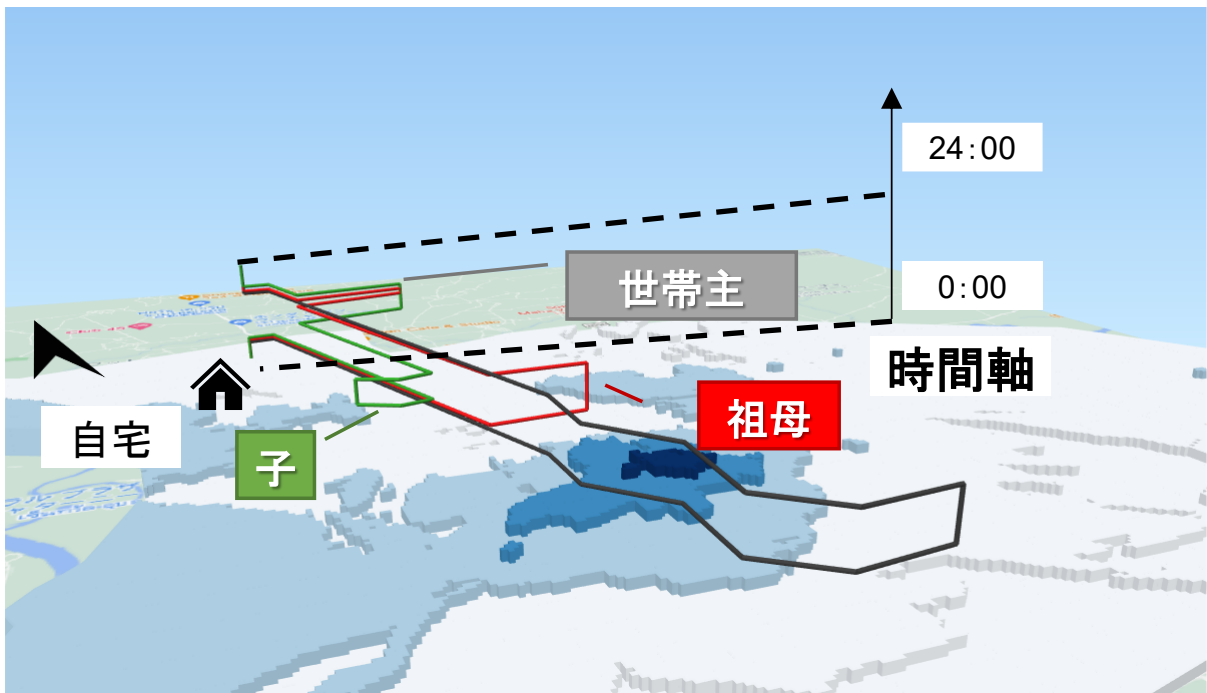


図 3-23 洪水発生時における夫婦+子供+祖父母の世帯の時空間パス例 2

最後に、⑤友人との同居の代表的な洪水の発生による定常時からのアクティビティの変化について把握するために、作成した時空間パスを例 1 (図 3-24 (定常時) と図 3-25 (洪水発生時)) および例 2 (図 3-26 (定常時) と図 3-27 (洪水発生時)) に示す。例 1 (図 3-24 と図 3-25) については、洪水発生時においてはすべての世帯構成員が定常時のアクティビティをとりやめて、1 日中自

宅に滞在するアクティビティパターンに変更されている。これは、例1は、市内中央を流れるムン川と非常に近い地域に位置しているため、外出をすることが困難になった。したがって、アクティビティパターンが変更されたことが想定される。

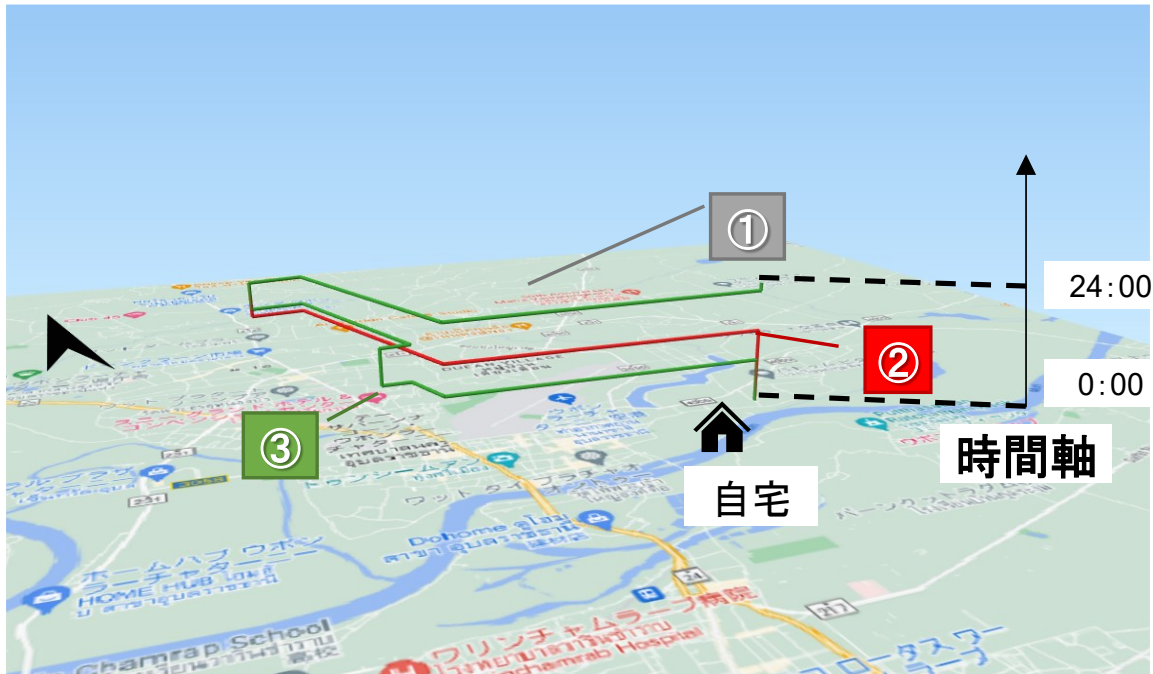


図 3-24 定常時における友人と同居世帯の時空間パス例 1

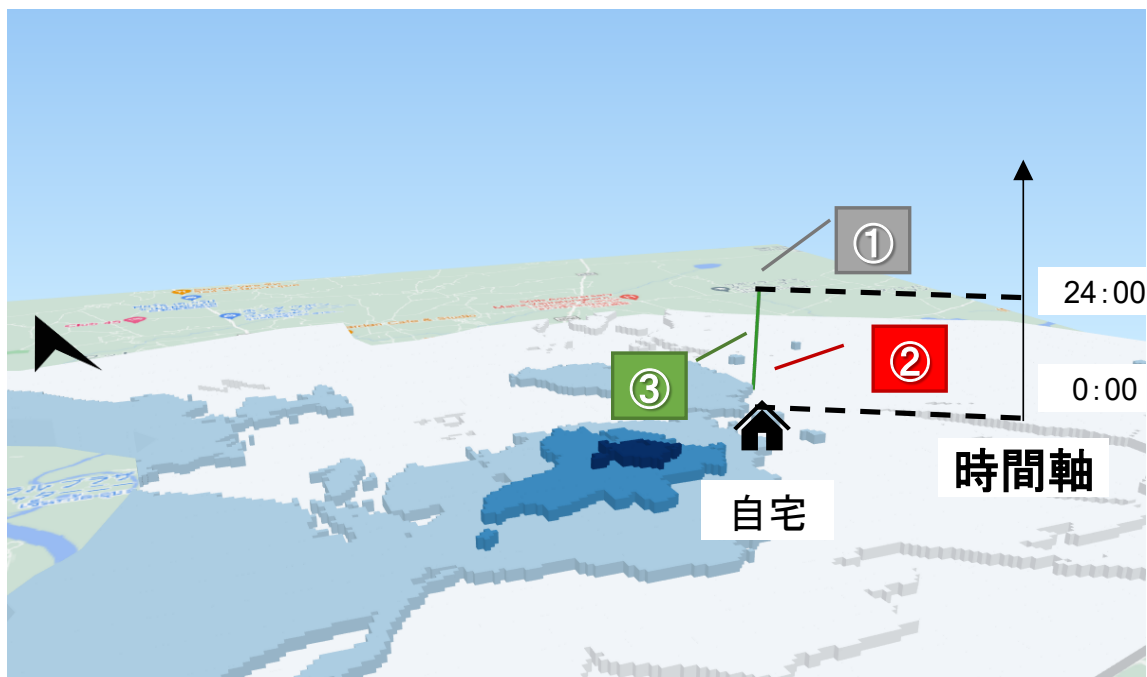


図 3-25 洪水発生時における友人と同居世帯の時空間パス例 1

一方で、例2（図 3-26 と図 3-27）については、同居人②と③については、洪水が発生しても大きな影響を受けない市内中心部の訪問先を選択しているため、定常時と洪水発生時を比較すると大

きな差がない。一方で、同居人①については、定常時において、ムン川を渡って対岸を訪問先としている。そのため、洪水発生時においては、一日中自宅に滞在するパターンに変更されている。

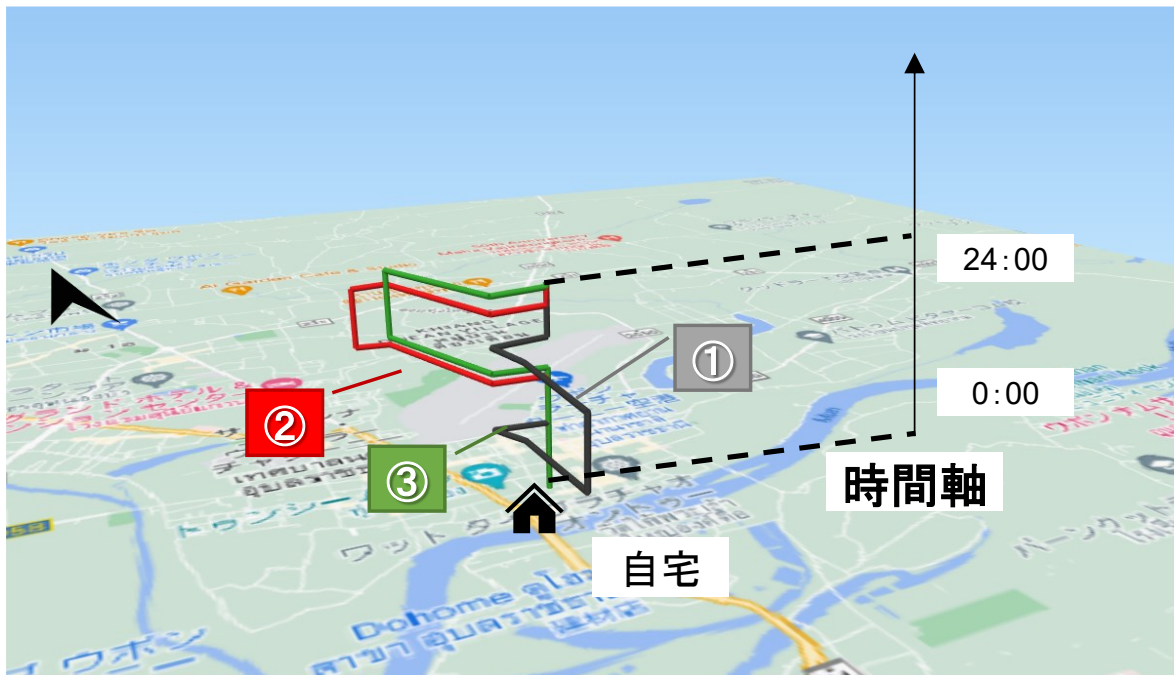


図 3-26 定常時における友人と同居世帯の時空間パス例 2

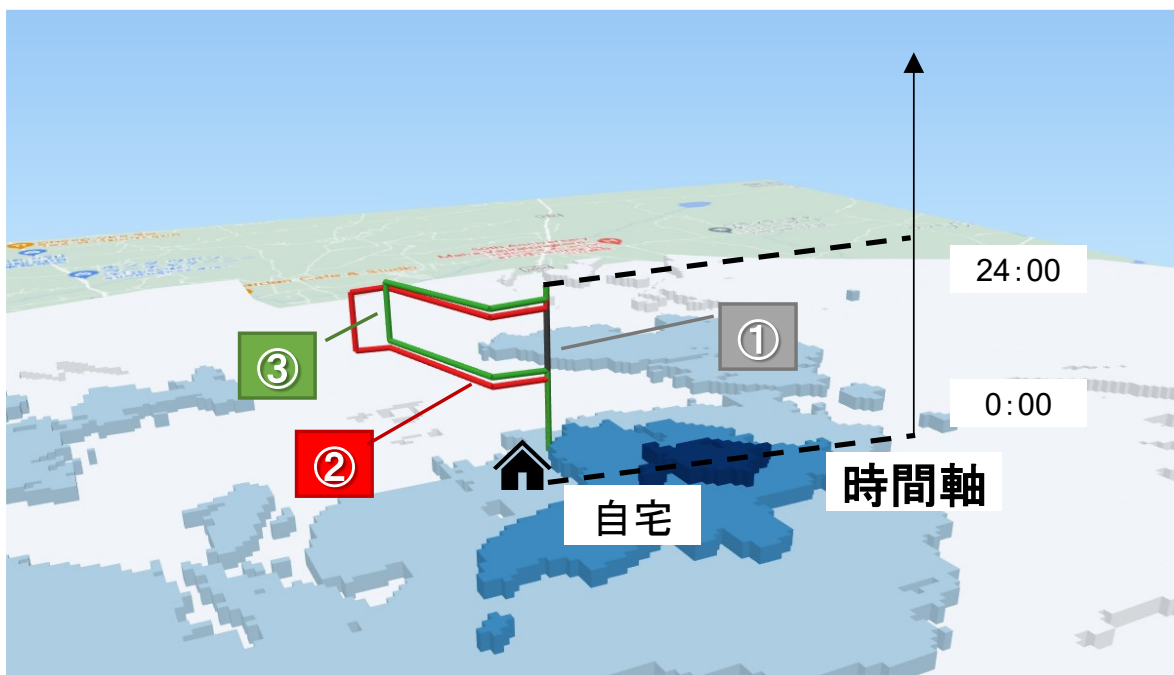


図 3-27 洪水発生時における友人と同居世帯の時空間パス例 2

3.2.3 洪水の発生に伴う交通行動の変化の分析結果

洪水の発生による交通行動の変化を把握するために、定常時と洪水発生時における移動目的別の交通機関分担割合、旅行時間および移動経路の3項目に関して比較した。はじめに、目的別（通勤

／通学，私事，買い物，その他）の定常時と洪水発生時における交通機関分担割合を図 3-28 に示した．結果として，いずれの目的においても自動二輪車が約 40%，自動車が 30～40%，自動車（乗車）が 10～15%と同様の傾向であり，ほとんどの住民が定常時と洪水発生時のいずれの状況についても，自動車あるいは自動二輪車で移動している．洪水発生時にも定常時から交通機関分担割合が変化しなかった理由として，ウボンラチャタニ市では，公共交通機関としてソンテウが導入されているが，そのネットワークも非常に限定的なものとなっており，都市全体をカバーできていない．そのため，目的地に向かうための代替交通手段として選択することが困難であり，代替交通手段として利用できる交通機関が存在しない．

したがって，洪水発生時においても定常時と大きく交通機関選択の割合が変化せず，洪水が発生した際に，モビリティが大幅に低下することで甚大な影響を受ける可能性がある．

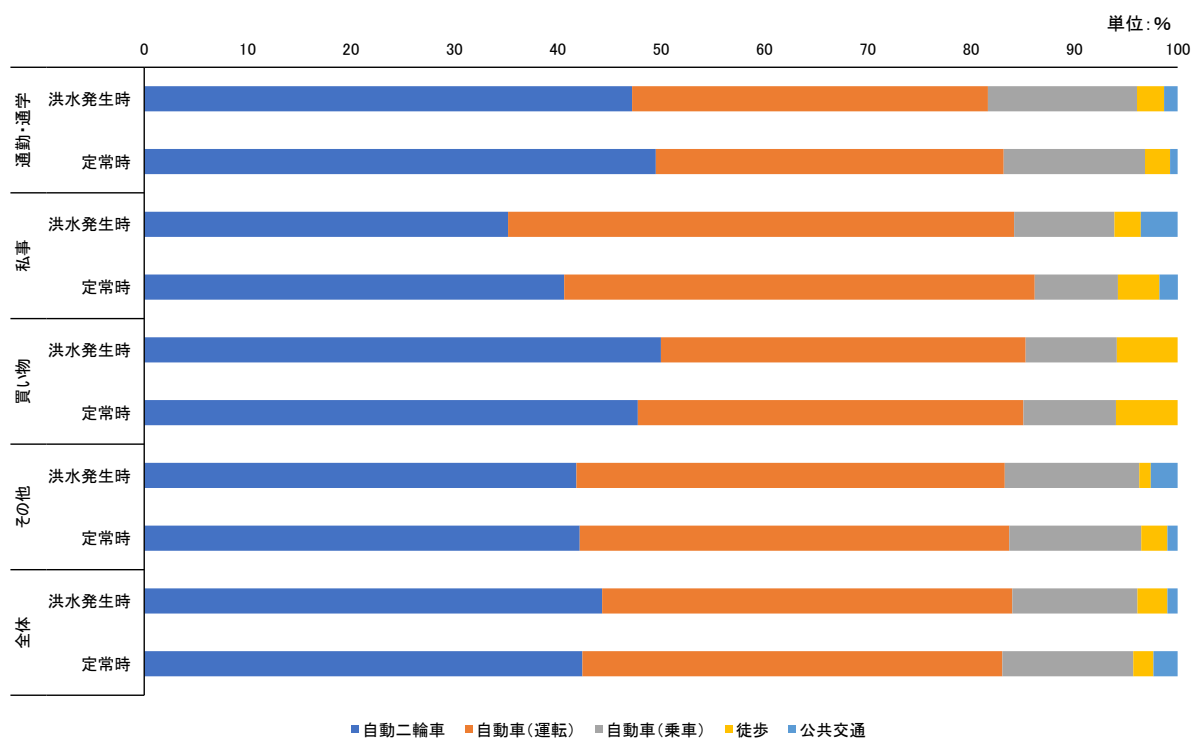


図 3-28 目的別の定常時と洪水発生時の交通機関分担割合の比較

次に，定常時と洪水発生時の旅行時間別のトリップ数の割合を比較した（図 3-29）．平均旅行時間は，定常時：35.4 分，洪水発生時：56.4 分となり，洪水発生時には 21 分程度増加している．洪水が発生した際に旅行時間が増加した理由としては，定常時に利用していた移動経路が洪水発生時に冠水することで，道路区間の寸断や速度低下が発生し，その結果として移動経路の変更や移動時間が通常よりも要したことが挙げられる．また，図 3-28 に示すように，代替交通手段が存在しないため，洪水発生時においても定常時と同じ交通手段を利用することも 1 つの要因であると考えられる．特に，定常時には，約 65%が 30 分以内に移動可能であるのに対して，洪水発生時には 45%程度まで低下しており，都市のモビリティが大幅に低下している．これによって，人々の交通行動に大きく影響を及ぼしていることを示した．

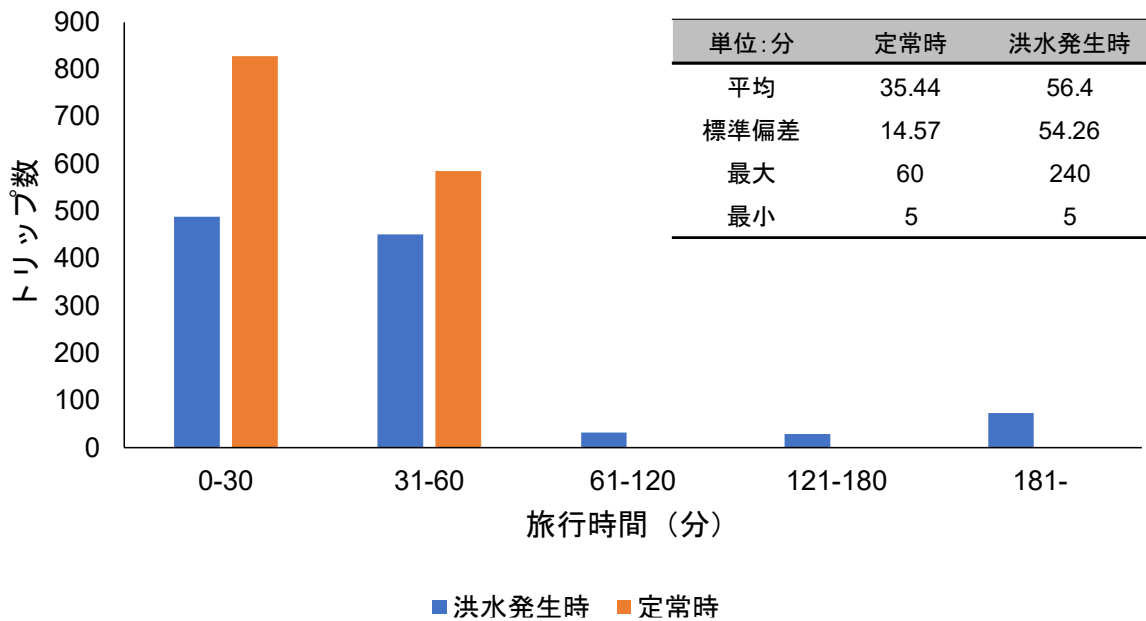


図 3-29 旅行時間別のトリップ数の割合

最後に、回答者の定常時と洪水発生時の経路選択の代表的な例を図 3-30 および図 3-31 に示す。図 3-30 では、回答者は定常時においては、都市中央にかかる橋を含む都市の中央の道路区間を利用し、移動している。回答者が定常時に利用している都市の中央にかかる橋は、2019 年の洪水発生時には寸断したことが記録されている。そのため、回答者は嵩上げされた西側バイパスを迂回路として、移動している。

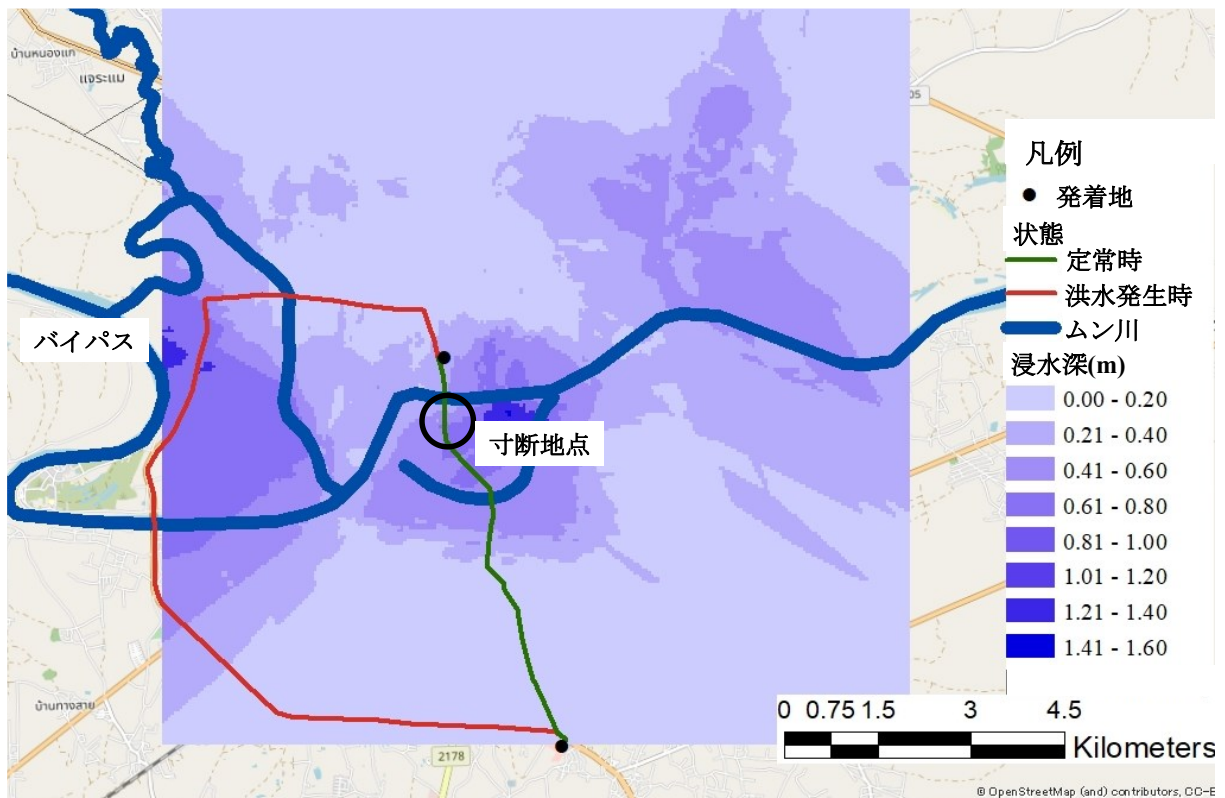


図 3-30 定常時と洪水発生時の移動経路の比較 1

また、図 3-31 も同様に定常時においては、都市の中央の橋（右側）を利用している。一方で、洪水発生時において冠水が発生し、道路区間が寸断することで通行不可能となる。そのため、2002年の洪水発生後に嵩上げされた東側バイパスを迂回し、移動している。

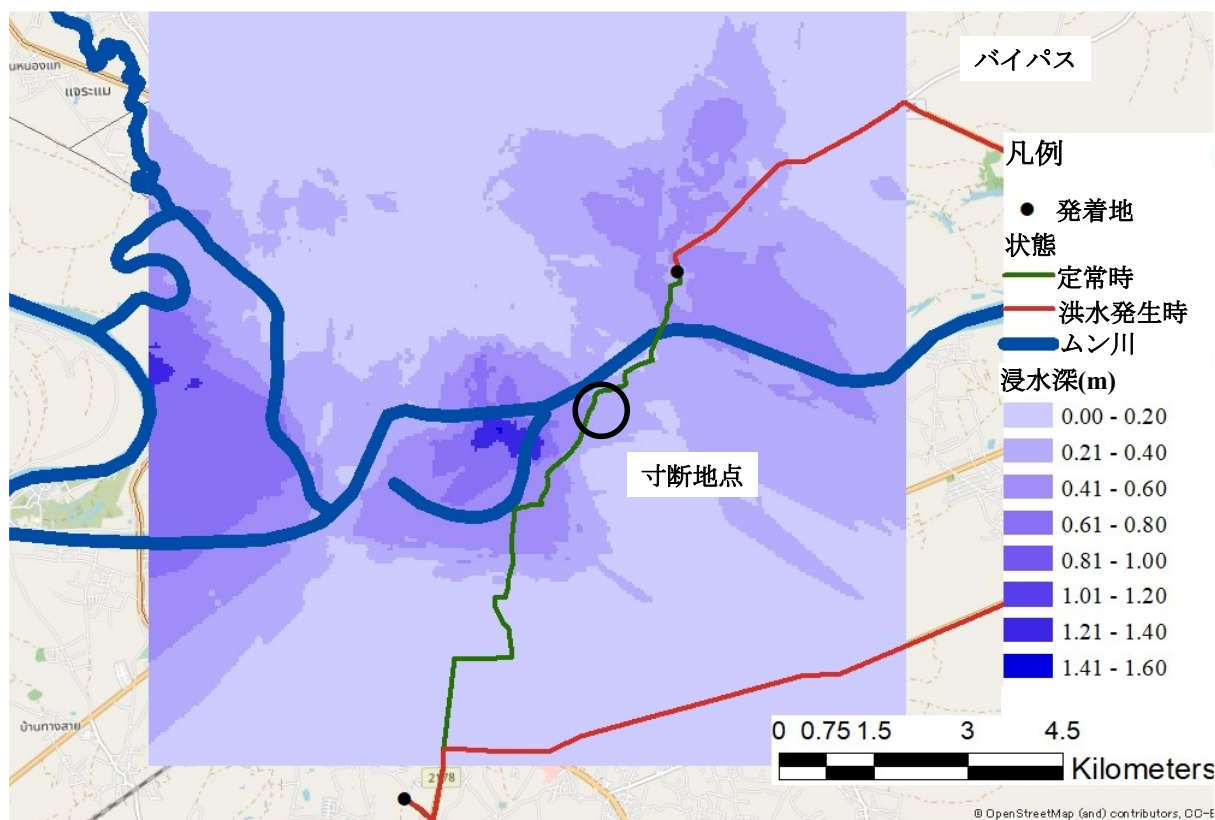


図 3-31 定常時と洪水発生時の移動経路の比較 2

3.3 洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けた調査の概要とその結果

3.3.1 洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けたアンケート調査の概要

洪水の発生による移転の経験の有無やその理由および移転行動の意思決定に関係する要因を把握するために、対象都市の合計 100 世帯を対象としてアンケート調査を実施した。本アンケート調査は、2つのパートで構成されており、パート1では、移転の実施有無とその理由等に関して尋ねた。移転を実施した経験があると回答した住民については、移転の理由、移転前後の住居のタイプ、移転に際する支援の有無に関して伺った。また、移転をしなかった世帯を含めた全ての回答者に対して、過去の洪水の発生による家財の損害状況と最大浸水深、洪水の発生状況等を得るために利用した情報伝達手段、洪水の発生による被害の認知状況および居住地選択を行う際の重要な項目等を設定し、ご回答をいただいた。この中で、移転の実施有無とその理由については、どの程度の人々が移転を実施できるのは撤退策を検討していく上で、重要となる。そして、居住地を選択する際に重要な項目として、浸水リスクの回避や土地価格、アクセシビリティ等の 15 項目を設け、各項目の重要度を 1-5 の 5 段階の中から選択し、ご回答いただいた。

また、パート2では、世帯属性について伺い、年収、世帯構成、職業、年代割合、家庭で所有している車種、居住エリア（洪水前後または現在居住しているゾーン）を選択式で回答していただい

た. 具体的な設問の内容と調査概要は以下に示す通りである (表 3-6).

表 3-6 洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けたアンケート調査の概要

サンプル数	100 世帯	
調査期間	2022 年 9～10 月	
第 1 部	<ul style="list-style-type: none"> ・ 移転経験の有無とその理由 ・ 移転前後の住居タイプ ・ 居住地選択時の重要な項目 ○ 洪水の発生による被害 ○ 職場やスーパー等へのアクセス ○ 土地価格等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 洪水の発生による家財の損害の程度 ・ 洪水発生時における最大浸水深 ・ 移転に際しての地方政府や NGO 等からの支援の有無
第 2 部	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 ・ 自動車保有有無 	

3.3.2 洪水の発生と移転行動の関係性の把握に向けたアンケート調査の結果

はじめに, 回答者の移転経験の有無に関して伺った結果および移転を実施した理由について表 3-7 にまとめ, 示した. アンケートの回答をいただいた 100 世帯うち 12 世帯で移転の経験があり, 移転をした理由としては, 日常の移動が難しいまたは洪水の影響が深刻であるということが挙げられた. 一方で, 移転の経験がないと回答した住民は, 88 世帯あり, 移転をしなかった理由として, 洪水の被害があまり生じない, 移転するための土地がない, 資金に余裕がない等が挙げられていた.

表 3-7 移転の経験の有無とその理由

移転の経験あり	移転の経験なし
12	88
理由	理由
日常の移動が難しくなるため 洪水の影響が深刻	洪水の発生による浸水深が低い 移転するためのスペースがない 資金に余裕がない

また, 居住地を選択する際に重視する項目に関して, 重要度 1 から 5 (5 段階) の中から 15 項目に対して, 選択された割合をまとめた結果を図 3-32 に示す. 結果として, 70%以上の回答者が最も重要視する項目 (重要度 5) とした項目が 4 つ (①土地価格・住宅価格, ②洪水の被害, ③職場までのアクセス, ④学校までのアクセス) あった. これは, 第 2 章で述べた今井ら¹⁹⁾が富山市で実施したアンケート調査と同様の傾向であるが, ウボンラチャタニ市の場合には洪水の被害の重要度を高く選択している人が非常に多い. この結果から, 特に, 居住地の選択時に就業地や就学地へのアクセシビリティ, 土地価格だけでなく, 洪水の被害が非常に大きく寄与していることを示した.

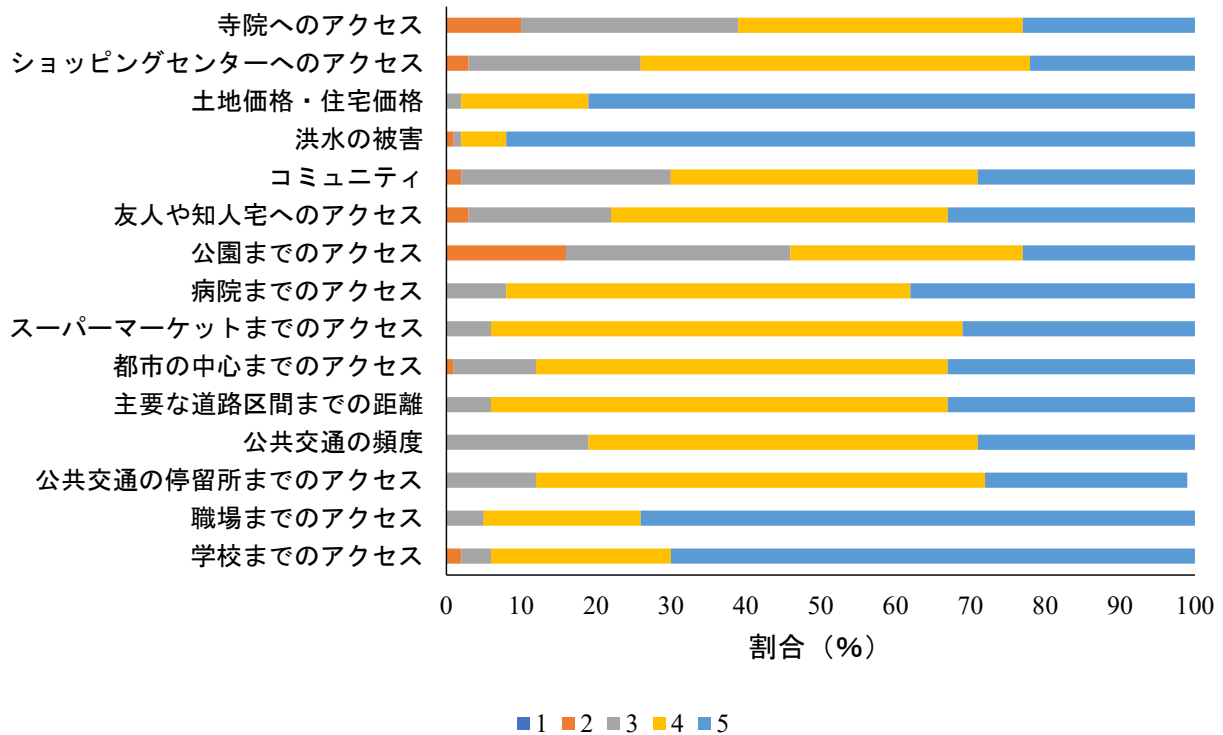


図 3-32 居住地選択の際に重視する項目

次に、回答者の洪水の発生に関して情報を得るために利用する情報伝達手段、洪水が発生した際の最大浸水深および家財の被害の割合についてまとめた結果を表 3-8 に示す。情報伝達手段として、テレビまたは SNS (ソーシャルネットワーキングサービス) が 7 割以上の住民が利用しており、これらの情報伝達手段を通じて、洪水の発生等に関する情報を提供することが重要である。次に、最大浸水深については 70% の回答者が、2.00m 以下となっており、洪水が発生した際の浸水深は比較的低くなっている。一方で、家財の被害の割合は、回答者のうち 85% 程度が 41~80% の被害を受けており、洪水の発生によって多くの住民が影響を受けていることを示した。

表 3-8 洪水の発生に関する情報伝達手段と最大浸水深および家財への被害状況

情報の入手方法 (複数回答可)	回答数	浸水深(単位:m)	回答数	家財の被害(単位:%)	回答数
テレビ	71	0.00-0.50	23	被害なし	0
ラジオ	19	0.51-1.00	20	1-20	0
ウェブサイト	8	1.01-2.00	26	21-40	4
SNS	87	2.01-3.00	9	41-60	28
新聞	10	3.01-5.00	10	61-80	56
コミュニティ	53	5.00-	12	81-100	12
隣人	47				

このアンケート調査の結果に基づいて、ロジスティック回帰モデルを適用し、移転を実施する際
 の意思決定に寄与する要因を分析する。ロジスティック回帰モデルを適用する前に変数間の多重共
 線性を避けるために、ピアソンの相関係数を算出した。本論文では、表 3-9 に示すように、従属変
 数（移転有無）と独立変数（洪水の発生による家財への被害，最大浸水深，子供の有無，老齢人口
 の有無および世帯所得）の間のピアソンの相関係数を算出した。

表 3-9 移転行動モデルの変数間のピアソンの相関係数の算出結果

	家財への被害	最大浸水深	子供の有無	老人の有無	所得
家財への被害	1				
最大浸水深	-0.406	1			
子供の有無	0.015	-0.105	1		
老人の有無	-0.267	0.247	0.094	1	
所得	0.195	-0.082	0.125	-0.089	1

結果として、洪水の発生による家財への被害と洪水発生時における経験した最大浸水深を除くそ
 れぞれの変数の相関係数が 0.3 以下となり、個々の変数間には相関関係がないことを確認した。こ
 の結果から、洪水の発生による家財への被害と最大浸水深を独立変数として導入した場合には多重
 共線性が発生し、正しくパラメータを推定できない可能性がある。そのため、洪水の発生による家
 財への被害を除く「最大浸水深」，「子供・高齢者の有無」，「収入」（ダミー変数は「子供・高齢者の
 有無」）をロジスティック回帰モデルの独立変数として選択し、パラメータを推定した（表 3-10）。

表 3-10 ロジスティック回帰モデルを用いた移転行動モデルの推計結果

	推定値	標準偏差	z値	p値
切片	-2.383	0.649	-3.67	0.000***
最大浸水深	0.426	0.165	2.584	0.009**
子供の有無	-0.885	0.635	-1.394	0.163
老人の有無	0.395	0.556	0.711	0.477
世帯収入	0.907	0.634	1.431	0.152
サンプル数	100			
AIC	116.6			
Log likelihood	-48.67			
的中率	73.0%			
McFadden's R ²	0.151			

結果として、移転行動は過去の洪水が発生した際に、経験した洪水発生時の最大浸水深，世帯内
 の子供の有無および世帯所得によって影響を受けることを示した。また、的中率は 73.0%，マック
 ファーデンの疑似決定係数（McFadden's R²）は 0.151 となった。この結果から、経験した最大浸水

深が高く、世帯収入多い場合に移転行動をとりやすく、子供がいる場合には移転行動をとりにくい傾向があることを明らかにした。

3.4 第3章まとめ

本章では、東南アジア諸国における各国の洪水の発生状況および人口規模と人口密度に関して俯瞰した上で、頻繁に洪水が発生し、甚大な被害が生じている代表例として、タイ・ウボンラチャタニ市を本論文の対象都市として選定した。さらに、ウボンラチャタニ市における洪水の発生による被害の状況および適応策の実施状況に関して整理した。また、現在の同都市における交通計画の策定状況や交通状況について示した。さらに、洪水の発生が人々のアクティビティにどのような影響を及ぼしているのか、また、移転行動の判断へ与える影響を分析するために、同様にウボンラチャタニ市の住民を対象として、アンケート調査を実施した。

アクティビティに関しては、洪水の発生によって変化する人々のアクティビティを把握するために、個人の1日のアクティビティを把握するアクティビティダイアリー調査を実施した。その結果に基づいて1日の自宅内外の活動をパターンとして表現するアクティビティパターンとして把握し、定常時と洪水発生時のパターン数を就業者、就学者、非就業者毎に集計した上でその割合を算出し、比較分析した。

結果として、就業者：就業のみをするパターン数が減少する一方で、就業時の休憩中に買い物をするパターン数が増加し、非就業者：1日中自宅に滞在する（移動しない）パターン数が増加することを示した。この結果から、個人属性によって、洪水発生時におけるアクティビティは大きく異なることを示した。また、回答者の世帯を世帯構成員の属性に基づいて5つの世帯タイプに分類した上で、それぞれの世帯タイプの代表的な世帯の時空間パスを比較した。結果として、世帯タイプ毎に、洪水発生時におけるアクティビティの変化は世帯タイプ毎に大きく異なり、世帯が位置している洪水の発生状況が関係している可能性があることを示した。

移転行動に関しては、移転行動の経験の有無とその理由および居住地選択時の重要視する項目等に関してウボンラチャタニ市の世帯を対象としてアンケート調査を実施した。結果として、居住地選択時には、土地価格・住宅価格や就業地・就学地へのアクセスだけでなく、洪水が発生した際の被害についても考慮されていることを示した。また、移転行動の実施有無に関して影響のある要因を定量的に把握するために、ロジスティック回帰モデルを適用した。結果として、過去に洪水が発生した際に経験した最大浸水深が、移転行動の意思決定に大きく寄与していることを示した。

これらのアンケート調査に基づいて分析した結果、洪水の発生が人々のアクティビティの変化と世帯の移転行動の判断に大きく影響を及ぼしていることを明らかにした。

参考文献

- 1) Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED): Emergency Events Database (EM-DAT), URL: <https://www.emdat.be/> (Accessed on January 12, 2023).
- 2) Phillipine statics Authority, URL: <https://psa.gov.ph/> (Accessed on January 19, 2023).
- 3) National Statistical Office Thailand, URL: <http://www.nso.go.th/sites/2014en>(Accessed on January 19, 2023).
- 4) General Statistics Office Vietnam, URL: <https://www.gso.gov.vn/en/homepage/>(Accessed on January 19, 2023).
- 5) Department of Population Ministry of Labour, Immigration and Population: The 2014 Myammer Population and Housing Census, URL: <https://www.dop.gov.mm/en/population-censuses-myanmar> (Accessed on January 19, 2023).
- 6) Badan Pusat Statistik, Republik Indonesia, URL: <https://www.bps.go.id/>(Accessed on January 19, 2023).
- 7) Lao Statistics Bereau, URL: <https://laosis.lsb.gov.la/>(Accessed on January 19, 2023).
- 8) Department of Statics Malaysia Official Portal, URL: <https://www.dosm.gov.my/v1/index.php> (Accessed on January 19, 2023).
- 9) Nationl Institute of Statictics of Cambodia, URL: <http://www.nis.gov.kh/index.php/km/> (Accessed on January 19, 2023).
- 10) The Office of Transport and Traffic Policy and Planning.: The Study of the Master Plan Development of the Public Transportation Systems in Cities, Regions of the Country, Thailand, 37 pp. (In Thai)
- 11) 独立行政法人国際協力機構（JICA）：タイ東北地方の水資源管理に係る基礎情報収集・確認調査最終報告書，平成22年9月（2010年），URL: https://openjicareport.jica.go.jp/617/617/617_122_12015194.html（最終アクセス：2022年11月18日）。
- 12) 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.
- 13) 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，No.42-2，62-71，2007.
- 14) 吉川勝秀，本永良樹：低平地緩流河川流域の治水に関する事後評価的考察，水文・水資源学会誌，第19巻，第4号，pp.267-279，2006.
- 15) 名取義和，谷下雅義，鹿島茂：パーソントリップ調査における回答誤差とその発生要因，土木計画学研究・論文集，No.17，pp.155-162，2000.
- 16) 独立行政法人国際協力機構 JICA：開発途上国における交通調査および交通需要予測にかかる調査，URL: <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12339867.pdf>（最終アクセス：2022年12月4日）。
- 17) 国土交通省 都市・地域整備局：就業時間の動向などの事業所通勤意向調査，AD調査，URL: https://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/case/pdf/add_1.pdf（最終アクセス：2022年12月8日）。
- 18) 武田祐子：京都市北区住民の時空間内の行動パターン，人文地理，第47巻第1号，pp.66-83，1995.

- 19) 今井一貴, 佐藤徹治: 水害リスクを考慮した土地利用施策評価のための将来時系列の人口分布推計モデルの開発—富山県富山市を対象として—, 都市計画論文集, Vol.50, No.3, pp.656-662, 2019.

第4章 洪水発生時におけるアクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計手法の確立

本章では、これまでに既存文献で開発されてきたアクティビティベースモデルについて整理した上で、その特徴を示した。洪水の発生によるアクティビティの変化を表現し、交通需要を推計するために、既存のアクティビティベースモデルの改良および新たなモデルを構築した。具体的には、洪水発生時における冠水による道路の寸断や速度低下の影響を内生化、洪水の発生を考慮したアクティビティパターンの生成、第3章で実施したアンケート調査の結果から得られたパラメータに基づいた移転行動のモデル化を行った。これによって、洪水の発生によるアクティビティの変化を詳細に表現し、洪水発生時における交通需要を推計する手法を確立した。また、構築したモデルの適用に向けて入力データを整理し、アクティビティベースモデルを用いて定常時と洪水発生時における交通需要を推計した。アクティビティベースモデルによる交通需要の推計結果の精度を検証するために、アンケート調査とアクティビティベースモデルから生成された定常時のアクティビティパターン数の割合、2015年にウボンラチャタニ市で実施された交通量調査の結果（朝、タピーク1時間の主要道路）と定常時の交通量配分の結果、アンケート調査およびアクティビティベースモデルの推計結果から得られた定常時の交通機関分担割合の3項目の比較を行った。

その後、洪水発生時のアクティビティベースモデルとアクティビティの変化を考慮していない四段階推定法を用いて推計した交通需要の推計結果から得られたOD間交通量を比較した。この結果から、洪水発生時におけるアクティビティベースモデルによる交通需要の推計の有効性を示す。最後に定常時と洪水発生時のアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果を総トリップ数および交通量配分の結果から分析した。

4.1 アクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計モデルの概要

4.1.1 アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計モデルの概要

これまで、アクティビティを明示的に取り入れた交通需要の推計手法として、多くの既存文献では、アクティビティベースモデルが開発されてきた。アクティビティベースモデルでは、「移動は活動の派生需要である」という考え方に基づいて、個人の活動に対する交通機関の制約を考慮して、交通需要を推計する¹⁾。これによって、従来の集計的な交通需要の推計手法（四段階推定法）の問題点を解決することに貢献し、大きな変化をもたらした。アクティビティベースモデルでは、個人属性や世帯属性および設定した制約条件の下で、個人が無数のアクティビティの選択肢集合の中からアクティビティや1日のスケジュールを決定し、交通需要を推計する。これによって、既存の交通需要の推計手法では考慮することができなかった時空間の細かな表現が可能であり、個人の1日のアクティビティをより詳細に把握した上で、政策を実施した際の効果を分析することができる。

そこで、四段階推定法とアクティビティベースモデルによる交通需要の推計方法について比較した（表4-1）。分析の単位は、四段階推定法の場合にはトリップ、アクティビティベースモデルの場合には、ツアー（トリップの組み合わせ）が対象となり、アクティビティベースモデルを用いた場合には、それぞれのトリップの連関性を考慮して分析することが可能となる。また、アクティビティベースモデルを用いた場合には、個人属性を考慮して交通需要を推計することができるため、洪水の発生によってどの程度の人々が影響を受けるのかを分析可能となる。一方で、四段階推定法を

用いた場合には都市全体の平均値を想定しているため、発生集中交通量を推計する段階で、移動頻度の減少をトリップレートの減少として都市全体で同質に扱う。そのため、洪水の発生によって変化する人々のアクティビティを考慮して交通需要を推計できない。さらに、中間トリップについては、四段階推定法では目的別トリップとして扱うため、適切に洪水の発生によるアクティビティの変化を含めた交通需要の変化を表現することができない。また、移動時間について、四段階推定法は日トリップとして分析するため一日の平均の値を利用することになる。一方で、アクティビティベースモデルの場合は、個人の1日の活動と交通行動をモデリングしているため、時間的および空間的な制約を考慮して交通需要を推計することができる。なお、四段階推定法の場合には、トリップそのものに注目しているため、活動時間についての分析はできない。移動手段の選択および移動経路の選択については、どちらのモデルでも十分に表現し、分析することができる。

表 4-1 アクティビティベースモデルと四段階推定法を用いた交通需要推計手法の比較

比較項目	四段階推定法	アクティビティベースモデル
分析の単位	トリップ	ツアー（トリップの組み合わせ）
個人の属性の考慮	× （ゾーン平均を想定）	○ （個別に考慮する）
中間活動（立ち寄り）	△ （目的別のトリップとして扱う）	○ （ツアーの中で扱う）
移動時間・活動時間	× （日トリップとして分析し、考慮しない）	○ （スケジューリングをモデル化）
移動の交通機関（移動手段）の選択	○ （変わらない）	○ （変わらない）
移動経路の選択	○ （変わらない）	○ （変わらない）

このように、四段階推定法では、上記で挙げたような様々な問題が存在する。そのため、これらの問題を解決するために、多くの既存文献でアクティビティベースモデルが開発されてきた。これまでに既存文献で開発されてきたアクティビティベースモデルは、大きく分けて、①離散選択型モデルを適用して個人のアクティビティを確率的に選択する手法、②一定のルールに基づいてアクティビティを表現する手法、③上記の2つの手法を統合したハイブリット型の手法の3種類に分類することができる。以下にそれぞれの手法の概要について示す。

① 離散選択型モデルを適用して個人のアクティビティを確率的に選択する手法

離散選択型モデルを適用して個人のアクティビティを確率的に選択する手法は、ランダム効用理論に基づいて、個人の1日のアクティビティパターン、活動時間、訪問先、交通手段を選択する手法である。それぞれの選択肢集合の中から、個人の効用を最大化する選択肢を選ぶと仮定する。それによって、都市全体のすべての人々のアクティビティを表現することで、交通需要を推計する。具体的には、図 4-1 に示すように、個人毎に選択可能集合をネスト構造で表現した上で、段階的または一度に選択することで、1日の個人のアクティビティを記述する。この手法を用いて交通需要を推計した文献として、例えば、Dong ら²⁾は、米国のオレゴン・ポートランドを対象として、ピーク

時間帯の渋滞課金を導入した際のアクセシビリティの変化を四段階推定法と離散選択型のアクティビティベースモデルの交通需要の推計結果に基づいて比較分析している。Yagi ら³⁾は、インドネシア・ジャカルタ首都圏を対象として、離散選択型のアクティビティベースモデルを用いて、交通需要を推計し、ロードプライシングを実施した場合の導入効果を評価している。また、藤井ら^{4),5)}は、開発したプリズム時空間制約に基づいて逐次的にアクティビティを選択していく PCATS(Prism Constraint Activity-Travel Simulator)を用いて、京阪地域の1日の交通需要を推計し、道路ネットワーク整備などの政策を評価している。この他にも、Bowman ら⁶⁾、布施ら⁷⁾など多くの既存文献で実装され、様々な政策が評価されている。

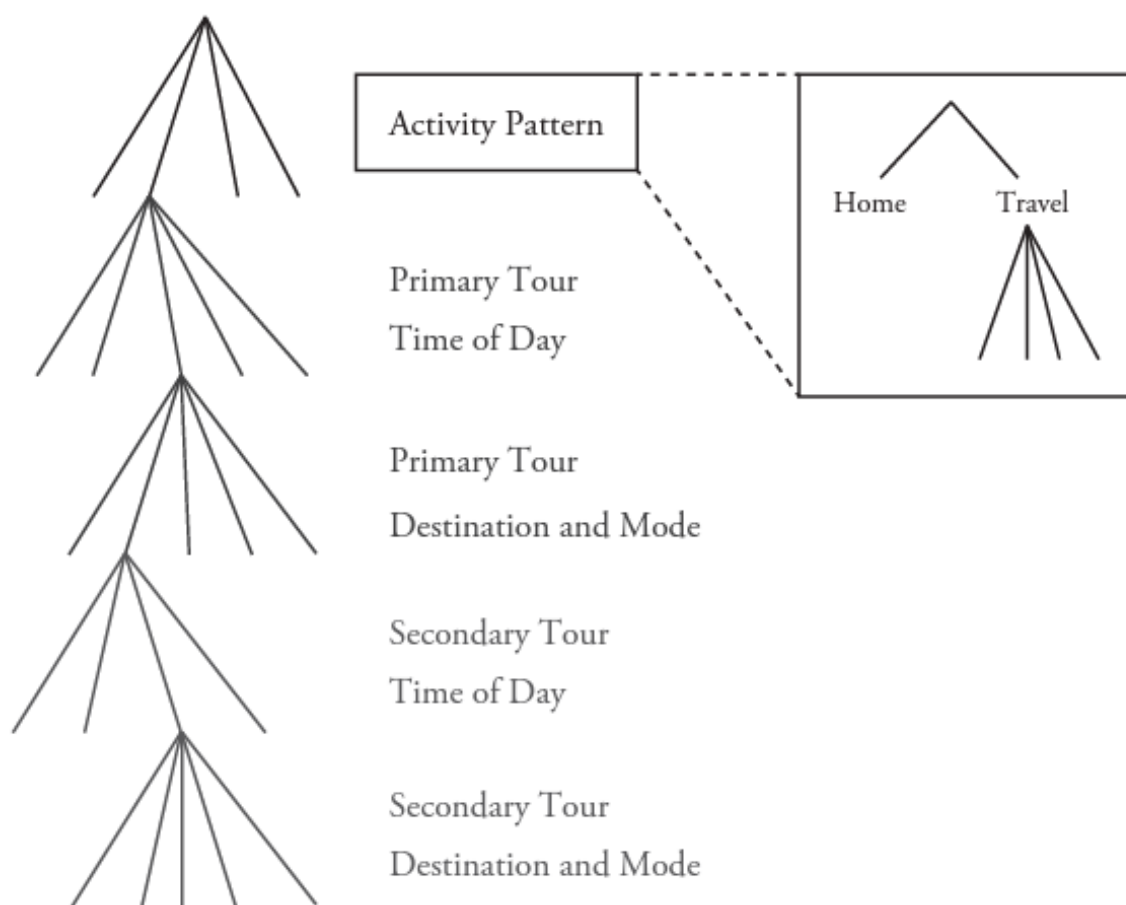


図 4-1 離散選択モデルに基づくアクティビティベースモデル

(引用 : Bowman, et al. (2000): Activity-based Disaggregate Travel Demand Model System with Activity Schedules⁶⁾)

②一定のルールに基づいてアクティビティを表現する手法

一定のルールに従って各個人のアクティビティを規定するルールベース型のアクティビティベースモデルは、決められたルールの下でアクティビティの遷移確率を算出した上で多数の選択肢の中から個人毎に意思決定する。

例えば、Artentze ら⁸⁾は、就業や就学等の日常的に必要な不可欠なアクティビティを事前に決定し、観測データに基づいてアクティビティを追加していく ALBAROSS (A Learning-based Transportation

Oriented Simulation System)のアルゴリズムを開発している (図 4-2). また, Miller ら⁹⁾は, データオリエンテディッドなシミュレーションモデルの 1 つとして, TASHA (Travel-Activity Scheduler for Household Agents)を提案している. この手法では, データから属性毎に生成されてアクティビティの頻度, 開始時刻および時間の分布を用いてアクティビティを発生させる. 次に, 訪問先 (目的地) をゾーン単位の魅力度と移動コストを考慮して選択確率を算出し, 表現している. その後, 決められたルールに基づいてスケジューリングを実施している. この他にも, Roorda ら¹⁰⁾, Yasmin ら¹¹⁾も同様にルールベースモデル型のアクティビティベースモデルを適用している.



図 4-2 ルールベースモデル型のアクティビティベースモデルの例

(引用 : Arentze, et al. (2000): ALBATROSS: Multiagent, Rule-based Model of Activity Pattern Decision⁸⁾)

③ハイブリット型のアクティビティベースモデル

ランダム効用理論に基づいて, 個人の 1 日のアクティビティパターン, 訪問先, 交通手段を選択し, その後, 活動の時間や活動の開始時刻を一定のルールに従って設定する手法である. なお, アクティビティパターン, 訪問先や利用する交通手段については, それぞれの個人の効用を選択肢集

合の中から最大化させるような選択をする。例えば，Scherr ら¹²⁾は，個人の交通とアクティビティの関係性を定式化した上で，交通需要を推計する手法として開発している。そして，ルールベースのアプローチに基づいて各アクティビティや交通行動のスケジューリングを行う手法として確立した(図 4-3)。この他にも，Arentze ら¹³⁾，Horni ら¹⁴⁾も同様にハイブリット型のアクティビティベースモデルを構築し，交通需要を推計した。

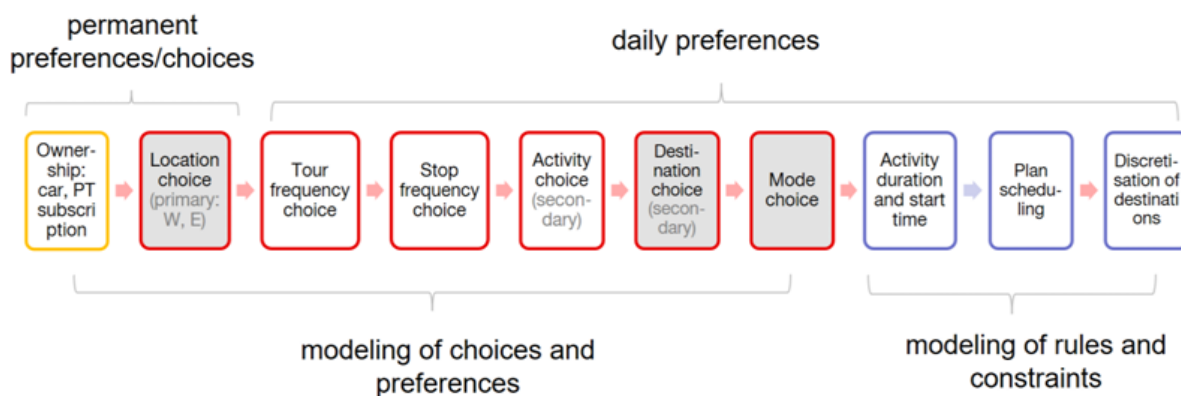


図 4-3 ハイブリット型のアクティビティベースモデルの例

(引用 : Scherr, et al. (2020): SIMBA MOBI: Microscopic Mobility Simulation for Planning)

本論文では，③ハイブリット型の手法のうち図 4-3 に示した Mobi.plan モデルをベースとして洪水発生時における交通需要を推計した。この手法を選択した理由として，①離散選択型モデルを適用した個人のアクティビティを確立的に選択する手法および②一定のルールに基づいてアクティビティを表現するルールベースモデルを用いた場合には，アクティビティの頻度，開始時刻および活動時間を作成された分布に従っていることや日常で必要不可欠な活動（就学および就業）については，基本的には大きな変化が生じないことを仮定して計算を実施しているが，そのようなアクティビティに大きく影響を与える政策や状況に対応することはできない。そのため，本論文におけるベースモデルとして Mobi.plan モデルを選択し，1日の都市全体の交通需要を推計した。

4.1.2 本研究で対象とするアクティビティベースモデルの概要

本論文で用いたアクティビティベースモデルの計算フローを図 4-4 に示す。このモデルを用いた定常時と洪水発生時の都市全体の1日の交通需要は，a)合成人口データの生成，b)必要なパラメータの推定，c)交通需要の推定，d)交通量配分の4つのプロセスで推計することができる。以下にそれぞれの計算過程について示す。なお，プロセス e)の洪水発生時におけるネットワークへの影響の表現については，次項にて示す。

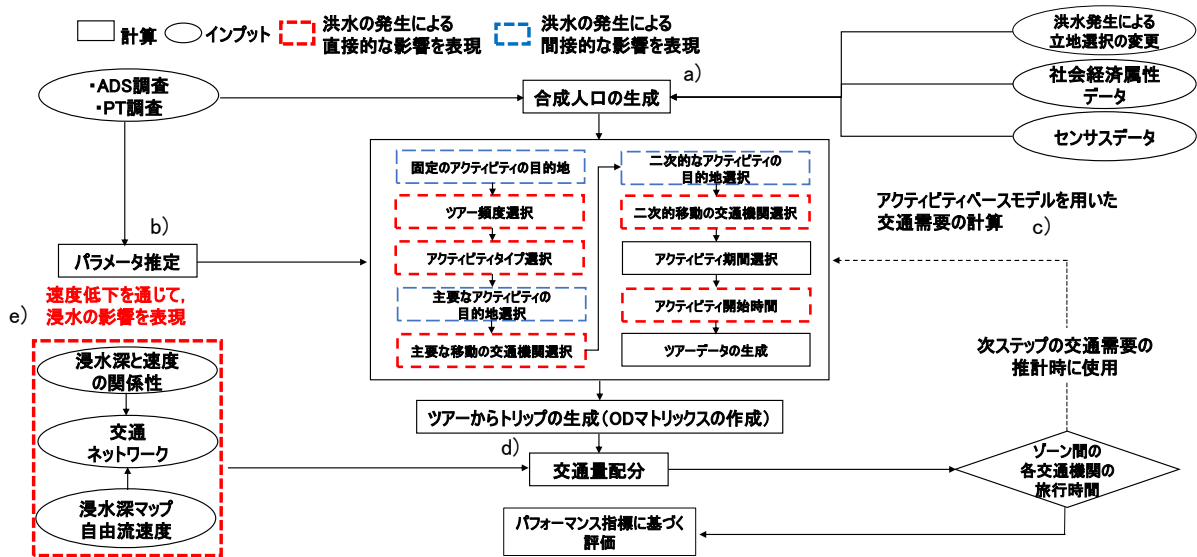


図 4-4 アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推定の概要

a) 合成人口データの生成：

アクティビティベースモデルを用いた交通需要は、個人属性や世帯属性の異質性を考慮して推計を行うため、これらのデータを含む人口の非集計データが必要となる。しかし、これらの非集計データについては一般に公開されておらず、集計されたデータとして公開されている。したがって、都市レベルでアクティビティベースモデルを適用する際には、パーソントリップ等のサンプルの非集計データと、センサスデータから得られる全数の集計方法から求められる拡大係数を付与し、都市全体の個人および世帯レベルの非集計データを作成する必要がある。この拡大係数の計算方法については、多くの既存文献で様々な手法が提案されてきているが、主に IPF 系と組み合わせ最適化アルゴリズム系（焼きなまし法や遺伝的アルゴリズム等）の 2 つの系統に分類することができる。以下にそれぞれの手法の概要を示す。

(1) IPF 系（Interactive Proportion Fitting 法をベースにした手法）

IPF（Interactive Proportion Fitting）法は、Derning ら¹⁵⁾がこの手法が開発され、Beckman ら¹⁶⁾によって合成人口の生成問題への適用が実施されており、サンプルデータから都市全体の人口の拡大係数算出方法として広く利用されている。例えば、倉内ら¹⁷⁾は、マイクロシミュレーションを用いた交通需要の推計に向けて、個人や世帯の異質性を考慮して分析するために、IPF 法を改良した IPU 法を利用し、母集団全体の人口を生成している。IPU 法では、サンプルの属性間の相関係数が拡大した後も同様のものとして保たれるため、母集団の再現性が高いと一般的に述べられている。この方法では、センサスデータから作成された各属性の周辺分布とサンプルデータから作成された複数間のオッズ比を保持したまま各セグメントに対する拡大係数を算出する手法である。このオッズ比とは、それぞれの属性間の相関係数を表現しており、倉内ら¹⁷⁾によると、オッズ比は以下の式 4-1 と式 4-2 で計算することができる。

$$\phi = \frac{p_{1,1} \times p_{2,2}}{p_{1,2} \times p_{2,1}} \quad \text{式 4-1}$$

ここで、 $p_{i,j}$ は属性 1 のカテゴリが i 、属性 2 のカテゴリが j の分類に属するセグメントのサンプルの割合

また、属性が m 次元で次元 i のカテゴリ数が n の場合、属性 j のカテゴリ i_j 、 $i_j + c_1$ 、属性 k のカテゴリ i_k 、 $i_k + c_2$ のオッズ比は以下の式で表現できる。

$$\phi = \frac{(p_{i_1}, \dots, p_{i_j}, \dots, p_{i_k}, \dots, p_{i_m})(p_{i_1}, \dots, p_{i_j+c_1}, \dots, p_{i_k+c_2}, \dots, p_{i_m})}{(p_{i_1}, \dots, p_{i_j+c_1}, \dots, p_{i_k}, \dots, p_{i_m})(p_{i_1}, \dots, p_{i_j}, \dots, p_{i_k+c_2}, \dots, p_{i_m})} \quad \text{式 4-2}$$

ここで、 c_1 は $c_2 + i_k \leq n_k$ を満たす正の整数を表し、 c_2 は $c_1 + i_j \leq n_j$

この手法では、サンプルの属性間の相関係数が拡大係数を算出した際にも維持される。それによって、母集団をこれらの関係を保持した状態で生成することができる。

(2) 組み合わせ最適化アルゴリズム系

多くの既存文献^{18),19)}では、非集計の都市全体の人口データを組み合わせ最適化アルゴリズムのうち、高熱の金属を冷却する工程を模した焼きなまし法を利用し、生成手法の開発が行われている。焼きなまし法では、組み合わせ最適解を求める過程で、組み合わせ会の状態エネルギー E とサンプルを置換した上で、新たに求められた組み合わせ解の状態エネルギー \bar{E} を求める。この変量について ΔE ($\bar{E} - E$) を算出し、式 4-3 に示すメトロポリス基準と呼ばれる採択基準を利用することでサンプルの置換を決定する。

$$\text{Prob}(\text{accept}) \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta E \leq 0 \\ e^{-\frac{\Delta E}{T}} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad \text{式 4-3}$$

ここで $\text{Prob}(\text{accept})$: 新たな組み合わせ解を受け入れる確率、 T : 温度パラメータ

メトロポリス基準は、サンプルの置換によって ΔE が増加する場合についても、温度パラメータ T の高さに応じて、受け入れ、局所解からの脱出機会を設定する。また、温度 T をサンプル置換回数があらかじめ設定した回数 M に達する度に、一定の比率で低下させる。これによって探索開始初期は、多くの改悪解を受け入れるが、その回数が徐々に減少し、最終的には、制約条件と一致す

る最適解に収束あるいは、予め設定した最大反復回数 N に到達した時点で終了する。この手法を用いて、花岡ら¹⁹⁾は、パーソントリップ調査の個票データおよび国勢調査データを用いて、合成人口データが生成することを行っている。

本論文では、Ye ら²⁰⁾が提案した IPU (Iterative Proportional Updating) 法を用いて拡大係数を計算し、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多次元クロス표를推計する手法であり、IPF 法の課題とされていた個人レベルと世帯レベルの集計表を同時に考慮して計算することができる手法である (表 4-2)。

表 4-2 IPU 法を用いた拡大係数の算出方法

ステップ1: 年少人口の調整							
世帯タイプ	年少人口	生産年齢人口	老年人口	世帯A	世帯B	拡大係数	次ステップ調整率
1	0	1	0	0	1	1	
2	0	2	0	0	1	1	
3	1	2	0	1	0	1	×2.5
4	0	2	1	0	1	1	
5	1	2	1	0	1	1	×2.5
総数(推定)	2	9	2	1	4		
総数(センサス)	5	6	4	2	5		
調整率	2.5						
ステップ2: 生産年齢人口の調整							
世帯タイプ	年少人口	生産年齢人口	老年人口	世帯A	世帯B	拡大係数	次ステップ調整率
1	0	1	0	0	1	1	×0.4
2	0	2	0	0	1	1	×0.4
3	2.5	5	0	2.5	0	2.5	×0.4
4	0	2	1	0	1	1	×0.4
5	2.5	5	2.5	0	2.5	2.5	×0.4
総数(推定)	5	15	3.5	2.5	5.5		
総数(センサス)	5	6	4	2	5		
調整率	0.4						
ステップ3: 老年人口の調整							
世帯タイプ	年少人口	生産年齢人口	老年人口	世帯A	世帯B	拡大係数	次ステップ調整率
1	0	0.4	0	0	0.4	0.4	
2	0	0.8	0	0	0.4	0.4	
3	2.5	5	0	2.5	0	1	
4	0	0.8	0.4	0	0.4	0.4	×1.38
5	2.5	5	2.5	0	2.5	1	×1.38
総数(推定)	5	12	2.9	2.5	3.7		
総数(センサス)	5	6	4	2	5		
調整率			1.38				
ステップ4: 世帯タイプAの調整							
世帯タイプ	年少人口	生産年齢人口	老年人口	世帯A	世帯B	拡大係数	次ステップ調整率
1	0	0.4	0	0	0.4	0.4	
2	0	0.8	0	0	0.4	0.4	
3	2.5	5	0	2.5	0	1	×0.8
4	0	0.44	0.22	0	0.22	0.55	
5	3.45	6.9	3.45	0	3.45	1.38	
総数(推定)	5.95	13.54	3.67	2.5	4.47		
総数(センサス)	5	6	4	2	5		
調整率			0.8				
ステップ5: 世帯タイプBの調整							
世帯タイプ	年少人口	生産年齢人口	老年人口	世帯A	世帯B	拡大係数	次ステップ調整率
1	0	0.4	0	0	0.4	0.4	×1.12
2	0	0.8	0	0	0.4	0.4	×1.12
3	2	4	0	2	0	0.8	
4	0	0.44	0.22	0	0.22	0.55	×1.12
5	3.45	6.9	3.45	0	3.45	1.38	×1.12
総数(推定)	5.45	12.54	3.67	2	4.47		
総数(センサス)	5	6	4	2	5		
調整率				1.12			

表 4-2 に示すように、センサデータと世帯サンプルをベースに周辺度数との比を計算し、繰り返し拡大係数を更新することで個人属性および世帯属性の両方を同時に一致させる方法である。表では、世帯構成員の年齢に基づく人口数と世帯タイプに関して調整方法を示しており、それぞれのステップでは、シミュレーションとセンサデータが一致するように拡大係数を調整している。これらの計算を繰り返し計算していくことで、個人属性・世帯属性等の非集計データを含む合成人口データが生成できる。

b) 必要なパラメータの推定

本論文で用いたアクティビティベースモデルでは、ツアー頻度、目的地、アクティビティパターン、交通機関選択および活動時間や活動の開始時間に関するパラメータが必要である。モデル内では、ツアー頻度、目的地、アクティビティパターン、交通機関選択について離散選択モデル（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に必要なパラメータについては、第 3 章に示した 2022 年に実施したアクティビティダイアリー調査のデータ（合計 300 世帯、都市全体の 0.5%）を使用し、推定した。

初めに、ツアー頻度およびアクティビティパターンについては、式 4-4 および式 4-5 に基づいて推定した。

$$P_{ij} = \frac{e^{V_{ij}}}{\sum_{m=1}^M e^{V_{ij}}} \quad \text{式 4-4}$$

$$V_j = \sum_{k=1}^K \beta_{kj} X_{kj} \quad \text{式 4-5}$$

ここで、 p_{ij} ：個人 i が選択肢 j を選択する確率， V_j ：選択肢 j を選択による効用の定数項， β_{kj} ：選択肢 j に対する k 番目の説明変数に関する未知パラメータ， X_{kj} ：選択肢 j に対する k 番目の説明変数

次に、交通機関や目的地の選択に関しては、はじめに、OD ペア（ゾーン i からゾーン j ）の交通機関選択割合については、以下の式 4-6 で推定することができる。

$$P(m|ij) = \frac{\exp(V_{ijm})}{\sum_k \exp(V_{ijk})} \quad \text{式 4-6}$$

ここで、 $P(m|ij)$ ：個人が選択肢 m を選択しゾーン ij 間を移動する確率， V_{ijm} ：選択肢 m を選択する場合の効用

ゾーン ij 間の最大期待効用の交通機関選択に関しては、目的地選択時の効用に関する

め、式4-7に示すように最大期待効用を算出する。この値を式4-8および式4-9に示す目的地的地選択をする際に考慮するように設定した。

$$EMU_{ij} = \ln \left\{ \sum_m \left[\exp \left(\frac{V_{ijm}}{\phi} \right) \right] \right\} \quad \text{式4-7}$$

ここで、 EMU_{ij} ゾーンij間を移動する交通機関の最大期待効用、 A_j : ゾーンjの社会経済魅力度、 λ_j : ゾーンjのシャドウプライス、 λ_{ij} : ゾーンペアijのシャドウプライス

$$V(j|i) = \ln(A_j) + \phi \cdot EMU_{ij} + \lambda_j + \lambda_{ij} \quad \text{式4-8}$$

$$P(j|i) = \frac{\exp(V(j|i))}{\sum_k \left[\exp(V(k|i)) \right]} \quad \text{式4-9}$$

ここで、 $P(j|i)$: ゾーンiからゾーンjを目的地として移動する確率、 $V(j|i)$: ゾーンiからゾーンjを目的地として移動する効用

一方で、個人の活動時間および活動の開始時間については、同様に、2022年に実施したアクティビティダイアリー調査の結果を利用し、事前に就業、就学、買い物、レジャー、その他の5つに関する活動時間や活動の開始時間の分布が必要になる。具体的なウボンラチャタニ市の交通需要の推計時に利用したデータセットについては、4-3で示す。

c) アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計

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、アクティビティベースモデルを実行し、1日の交通需要を推定した。図4-5にアクティビティベースモデルの計算過程を整理し、既存の集計的な交通需要の推計手法である四段階推定法の計算過程と対比するように示した。初めに、生成した個人属性および世帯属性を含む合成人口データを用いて都市の全人口のアクティビティパターンを生成する。アクティビティパターン生成時には、主要なツアーの有無、サブツアーの有無、立ち寄りの有無と回数およびサブツアーの目的について多項ロジットモデルを用いて、推定する。例えば、就業者については、就業地の選択を行った上で、就業地を含むツアーを行うかを判断する。その後、就業中またはその前後に立ち寄りを行うかを判断する。最後に、立ち寄りを行うと回答した場合には、活動の内容を把握するために、多項ロジットを適用することで、1日のすべてのアクティビティを把握し、アクティビティパターンを生成する。

図4-5に示すように、この計算過程は四段階推定法の発生集中交通量の段階にあたり、四段階推定法の場合には、就業人口、就学人口、夜間人口等のデータにトリップの原単位を掛け合わせることで、交通需要の発生する総量を把握する。そのため、四段階推定法の場合には、洪水の発生による移動の減少や変化に関して、トリップレートを減ずることで表現するが、実際にどのような人々

がどの様にアクティビティを変化させ、交通需要が変動しているかについては、詳細に分析することができない。一方で、アクティビティベースモデルを用いた場合には、洪水の発生によるアクティビティの変化を詳細に記述した上で、交通需要を推計可能となる。

次に、アクティビティパターンの生成結果から、アクティビティ毎の訪問先および移動手段に関して選択する。訪問先の選択については、就業地および就学地を考慮して、発ゾーンから着ゾーンへのインピーダンス（旅行時間）に基づいて、選択する。また、各ツアーの移動手段については、ネスティッドロジット型の選択モデルを利用することで、代表交通手段以外による影響や a) 合成人口データの生成から得られた個人の自動車や自動二輪車の保有および利用可能性を考慮しながら、交通機関を選択する。この段階は、四段階推定法の場合には、分布交通量および機関分担交通量にあたる。

その後、それぞれの活動の開始時刻および活動時間を設定するために、個人のスケジューリングを決定する。アクティビティダイアリー調査の結果から得られた各活動内容に対する開始時刻および活動時間を事前分布として、その中からランダムに選択する。この際に、活動時間と移動時間が十分に確保できず、スケジューリングできなかつた場合には、アクティビティパターンの生成の段階または目的地・交通機関選択の段階に戻り、収束するまで計算を繰り返す。

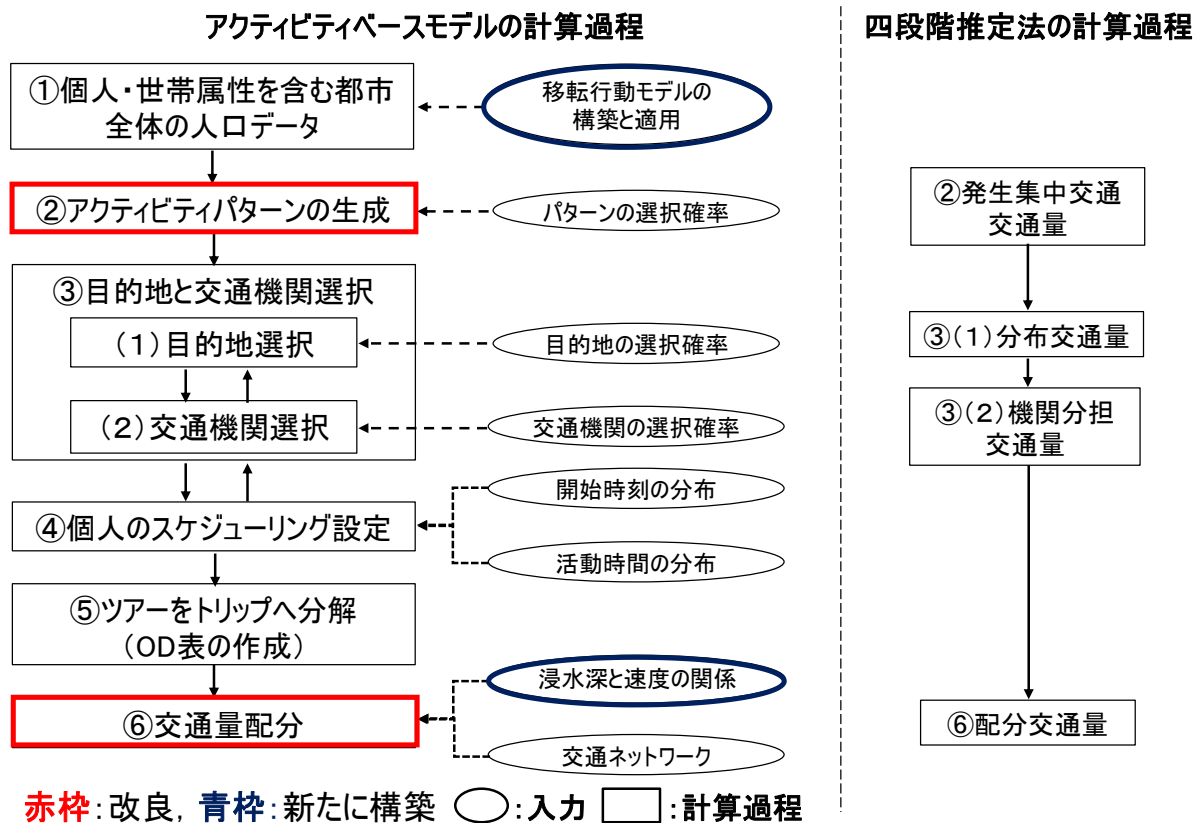


図 4-5 アクティビティベースモデルを用いた交通需要の計算過程

d) 交通量配分

c)で作成した個人別の1日のツアーのデータをトリップ毎（移動時間、移動手段および訪問先を

含む)に分解し、交通機関別の OD 表を作成した。作成した交通機関別の OD 表と交通ネットワークデータを用いて交通量配分を実施した。この配分交通量の結果から得られた各 OD 間の旅行時間と最短経路距離をサービスレベルとして利用して、100 回の繰り返し計算を行った上で、最終的に得られた結果を交通需要の推計結果としている。また、洪水発生時には、各道路区間の冠水による速度低下や道路の寸断等を表現するために、後述するように浸水深と速度に関する関数を推定し、浸水深毎に速度低下および通行止めを各道路区間に情報として与え、交通量を配分した。これによって、自宅から就学地や就業地をはじめとする定常地からの目的地の変更やアクティビティパターンの変更等への影響として考慮して分析することで、洪水の発生による人々のアクティビティの変化を反映した上で交通需要を推計することができるため、洪水発生時の交通需要を詳細に分析することができる。

4.2 洪水発生時における交通需要の推計に向けたモデルの確立

洪水の発生によるアクティビティへの影響を表現するために、前項で示したモデルの改良および新たにモデリングを行った。具体的には、①交通ネットワーク上での洪水発生時における冠水による道路の寸断と速度低下の表現、②洪水の発生を考慮したアクティビティパターンの生成、③洪水の影響回避に向けた移転行動のモデル化を実施した。以下に、その詳細について示す。

4.2.1 交通ネットワーク上での洪水の発生に伴う浸水と寸断状況の内生化

洪水発生時における冠水に伴う道路区間の寸断や速度低下の影響を交通ネットワーク上で表現するために、道路区間を定常時における旅行速度毎に分類し、浸水深毎の旅行速度の低下量を把握した上で、その結果を用いて浸水深と旅行速度の関係性を示す関数を推定した。この推定した関数と想定される洪水発生時の各道路区間の浸水深を掛け合わせることで、洪水の発生による各道路区間の冠水状況に応じて、速度低下や寸断の影響を表現した。この関数の推定にあたっては、ウボンラチャタニ市の主要な道路区間（国道 231 号、23 号、24 号）を対象として、iTIC (The Intelligent Traffic Information Center Foundation)²¹⁾が公開している 2019 年 9 月のタクシープローブデータを用いて、午後 0 時から午後 6 時までの時間を対象として定常時と洪水発生時の旅行速度を比較分析した。洪水が発生した際の 2019 年 9 月 10 日から 2019 年 9 月 17 日を洪水発生時、それ以外の 2019 年 9 月のデータを定常時のデータとして取り扱った。なお、浸水深の推定にあたっては、洪水が発生した際の交通行動を把握するために実施したアンケート調査²²⁾の結果から住民が経験した 300 サンプルの浸水深データに基づいて GIS を用いてプロットした上で、クリキング法を利用して、都市全体の浸水深の分布を推定した（図 4-6）。この浸水深データについては、衛星画像データ²³⁾から作成された浸水域と重ね合わせ、概ねその状況を表現することができていることを確認した。

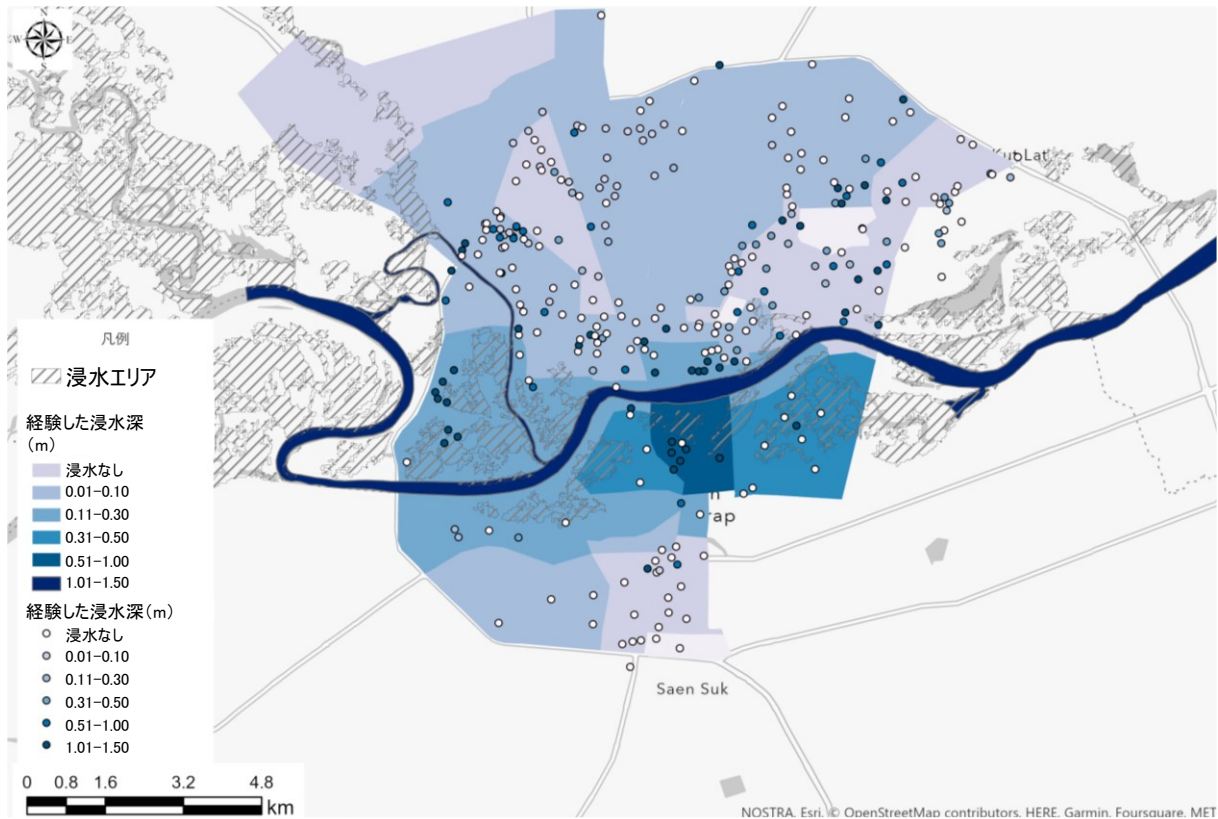


図 4-6 経験した浸水深に基づく洪水発生時の浸水深の分布

洪水の発生による旅行速度の低下量を算出するために、定常時と洪水発生時の各道路区間の旅行速度を比較した(図 4-7)。それぞれのリンク上に付している番号は、各リンク番号を表している。

結果として、西側バイパス(区間 9)と東側バイパス(区間 5)、CBD 南部の都市中央部にかかる 2 つの橋(区間 13 と 24)が大きく影響を受け、定常時と比較して大幅な速度低下が発生している。具体的には、旅行速度が西側バイパスでは 40km/h 程度、東側バイパスでは 12km/h 程度低下した。また、中央の 2 つの橋は冠水し、通行止め状態となっていた。そして、区間 9 と 10 を比較すると、区間 10 の方が旅行速度の低下量は小さくなった。これは、第 3 章で示したように、2002 年の洪水発生後に 50~150cm の嵩上げが実施されたため、旅行速度の低下量が小さくなったことが挙げられる。この結果から、洪水の発生による影響を回避することは難しいが、その状況に適応するために、道路を嵩上げすることで、モビリティへの影響を軽減することが可能であることを示している。なお、中央の 2 つの橋の定常時と洪水発生時の旅行速度の差は、道路区間(交差点毎)として分割した上で分析している。そのため、定常時には橋上についても旅行速度を示している(図 4-8)が洪水発生時には、プローブデータから走行軌跡が得られなかった(図 4-9)。

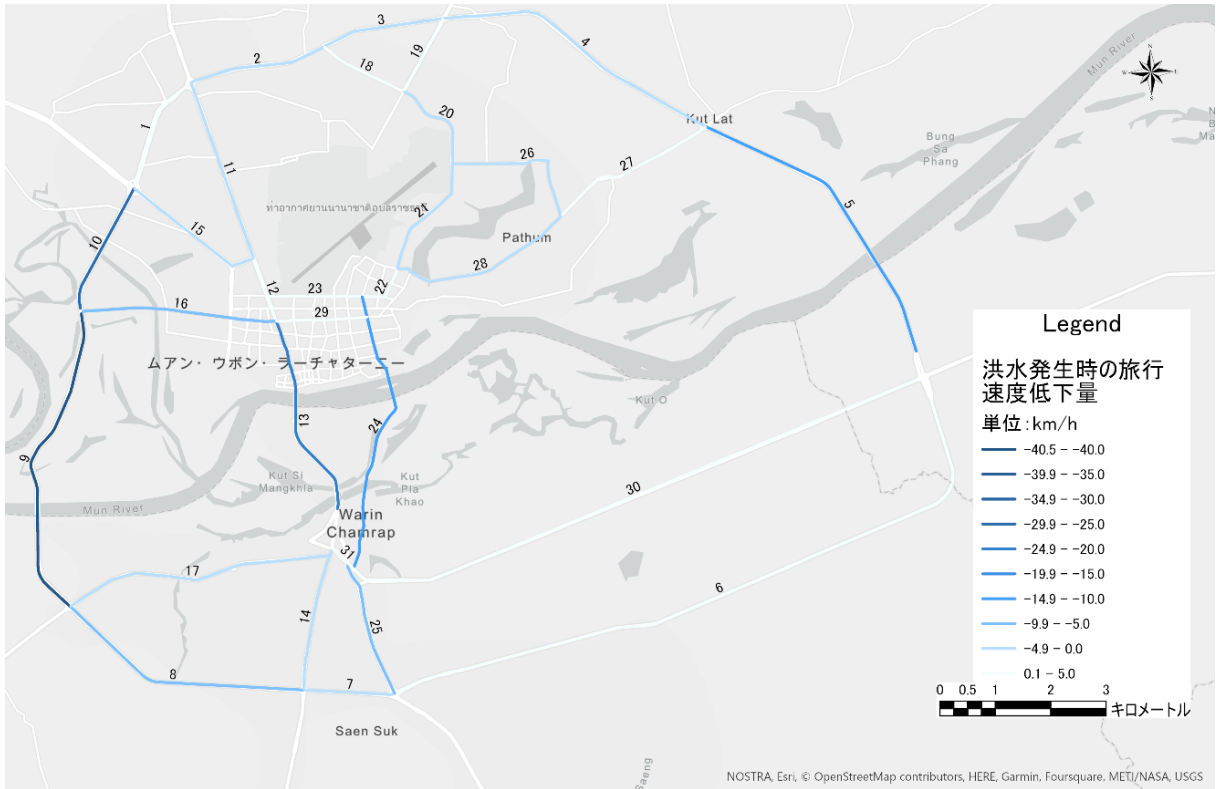


図 4-7 定常時と洪水発生時の旅行速度の比較

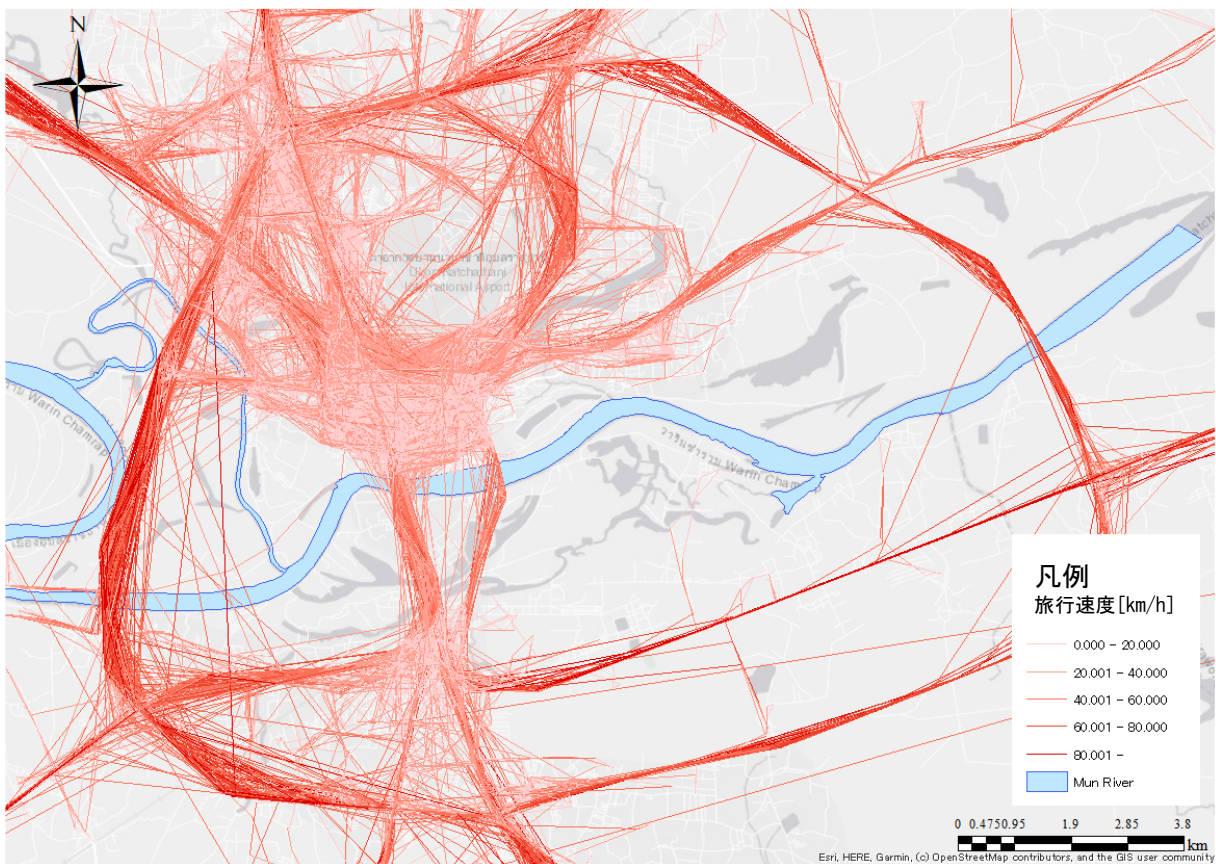


図 4-8 定常時におけるプローブカーの走行軌跡

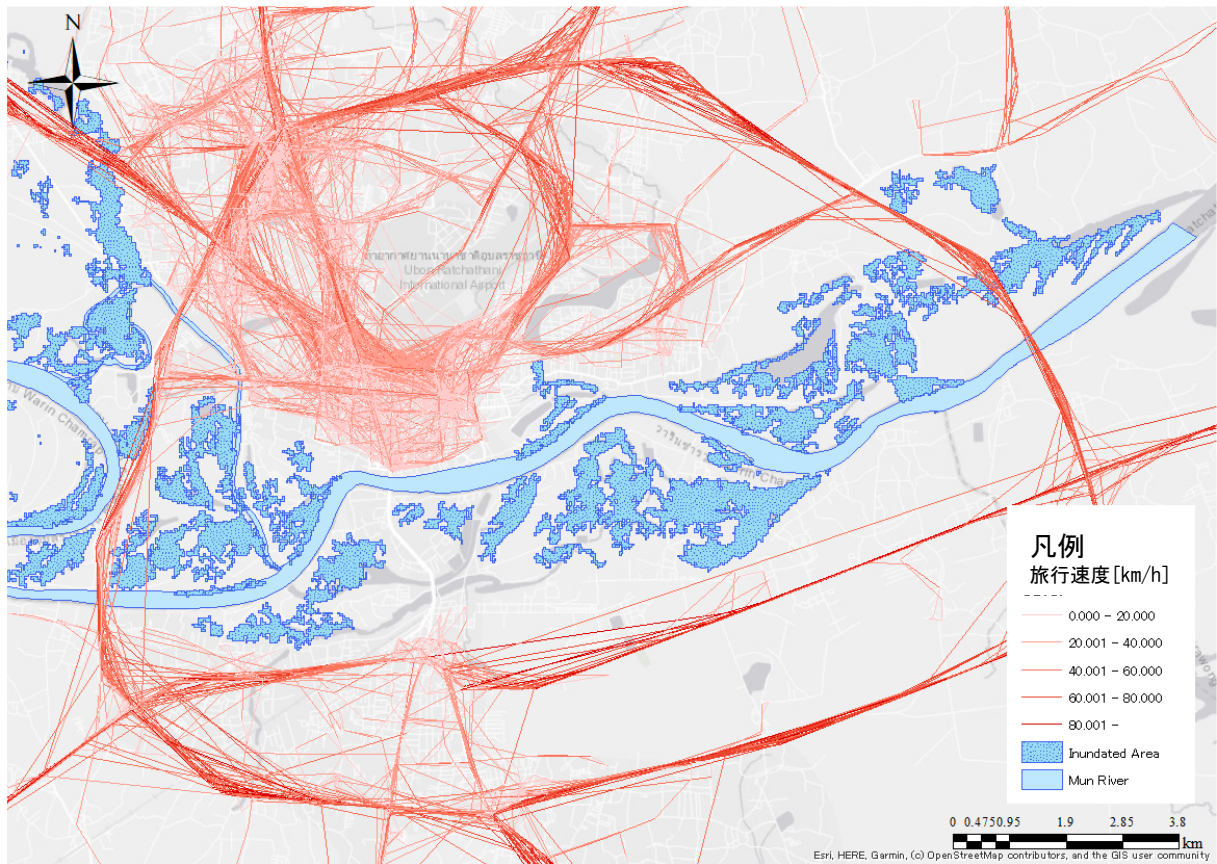


図 4-9 洪水発生時におけるプローブカーの走行軌跡

さらに、推定した都市全体の浸水深の分布と道路ネットワークの旅行速度データを重ね合わせて、定常時の旅行速度毎（21-30, 31-40, 41-50, 51-60, 61-70 km/h）に浸水深別に速度の低下量を算出し、旅行速度と浸水深の関係を表す関数を推定した。なお、本論文では、実際に道路嵩上げが実施された区間については、浸水深と旅行速度の関数を推定する際には除外した。また、関数の推定にあたっては、通行不可能となる浸水深を既存文献²⁴⁾を参考に 0.4m として設定した。その結果を図 4-10 に示す。浸水深が低い場合（5cm 程度）には、定常時の旅行速度によって、大きく旅行速度の低下量が異なる。さらに、この関数が実際の速度低下の状況を表現することができるかを確認するために、タイ・ナコンラチャシマ市で実施した旅行速度調査の結果から推定した関数と比較した。

結果として、推定した関数はナコンラチャシマ市での調査の結果と概ね同様の傾向が得られ、この結果を利用して、洪水発生時の道路交通への影響をアクティビティベースモデルに基づく交通需要の推計における交通量配分の実施時に導入した。それによって、洪水発生時の道路区間の状態を表現して配分交通量を計算し、その結果を繰り返し計算する交通需要の推計時に考慮した。

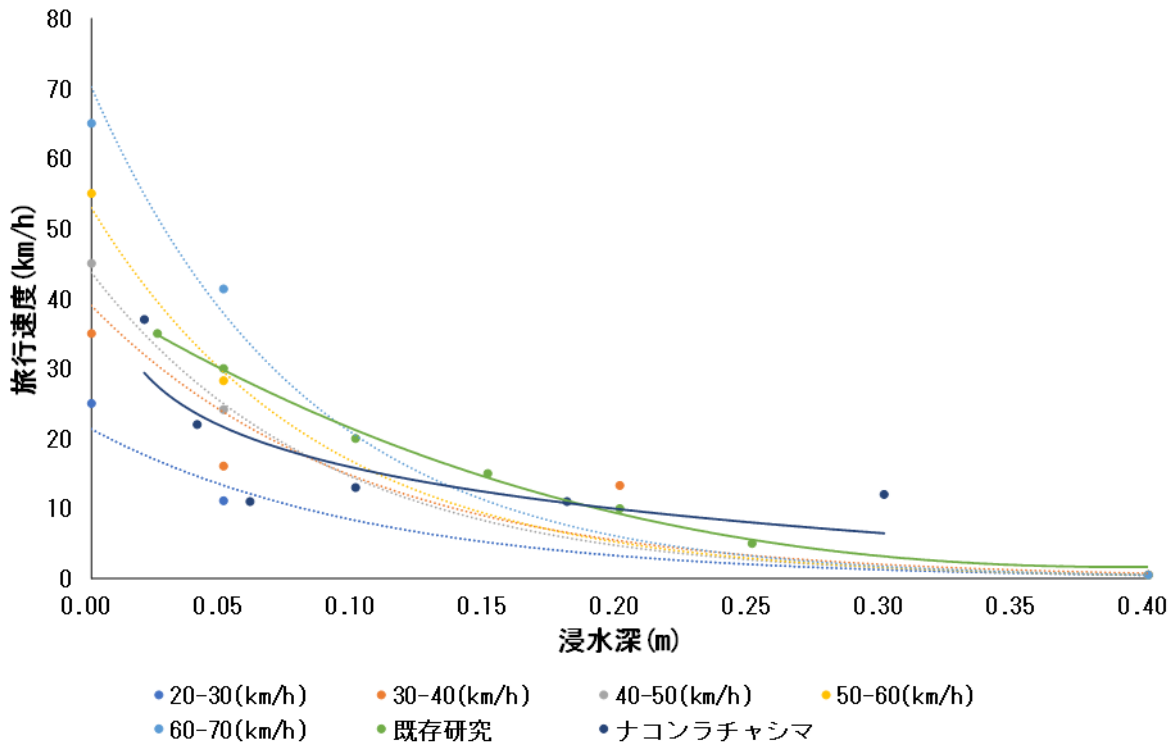


図 4-10 推定した浸水深と旅行速度の低下量に関する関数

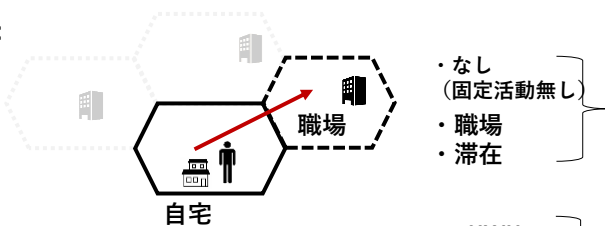
4.2.2 洪水の発生を考慮したアクティビティパターンの生成

洪水の発生によって変化したアクティビティをパターン毎に表現するために、アクティビティパターンの生成時に冠水によるモビリティの低下の影響を考慮するようにモデルの改良を行った。そこで、はじめに、定常時におけるアクティビティベースモデルでのアクティビティパターンの生成方法について示す。前節で示した個人および世帯属性を含む人口データに基づいて固定活動（いわゆる就業や就学）を設定する。次に、自宅から職場、就業時の休憩中および職場から自宅の立ち寄りの回数を選択する。最後に、それぞれの立ち寄りの活動の内容（レジャー、ショッピング、その他）を選択することでアクティビティパターンを生成する。図 4-11 に、会社員を例とした想定した場合のアクティビティパターンの生成について示した。ステップ 1 では、固定活動として職場を選択し、ステップ 2 では、就業後の立ち寄り回数を選択可能な集合から選んだ上で、その活動の内容をステップ 3 でショッピングとすることで、例では、自宅→職場→買い物→自宅として生成する。

次に、洪水の発生によって変化するアクティビティパターンを表現するためのモデルの改良について示す。初めに、洪水が発生した場合には、前提として固定活動の活動場所である職場へ移動可能か移動不可能であるのかを判断した上で、職場または滞在を選択するように設定した。仮に移動ができなくなり固定活動がなくなった場合には、1 日中自宅に滞在パターンを選択するように設定した。次に、立ち寄り回数の設定時には、洪水の発生による迂回によって移動距離の増加が想定されるため、移動距離の増加によって立ち寄り回数が減少するように設定した。これにより、洪水の発生によって変化するアクティビティをパターン毎に表現できるように改良した。

Step 1: 固定活動場所の選択 :

- 例として会社員を想定
- 職場（固定活動場所）を選択



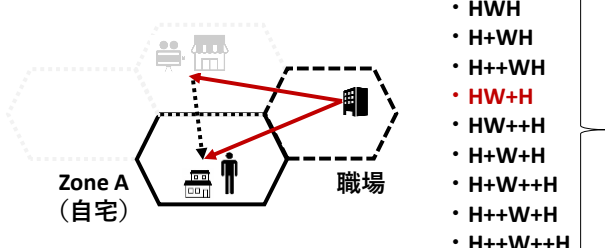
- なし (固定活動無し)
- 職場
- 滞在

固定活動場所 (職場) を選択

Step 2: 立ち寄り回数の設定 :

- 選択可能なパターンから選択
- なお、立ち寄り（中間）活動の内容は未決定

→ : アクティビティの実施
+ : 中間アクティビティ

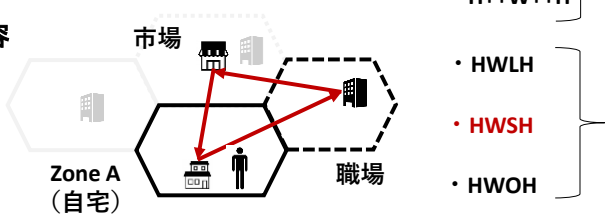


- HWH
- H+WH
- H++WH
- HW++H
- HW+++H
- H+W+H
- H+W++H
- H++W+H
- H++W++H

HW+H (自宅-職場-中間-自宅) を選択

Step 3: 立ち寄り（活動）内容の選択 :

中間活動を二次的活動の内から選択



- HWLH
- HWSH
- HWOH

図 4-11 アクティビティパターンの生成方法

4.2.3 洪水の発生の影響回避のための移転行動のモデル化

洪水が発生した際の世帯の移転行動を表現するために、第 3 章で示した移転行動に関するアンケート調査結果に基づいて、各世帯の移転行動の実施有無をモデル化した。具体的には、アンケート調査の結果を用いて得られた移転意向に関するパラメータの推定結果から、予想された結果が 0.5 以上の場合に移転を実行する世帯として設定した。各世帯の移転行動を実施する確率については、式 4-10 および式 4-11 に基づいて算出した。

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}} \tag{式 4-10}$$

ここで、 p : 移転の実施確率 (0 から 1)

算出された値は、移転の実施有無の実施確率を表している。ロジスティック回帰モデルでは、式 4-11 に示すように、推定されたパラメータとデータを当てはめることで算出することができる。

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \tag{式 4-11}$$

ここで Z 値: 移転行動の要因 ($i=1,2, \dots, n$) の線形和および B_0 : モデルの切片

本論文では、 Z 値の算出に洪水が発生した際の最大浸水深、子供および老人の有無、所得について

て得られたパラメータを代入し、生成した合成人口データから得られた個人属性のデータを X に代入した上で、それらを掛け合わせて Z 値を算出した後に式 4-11 にその値を代入することで、移転の実施する確率を算出した。この値が 0.5 以上の場合には、移転を実施すると想定し、閾値として設定した。

4.3 対象都市におけるモデルの適用に向けたデータ整理

4.3.1 合成人口に必要なデータの整理と生成方法およびその結果

アクティビティベースモデルを用いて交通需要を推計するには、個人属性および世帯属性データを含む合成人口データが必要となる。そこで、4.1.2 で示した IPU 法を適用することで、都市全体の合成人口データを生成した。なお、個人属性および世帯属性を含む都市全体の合成人口データを生成するためには、様々な統計データを収集する必要がある。表 4-3 に、IPU 法を適用する際に利用したデータおよびそのデータソースについて示した。個人属性では、年齢、性別、自動車保有、所得等、世帯属性では、世帯タイプ等のデータを用いた。これらのデータに基づいて、個人属性や世帯属性を含む都市全体の人口データを生成する。

表 4-3 IPU 法の計算に利用したデータ

No.	変数	データソース
1	総人口数	2015年のパーソントリップ調査
2	総世帯数	2015年のパーソントリップ調査
3	自動車の登録台数	2015年のパーソントリップ調査
4	自動二輪車自動車の登録台数	2015年のパーソントリップ調査
5	各ゾーンの世帯数	GISを用いて著者が作成
6	性別別人口数	Office of the National Economic and Social Development Board
7	年齢別人口数	Office of the National Economic and Social Development
8	所得別人口数	2015年のパーソントリップ調査
9	免許証の保有有無	2015年のパーソントリップ調査
10	世帯サイズ	2015年のパーソントリップ調査

これらの結果から作成した個人属性および世帯属性データを含む都市全体の合成人口データと 2015 年にウボンラチャタニ市を対象として、実施されたパーソントリップ調査²⁵⁾の年齢構成と所得を比較した。その結果を図 4-12 と図 4-13 に示す。結果として、決定係数は、それぞれで 0.9965、0.9701 となり、良好な結果が得られた。これらの都市全体の個人属性を含む合成人口データを利用することで、アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計が可能となる。

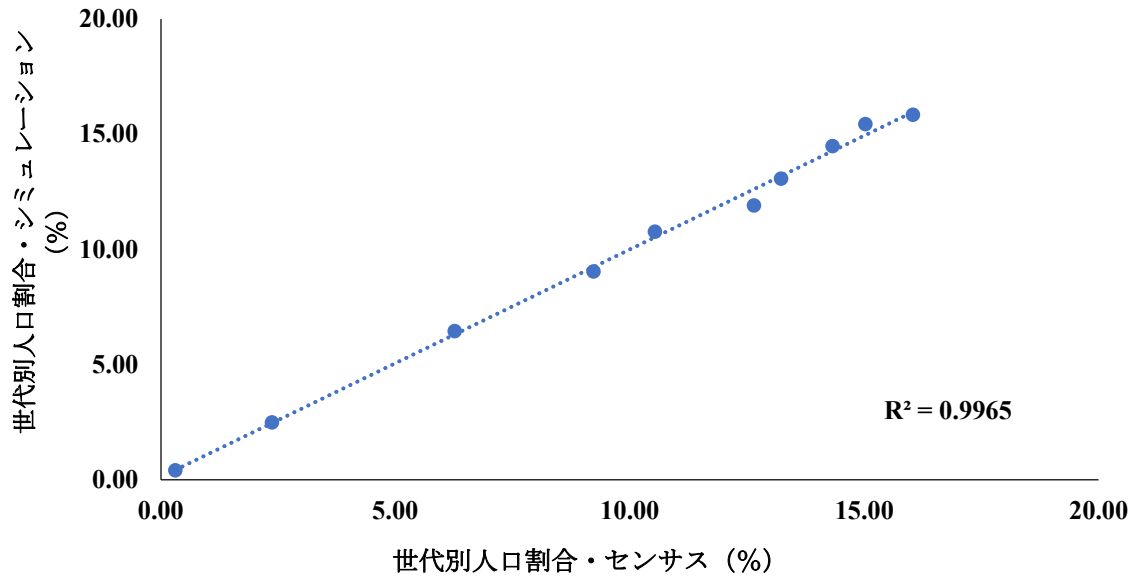


図 4-12 センサスデータと合成人口の生成に基づく年齢構成の比較

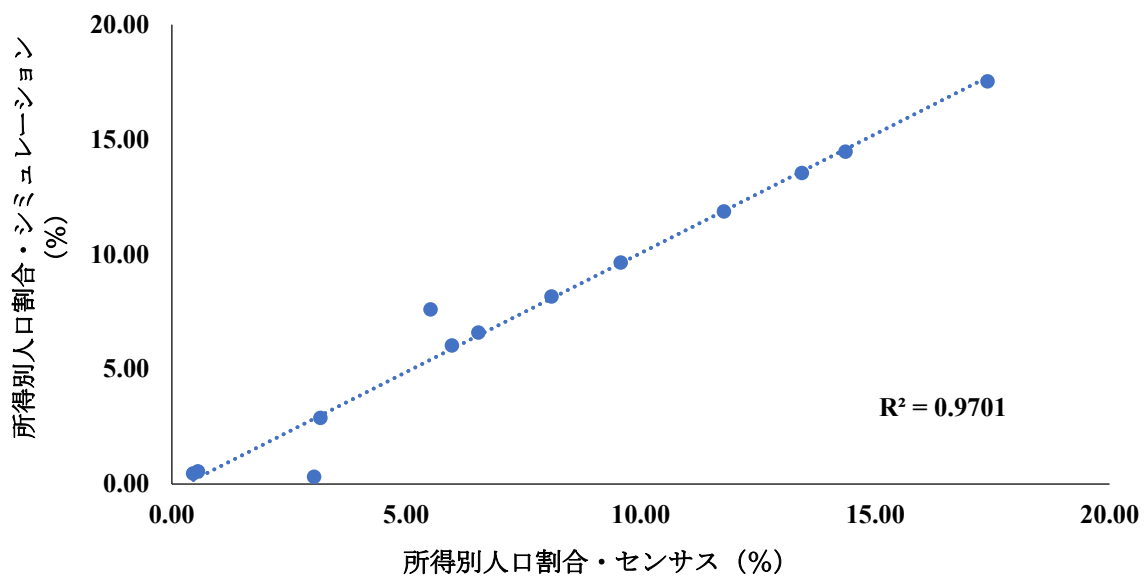


図 4-13 センサスデータと合成人口の生成に基づく所得の比較

4.3.2 アクティビティベースモデルの構築に必要なデータの整理

アクティビティベースモデルの構築には、①アクティビティに関する選択モデルのパラメータ、②訪問先の POI データ、③浸水深データの大きく分けて 3 種類のデータが必要となる。

①アクティビティに関する選択モデルのパラメータ

人々のアクティビティを表現する際には、3.2 で示したアクティビティダイアリー調査結果に基づいて、ツアー頻度、サブツアー頻度、立ち寄りおよび交通機関選択に関するパラメータを推定する必要がある。それぞれのパラメータについては、アクティビティダイアリー調査の結果を用いて最尤推定法を用いて推定し、尤度を最大にするパラメータを推定する。これは、対数尤度関数を最

大にすることと等しく、解を求めるために数値解析法を導入する必要があるため、本論文では、準ニュートン法を用いた。就業者、就学者および非就業者のツアー頻度に関するパラメータの推定した結果を表 4-4～表 4-6 に示す。結果として、自宅から就業地あるいは就学地までの距離および自動車保有有無が有意な結果となったが、パラメータの値は非常に小さいものとなった。この結果から、移動距離の影響が就学および就業のアクティビティを行うか行わないかの選択に与える影響は小さい。また、非就業者については、年齢および主要なツアー頻度および車両保有有無が有意であることを示した。

表 4-4 就学者のツアー頻度のパラメータ推定結果

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%	

表 4-5 就業者のツアー頻度のパラメータ推定結果

変数	Tour0	Tour1
選択肢固有定数		5.053 (3.725)
年齢	-0.315 (-2.136)	-1.052 (-0.712)
就業地までの距離	-0.168 (-1.166)	-0.228 (-1.585)
車両保有有無	0.732 (1.492)	0.007 (1.391)
尤度比	0.409	
的中率	74.26%	

表 4-6 非就業者のツアー頻度のパラメータ推定結果

変数	Tour0	Tour1
選択肢固有定数	0.199 (1.747)	-
主要なツアーの頻度	-12.96 (-1.802)	2.133 (2.966)
年齢	-0.789 (-9.146)	-0.432 (-5.001)
車両保有有無	-1.312 (1.627)	0.1433 (1.992)
尤度比	0.278	
的中率	75.02%	

次に、就業者、就学者および非就業者の交通機関選択に関するパラメータの推定結果を表 4-7～表 4-9 に示す。結果として、自動車と自動車（同乗）および自動二輪車については、有意な結果が得られたが、一方で、公共交通と徒歩に関しては、有意な結果が得られなかった。この理由としては、アンケート調査の結果からは、これらの交通機関については日常的に利用されることが少なく、サンプルが十分でなかったため、有意な結果が得られなかったことが挙げられる。

表 4-7 就学者の交通機関選択のパラメータ推定結果

変数	自動車	自動車(同乗)	自動二輪車	公共交通機関	徒歩
選択肢固有定数	-0.229 (-0.5238)	0.554 (1.597)	2.713 (8.427)	-1.116 (-1.642)	-
旅行時間	-0.064 (-1.425)	-0.062 (-1.625)	-0.096 (-1.964)	-0.048 (-1.254)	-0.011 (-1.598)
尤度比	0.492				
的中率	75.93%				

表 4-8 自動車保有無の交通機関選択のパラメータ推定結果

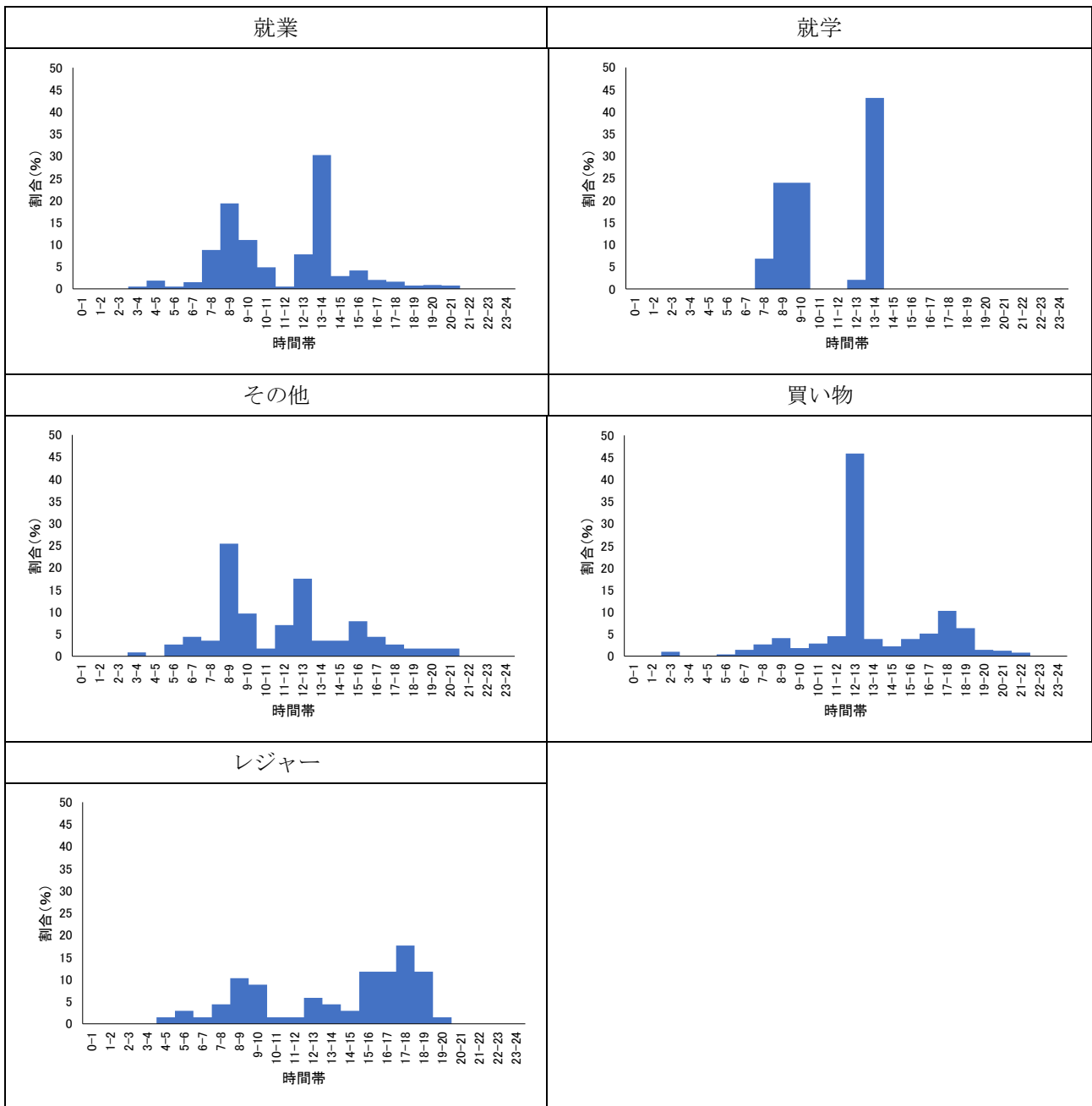
変数	自動車	自動車(同乗)	自動二輪車	公共交通機関	徒歩
選択肢固有定数	3.192 (12.15)	2.006 (7.413)	2.775 (10.33)	-0.233 (-0.425)	-
旅行時間	-0.013 (-0.425)	-0.012 (-0.485)	-0.011 (-0.342)	-0.039 (-1.149)	-0.001 (-0.328)
尤度比	0.312				
的中率	73.15%				

表 4-9 非就業者の交通機関選択のパラメータ推定結果

変数	自動車(同乗)	自動二輪車	公共交通機関	徒歩
選択肢固有定数	1.099 (1.530)	2.227 (3.378)	0.448 (0.269)	-
旅行時間	-0.106 (-0.765)	-0.102 (-0.762)	-0.006 (-0.082)	-0.012 (-0.660)
尤度比	0.232			
的中率	66.92%			

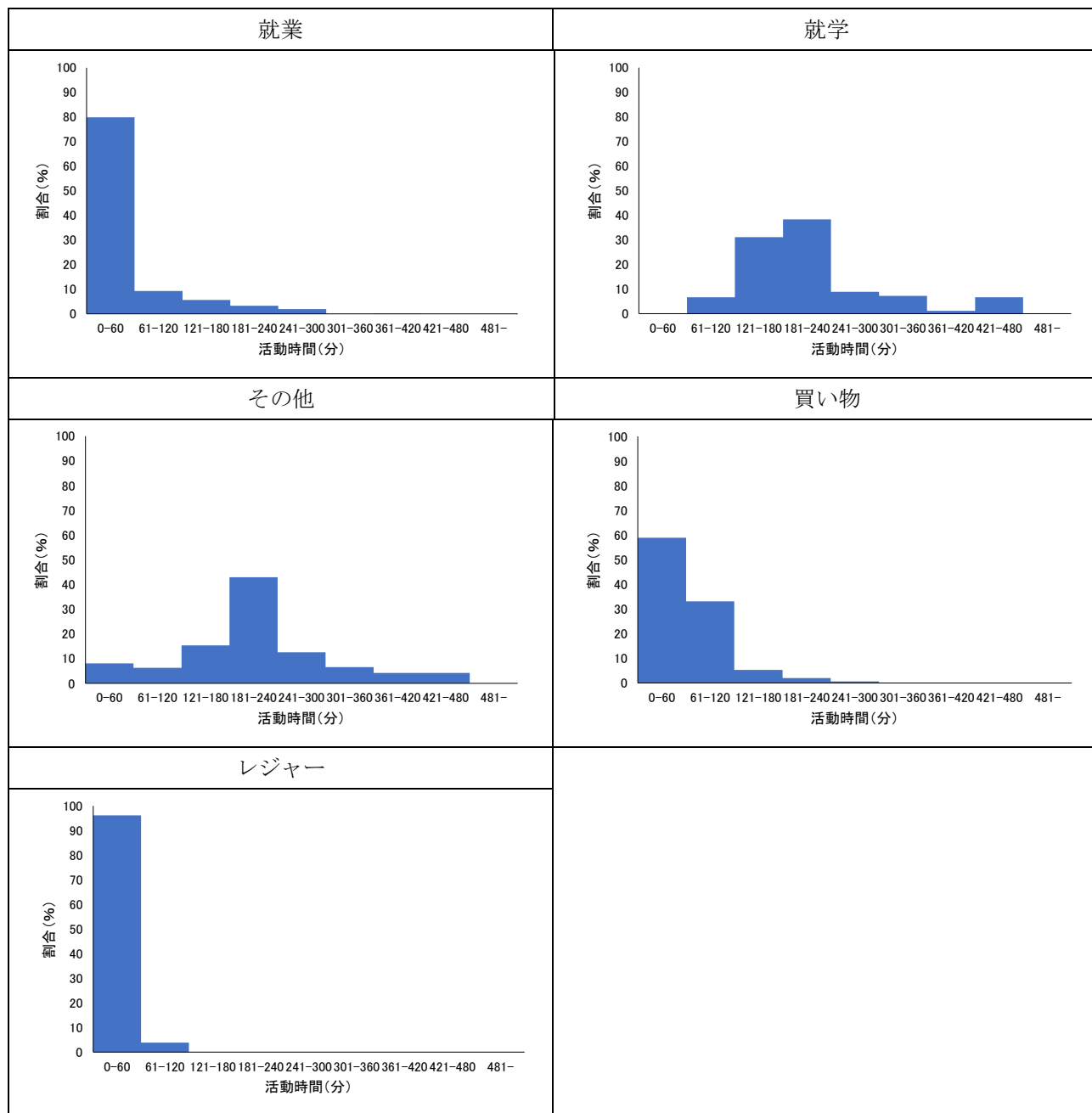
また、個人の1日のスケジューリングを行うために、それぞれの活動の開始時間および活動時間の分布が必要となる。そこで、パラメータの推定と同様にアクティビティダイアリー調査の結果から、それぞれの活動の開始時間および活動時間を集計し、表 4-10 に示すように相対度数としてまとめた。就業および就学については、朝ピーク（7-9 時）および昼の時間帯（12-14 時）から活動を開始していることが多い。一方で、買い物については、昼の時間帯（12-13 時）の時間帯で最も多く、次いで夕ピークである 16-19 時の時間帯で活動を行っていることが多い。

表 4-10 アクティビティタイプ毎の活動開始時間の分布



次に、アクティビティダイアリー調査の結果からそれぞれの活動時間を集計した上で、その分布を表 4-11 に示した。就業者のうち 42.9%の人々が活動時間：181-240 分を占めているが、これは就業中の休憩を挟んでいるため、この活動時間が多くなったことが考えられる。一方で、その他とレジャーについてはそれぞれ、80~90%の人々が活動時間：0~60 分に収まっている。買い物は、0-60 分が 58.9%、61-120 分が 33.1%となっている。個人の 1 日のアクティビティのスケジューリングを行う際には、それぞれのアクティビティの活動時間の分布データおよび前述の活動開始時間の分布に基づいて、生成されたアクティビティパターンに割り当てていくことで、1 日のアクティビティを表現することができる。

表 4-11 アクティビティタイプ毎の活動開始時間の分布



次に、②訪問先の POI データについては、対象都市における就業地：134 地点，就学地：34 地点，その他（病院）：73 地点，買い物（大型商業施設，スーパーおよび市場：192 地点およびレジャー（公園）：26 地点を GIS でプロットした（図 4-14）．最後に，浸水深データについては，図 4-14 に示す浸水深が 1 日継続している場合を想定し，分析した．

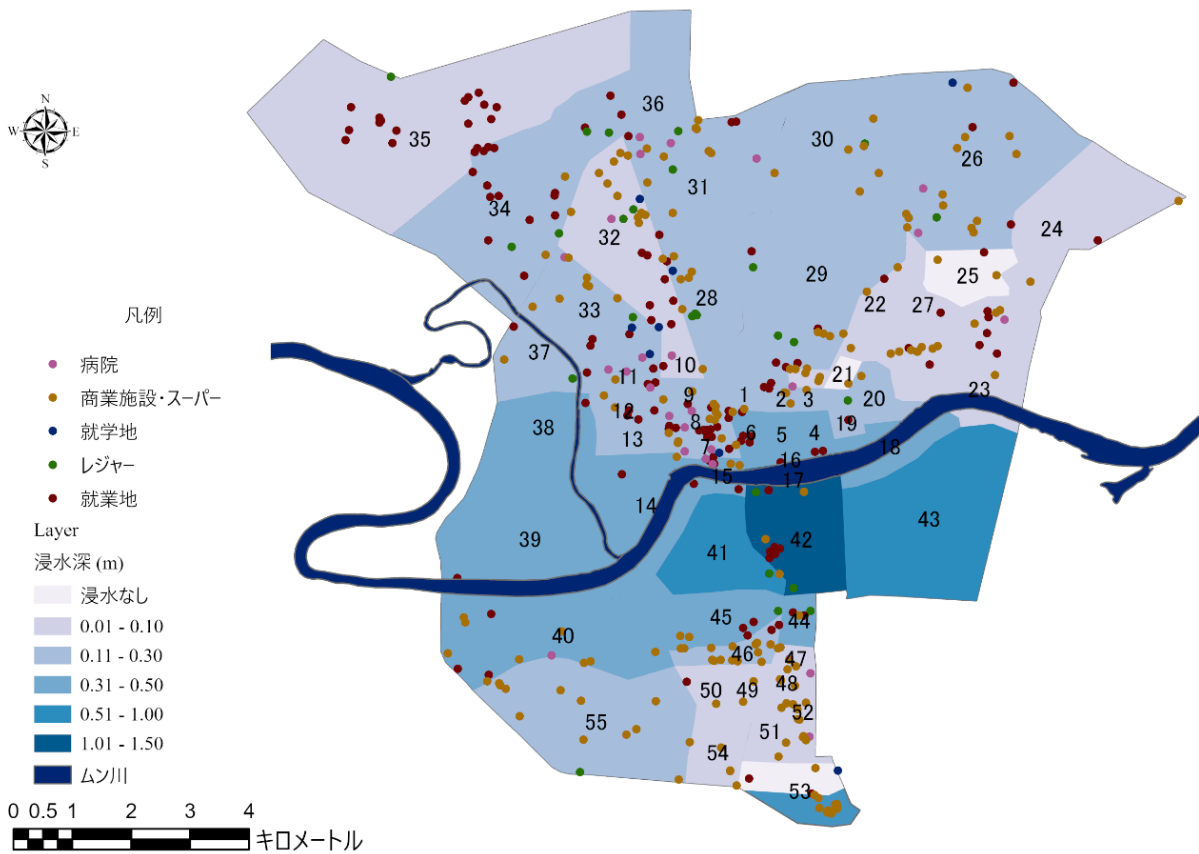


図 4-14 対象都市で作成した POI データと浸水深

4.3.3 モデルの検証に必要なデータの整理

アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果を検証するためには、①アクティビティダイアリー調査結果に基づくアクティビティパターン数の割合、②主要道路区間における観測交通量、③交通機関分担割合の3つのデータが必要となる。1つ目のアクティビティダイアリー調査の結果に基づくアクティビティパターンの割合については、第3章で示したアンケート調査の結果から得られた就業者、就学者、非就業者別のアクティビティパターン数の割合と推計結果を比較した。2つ目の観測交通量については、ウボンラチャタニ市で2015年に実施されたパーソントリップ調査の付帯調査の交通量調査の結果を用いた²³⁾。この調査では、都市内の多くの交通量が通行するバイパスを含む CBD エリア外の 10 地点と CBD エリア内の 6 地点の合計 16 地点の両方向の交通量を観測している(図 4-15)。アクティビティベースモデルの交通需要の推計結果から得られた朝ピーク(7:30~8:30)および夕ピーク(16:30~17:30)のトリップデータを切り取り、交通機関別の OD 表を作成して、ピーク 1 時間の配分交通量の計算を行った上で、それぞれの時間帯の観測交通量と比較した。

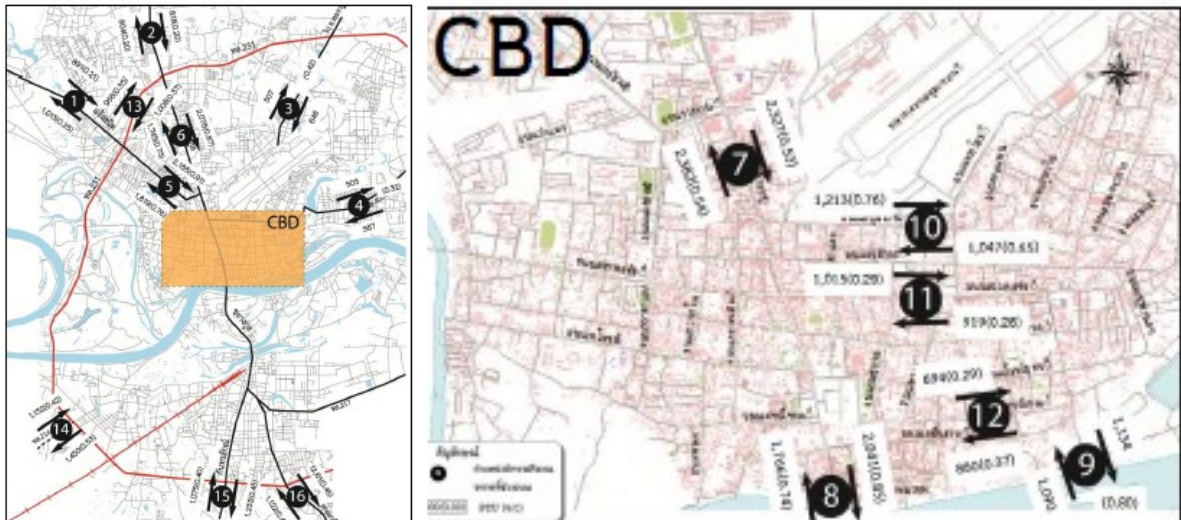


図 4-15 対象都市における交通量調査の観測地点

3 つ目の交通機関分担割合についても 2015 年にウボンラチャタニ市を対象として実施されたパーソントリップ調査の結果と、アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果から得られた交通機関分担割合と比較することで、その精度を検証した。

4.4 交通需要の推計結果と精度の検証

構築したアクティビティベースモデルの交通需要の推計結果の妥当性を検証するために、アクティビティベースモデルを適用して推定した定常時のアクティビティパターン数の割合と、第 3 章で示したアンケート調査から得られたアクティビティパターン数の割合を比較した。さらに、アクティビティベースモデルで推計した交通需要の結果を用いて実施した配分交通量と 2015 年に対象都市のパーソントリップ調査の付随調査として実施された観測交通量の結果を比較した²⁴⁾。その後、洪水発生時のアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計の有効性を示すために、四段階推定法とアクティビティベースモデルの OD 間交通量を比較した。最後に、定常時と洪水発生時のアクティビティベースモデルを用いた交通需要をそれぞれ推計した上で、総トリップ数および配分交通量を用いて比較した。

4.4.1 モデルの精度の検証と適用可能性

初めに、定常時のアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計が、実際の交通状態を表現しているか把握するために、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を比較した (表 4-12)。

表 4-12 アンケート調査とモデルから得られた定常時のアクティビティパターン数の比較

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 (%) (シミュレーション)	差 (%)
自宅→就業→自宅	34.68	32.93	-1.75
自宅→買い物→就業→自宅	13.06	5.3	-7.76
自宅→就業→買い物→自宅	2.9	4.1	1.20
自宅→就業→買い物→就業→自宅	31.45	29.4	-2.05
自宅→就学→自宅	71.88	67.8	-4.08
自宅→就学→買い物→自宅	16.67	15.96	-0.71
自宅→買い物→就学→自宅	5.21	0.425	-4.78
自宅→私事→自宅	9.57	17.9	8.33
自宅→送迎→自宅	7.45	6.7	-0.75
自宅→買い物→自宅	45.74	46.75	1.01
自宅	17.57	25.49	7.92

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、非就業者の自宅→私事→自宅の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ことが原因であると考えられる。結果として、一部のアクティビティパターンを除いて、定常時におけるアクティビティベースモデルによる推計結果とアンケート調査の結果の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ることを示し、十分に現況を表現することができていることを確認した。

次に、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（朝ピーク 1 時間（7:30-8:30）の観測交通量および夕ピーク 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、時間帯別 OD 表を作成した上で、配分交通量を計算し、それぞれの時間帯で比較した。初めに、図 4-16 に朝ピーク 1 時間（7:30-8:30）の配分計算を実施した結果および図 4-17 に配分交通量と観測交通量の比較した結果を示した。結果として、決定係数は 0.702 となり、比較的良好であった。



図 4-16 配分交通量と観測交通量の比較 1 (朝ピーク 1 時間)

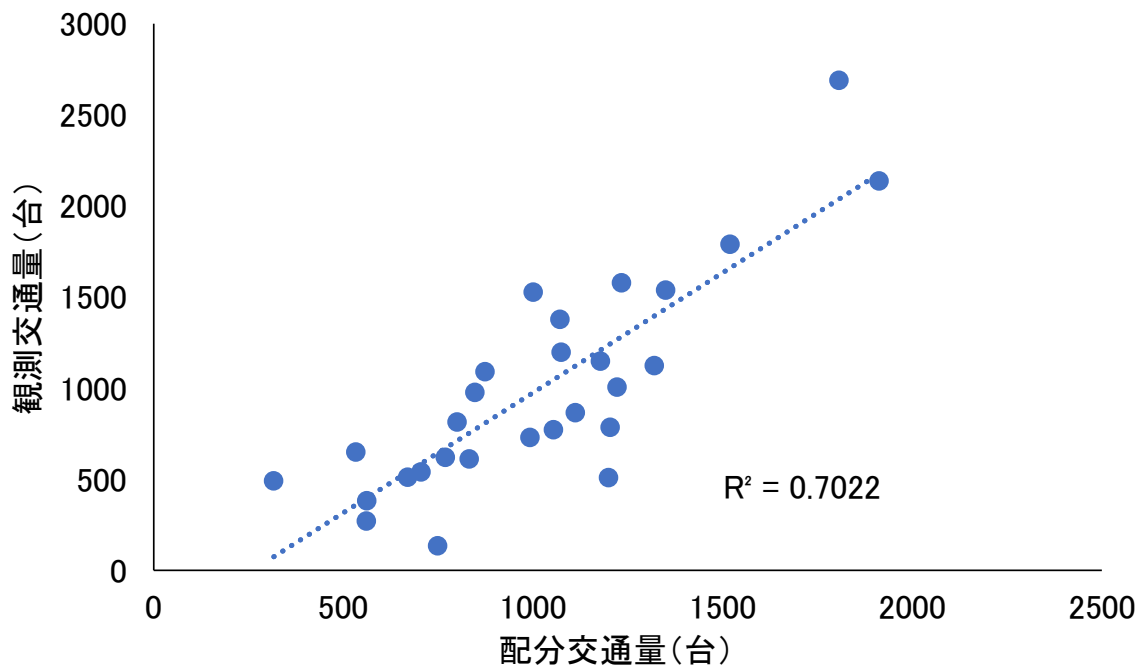


図 4-17 配分交通量と観測交通量の比較 2 (朝ピーク 1 時間)

次に、図 4-18 に夕ピーク 1 時間 (16:30-17:30) の配分計算を実施および図 4-19 に配分交通量と観測交通量の比較した結果を示した。結果として、決定係数は 0.892 となり、良好な結果が得られた。

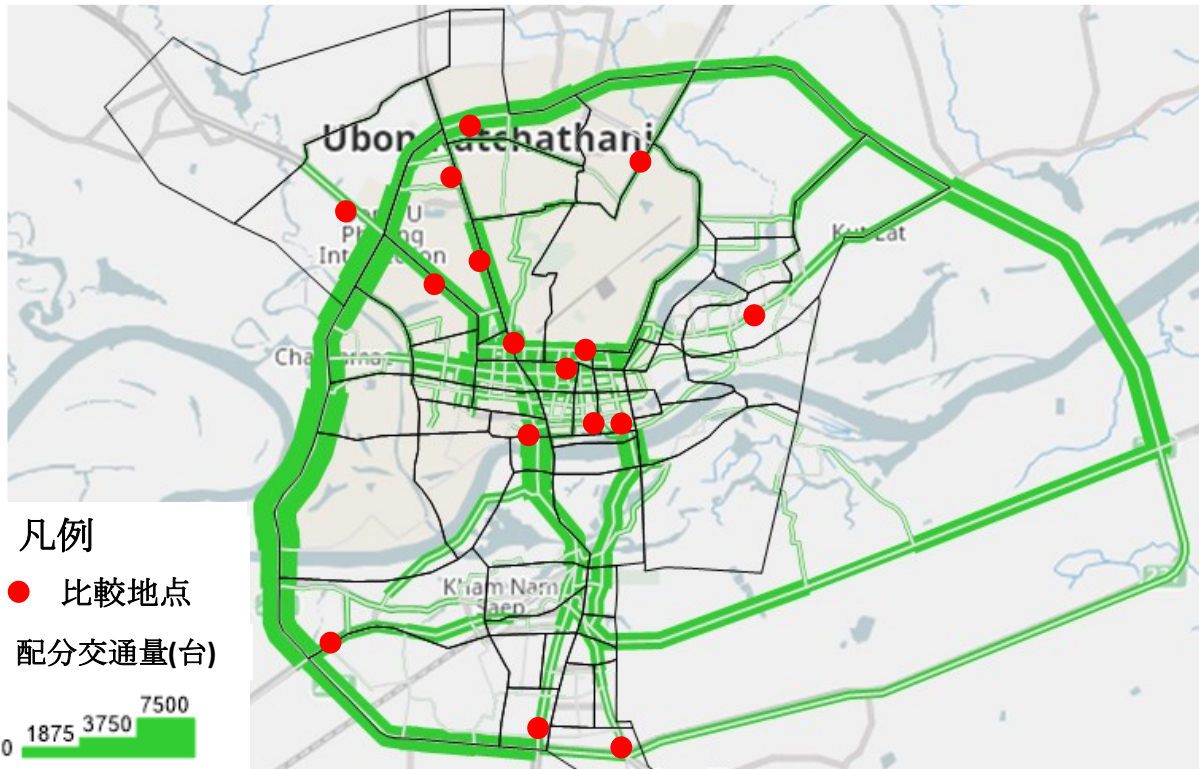


図 4-18 配分交通量と観測交通量の比較 1 (タピーク 1 時間)

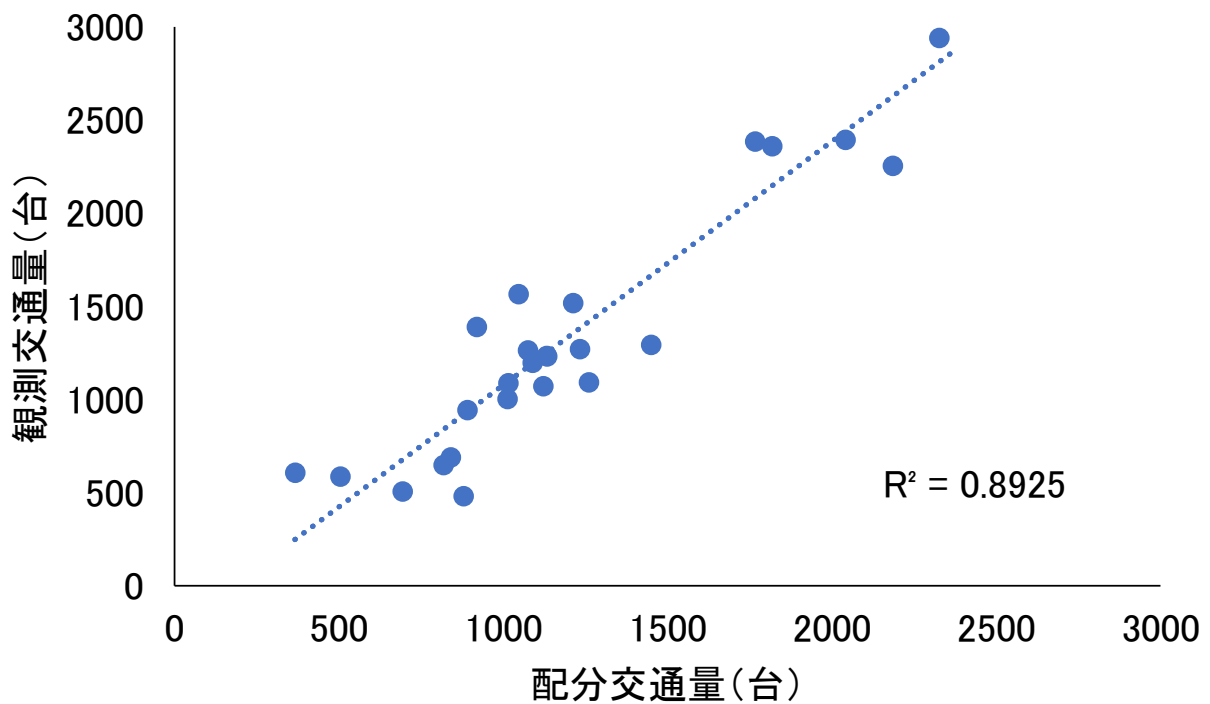


図 4-19 観測交通量と配分交通量の比較 2 (タピーク 1 時間)

また、定常時のアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果と 2015 年に実施されたパーソントリップ調査の結果から得られた交通機関分担割合の結果を比較した (表 4-13)。表を

みると、アクティビティベースモデルから得られた交通機関分担割合は、パーソントリップ調査の結果と概ね同様の傾向となっており、自動車や自動二輪車で移動している割合が多い状況を表現できている（なお、最大で誤差が3.52%）。これらの結果から、アクティビティベースモデルを用いた定常時の交通需要の推計については、現状の交通状態を再現できていることを確認した。

表 4-13 アクティビティベースモデルとパーソントリップ調査の交通機関選択割合の比較

交通機関	アクティビティベースモデル	パーソントリップ調査結果	差分
自動車	52.18	55.70	-3.52
自動二輪車	46.49	43.00	3.49
公共交通機関	0.88	1.10	-0.22
徒歩	0.45	0.20	0.25

(単位：%)

4.4.2 定常時と洪水発生時のアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果の比較

初めに、アクティビティベースモデルを用いた定常時の交通需要の推計と同様に、洪水発生時における交通需要を推計した。この結果から、就業者、就学者および非就業者の3つのタイプに分類し、定常時および洪水発生時のアクティビティパターン数を比較した（表 4-14）。

就業者に関しては、洪水発生時においては、就業時の休憩中に買い物または帰宅中に買い物をするパターン数が増加し、定常時よりも5,990回（5.12%）、6,505（5.57%）多く推計された。一方で、自宅から就業地からそのまま自宅に帰宅するパターンは、13,440回（-11.5%）減少すると推計した。これは、洪水が発生したことによって、外出する必要がある人が自宅に帰宅すると同時に立ち寄りを行ったことが挙げられる。

就学者については、洪水発生時には、大きな変化がないことを示した。この結果から、都市洪水が発生した際のアクティビティパターンの変化は、各タイプによって大きく異なることを示した。

非就業者については、私事や買い物を含むアクティビティのパターン数が3,698（-3.07%）、8,616（-6.84%）回程度減少する。これは、洪水発生時の移動が制限される中で、世帯の同居する人に立ち寄りのアクティビティ（買い物等）を同居者が行い、自身は移動をとりやめている状況を表している。また、すべての人々の1日中自宅に滞在するパターン数は14,797（5.97%）増加しており、特に、非就業者の移動のとりやめが中でも大きいことを示した。また、アクティビティベースモデルを用いた場合には、洪水の発生による影響を受けないゾーンへアクセスするように変化していることを確認した。

表 4-14 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	移動目的	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:116,869)	自宅→就業→自宅	通勤・帰宅	38494 [32.94%]	25054 [40.61%]	-13440 [-11.5%]
	自宅→買い物→就業→自宅	通勤・私事・帰宅	4845 [4.15%]	6573(30) [5.62%]	1728 [1.47%]
	自宅→就業→買い物→自宅	買い物・通勤・帰宅	6238 [5.34%]	12228(40) [10.46%]	5990 [5.12%]
	自宅→就業→買い物→就業→自宅	通勤・買い物・帰宅	34386 [29.42%]	40891(193) [34.99%]	6505 [5.57%]
就学者 (合計:46,137)	自宅→就学→自宅	通学・帰宅	31285 [67.81%]	32363 [70.15%]	1078 [2.34%]
	自宅→就学→買い物→自宅	通学・その他・帰宅	1963 [4.25%]	945(10) [2.05%]	-1078 [-2.2%]
	自宅→買い物→就学→自宅	その他・通学・帰宅	7364 [15.96%]	6409(65) [13.89%]	-955 [-2.07%]
非就業者 (合計:88,366)	自宅→私事→自宅	買い物・その他・帰宅	16810 [17.91%]	13112(380) [14.84%]	-3698 [-3.07%]
	自宅→送迎→自宅	その他・送迎・帰宅	6304 [6.72%]	6142(151) [6.95%]	-162 [-0.23%]
	自宅→買い物→自宅	買い物・帰宅	43880 [46.75%]	35264(869) [39.91%]	-8616 [-6.84%]
	自宅	—	65544 [25.49%]	80341 [31.25%]	14797 [5.76%]

次に、定常時（図 4-20）と洪水発生時（図 4-21）のそれぞれで交通量の配分を行い、差分を算出した結果を図 4-22 に示す。結果として、2019 年の洪水発生時の中央の 2 つの橋を含む、河川周辺の道路区間が冠水し、寸断したため東側バイパスが迂回路として移動している（1 日あたり約 5,000 台）が、一部の交通は、速度が低下した西側バイパスを通行している。また、本論文で使用したアクティビティベースモデルでは、交通状況の変化を考慮することができる目的地選択モデルが含まれており、河川周辺の洪水による浸水の影響を大きく受ける地域（図中青丸部分）から都市中心部（図中赤丸部分）に集中交通量が移動した。このことから、浸水深が高いゾーンを避けて目的地を選択していることを示した。

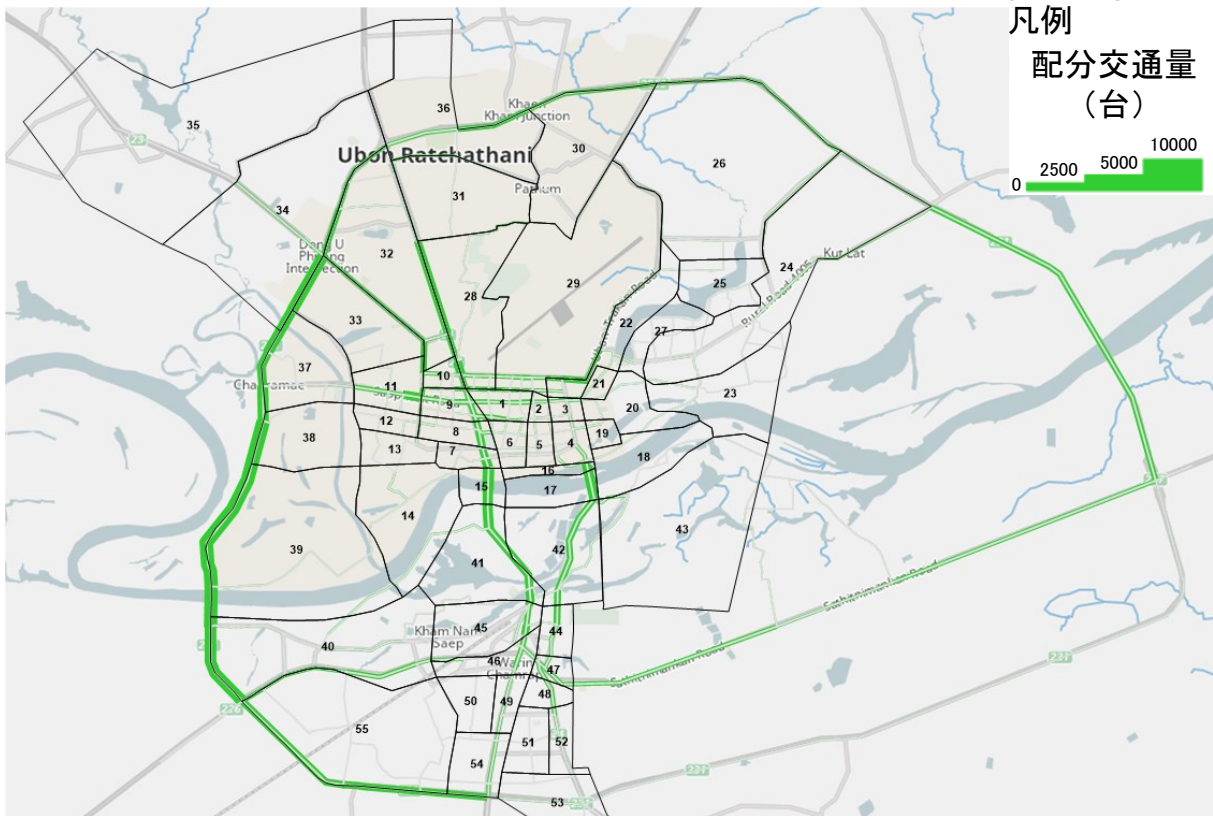


図 4-20 定常時におけるアクティビティベースモデルを用いた交通量配分の結果

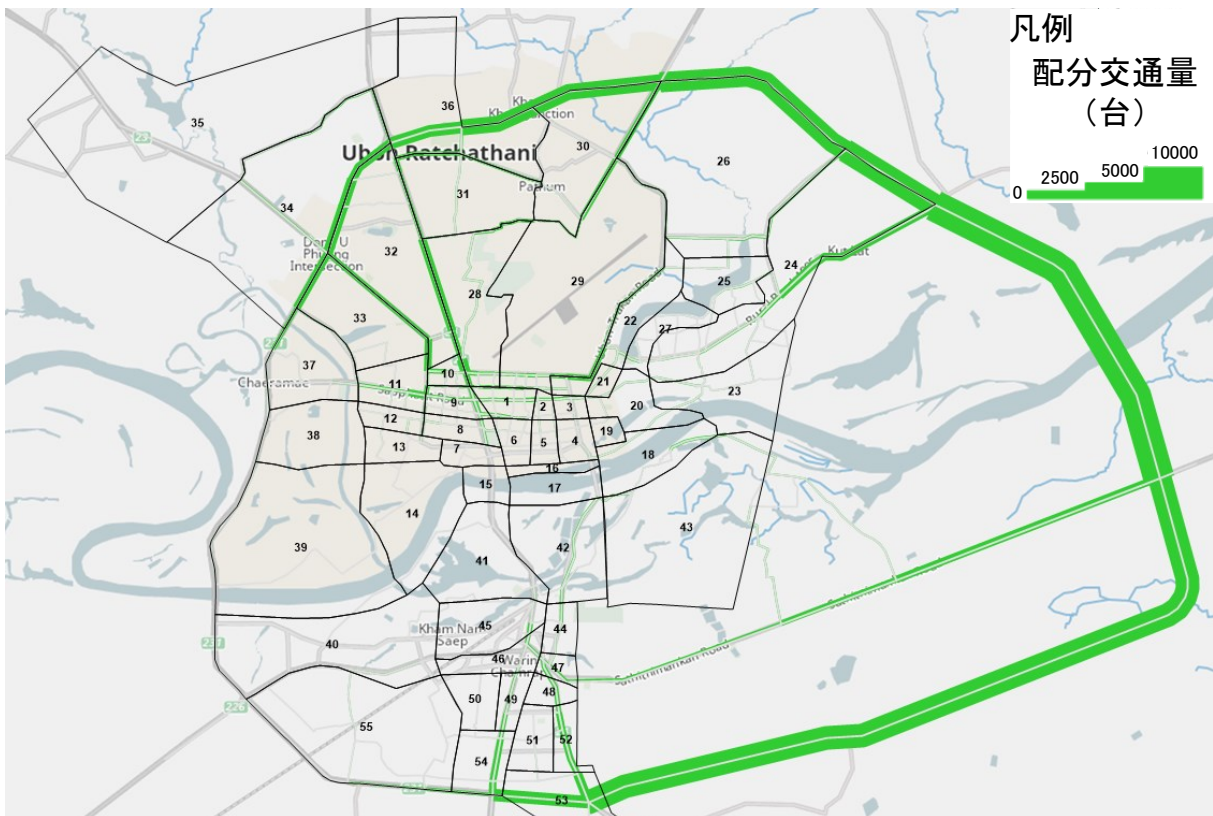


図 4-21 洪水発生時におけるアクティビティベースモデルを用いた交通量配分の結果

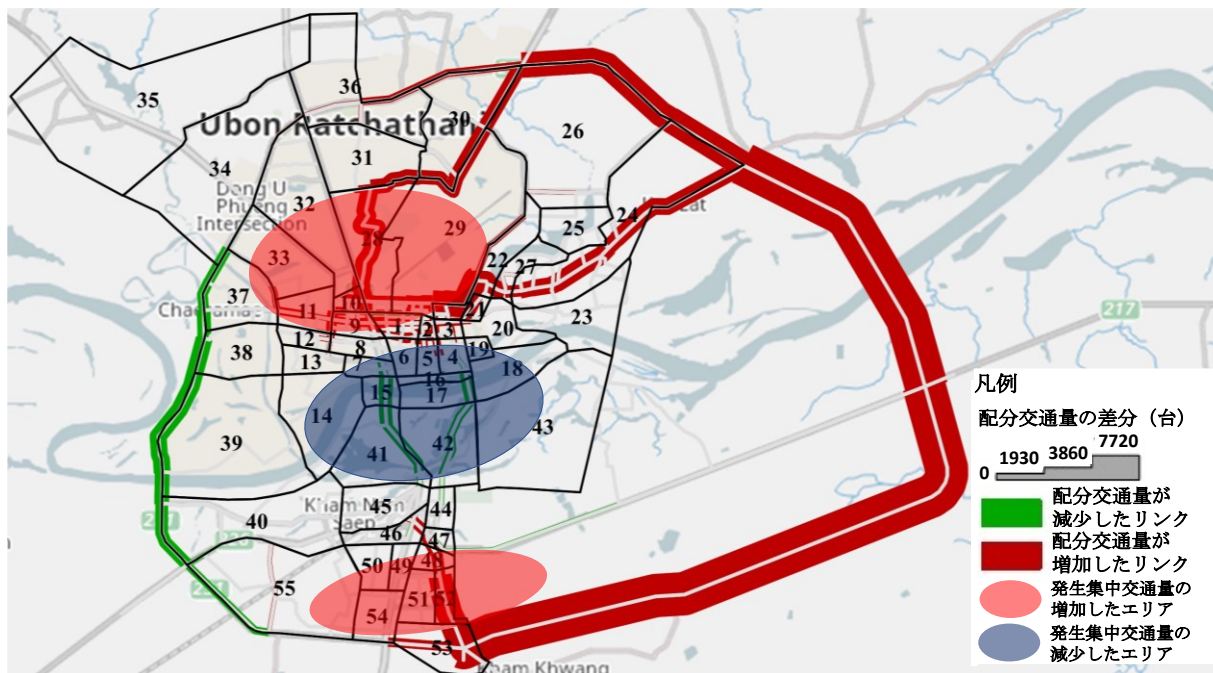


図 4-22 アクティビティベースモデルを用いた定常時と洪水発生時の配分交通量の増減

4.4.3 洪水発生時の四段階推定法とアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果の比較

洪水発生時のアクティビティベースモデルによる交通需要の推計結果と従来の四段階推定法の交通需要の推計結果の変化を把握するために、2015年に実施されたパーソントリップ調査のデータに基づいて、四段階推定法を用いて交通需要を推計した。洪水が発生した際の道路ネットワークへの影響の表現については、アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計と同様に、浸水深に基づいて速度低下および通行止めの状態として、各リンクに情報（サービスレベル）を与え、推計した。なお、四段階推定法を用いた交通需要の推計時のOD表については、定常時と同様のデータに基づいて推計した。

これら2つの推計から得られた交通量（自動車と自動二輪車の総計）から作成した希望線図を図4-23および図4-24に示す。なお、希望線図作成時には、20トリップ以下の線は除外して表示し、それぞれの線の太さは、OD間交通量の総量を表している。

結果として、四段階推定法による交通需要の推定結果と、アクティビティベースモデルを用いた推計結果を比較すると、アクティビティベースモデルを用いた推計結果では、ゾーン32-35および50・53へのOD間交通量が増加する一方で、ゾーン17-22および39のOD間交通量が減少している。これは、四段階推定法を用いた交通需要の推計では考慮出来ない目的地の変更や外出の取りやめを含むアクティビティの変化について、アクティビティベースモデルを適用して交通需要を推計した場合には、考慮して分析できたためである。特に、買い物目的による目的地が、比較的地盤の高いところに立地する大型商業施設があるゾーン37、50および53に、変更されていることが読み取れる。また、アクティビティベースモデルを適用した場合は、都市の中心の移動から影響の少ない郊外部へと目的地を変更されている状況を表現することができた。

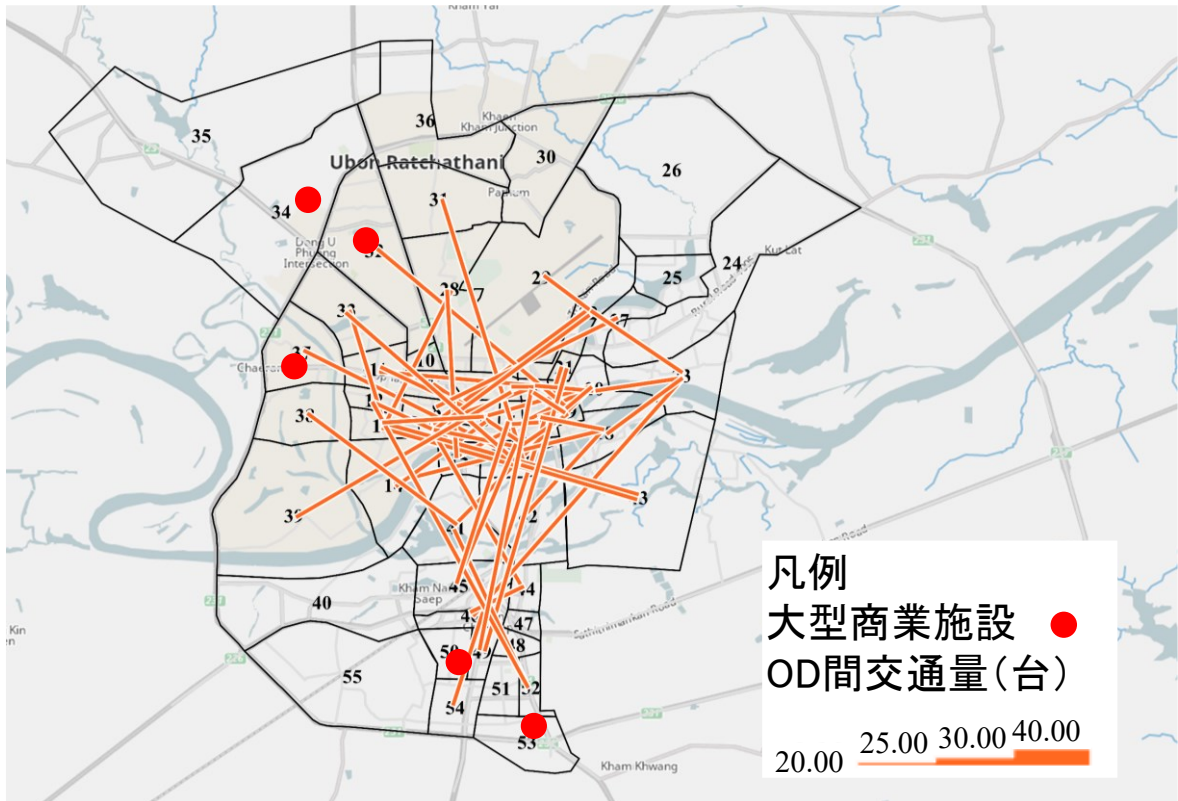


図 4-23 洪水発生時の四段階推定法を用いた希望線図

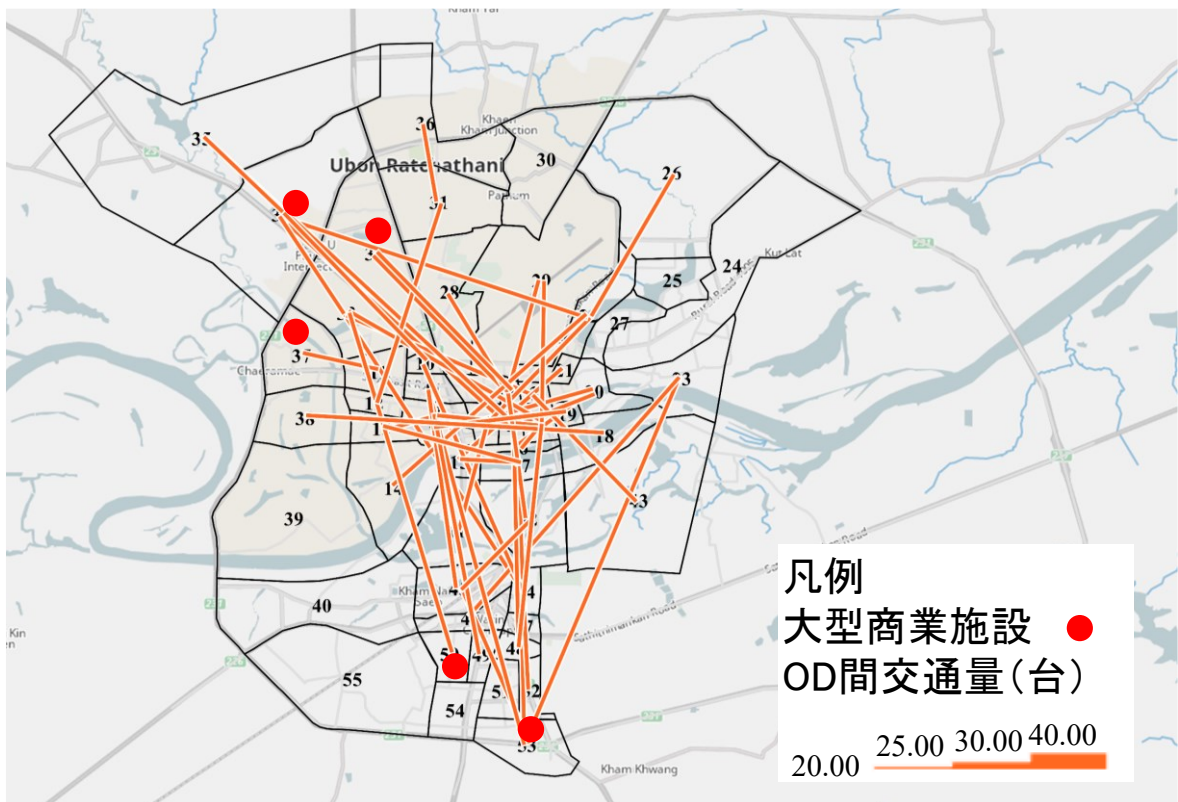


図 4-24 洪水発生時のアクティビティベースモデルを用いた希望線図

4.5 第4章まとめ

本章では、洪水発生時の交通需要の推計に向けて、これまでの集計的な交通需要の推計手法（四段階推定法）の問題点を指摘した上で、アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計手法と比較した。そして、これまでに既存文献で開発されてきたアクティビティベースモデルを整理した上で、ハイブリット型モデルの **Mobi.plan** モデルをベースモデルとして選択し、このモデルを改良および新たなモデルの開発によって、洪水発生時の交通需要の推計手法を確立した。また、改良したアクティビティベースモデルをウボンラチャタニ市で適用し、構築したモデルの精度を検証した。その後、定常時と洪水発生時のそれぞれの交通需要を推計し、比較分析した。

はじめに、アクティビティベースモデルを用いて推計した交通需要の精度を検証するために、モデルから生成された定常時のアクティビティパターン数の割合と第3章で示したアンケート調査結果と比較した。結果として、ほとんどのアクティビティパターンを誤差5%以内（ただし、一部のパターンでは、最大8%程度）で生成することができた。また、定常時のアクティビティベースモデルの交通需要の推計結果から、朝ピークおよび夕ピーク1時間の交通量を抜き出して、配分交通量の計算を行った結果と、2015年に対象都市で実施された16地点の観測交通量の結果と比較した。結果として、決定係数は0.702、0.8925となった。さらに、アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計結果から得られた交通機関分担割合と、パーソントリップ調査の結果から得られた交通機関分担割合を比較したところ、最大誤差3.5%以下となった。これらの結果から、概ね対象都市における交通状態を表現することができることを確認した。

そして、アクティビティベースモデルを用いた洪水発生時の交通需要の有効性を示すために、本論文で改良したアクティビティベースモデルとアクティビティの変化を考慮しない四段階推定法を用いた交通需要の推計結果から得られた、OD間交通量を用いて希望線図を作成し、比較した。その結果、アクティビティベースモデルによる交通需要の推計では、四段階推定法を用いた場合には表現することができなかつたアクティビティの変化を十分に表現し、交通需要を推計できることを示した。

最後に、アクティビティベースモデルを用いた定常時と洪水発生時の交通需要を比較することで、洪水発生時における交通需要への影響を分析した。結果として、定常時から洪水の発生によって、総トリップ数が約10%減少し、5,000台程度が東側バイパスを利用して迂回する必要があることを示した。

これらの結果から、洪水発生時の交通需要の推計手法を確立できたことを示し、洪水発生時にはアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計が有効であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 北村隆一：交通需要予測の課題：次世代手法の構築に向けて，土木学会論文集，No.530-IV/30，17-30，1996.
- 2) Xiaojing Dong, Moshe E. Ben-Akiva, John L. Bowman, Joan L. Walker: Moving from Trip-based to Activity-based Measures of Accessibility, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.40, Issue 2, pp.163-180, 2006.
- 3) Sadayuki Yagi, Abolfazl (Kouros) Mohammadian: An Activity-Based Microsimulation Model of Travel Demand in the Jakarta Metropolitan Area, *Journal of Choice Modelling*, 3(1), pp.32-57, 2009.
- 4) 藤井聡，大塚祐一郎，北村隆一，門間俊幸：時間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.
- 5) 藤井聡，菊池輝，北村隆一：マイクロシミュレーションによる CO₂排出量削減に向けた交通施策の検討：京都市の事例，交通工学，Vol.35，No.4，11-18，2000.
- 6) John L. Bowman, Moshe E. Ben-Akiva: Activity-based Disaggregate Travel Demand Model System with Activity Schedules, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(1), 1-28, 2000.
- 7) 布施孝志，原田遼：詳細な交通行動推定のためのアクティビティシミュレーションと観測データの統合に関する研究，土木計画学論文集 D3 (土木計画学)，Vol.75，No.5 (土木計画学研究・論文集第 36 号)，I_575-I_583，2019.
- 8) Theo Arentze, Frank Hofman, Henk Van Mourik, Harry Timmermans: ALBATROSS: Multiagent, Rule-based Model of Activity Pattern Decisions, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1706 (1), 136-144, 2000.
- 9) Eric J. Miller, Matthew J. Roorda: A Prototype of Household Activity/Travel Scheduling, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1831(1), 114-121, 2003.
- 10) Matthew J. Roorda, Eric Miller, Khandker Nurul Habib: Validation of TASHA: A 24-h Activity Scheduling Microsimulation Model, *Transportation Research part A: Policy and Practice*, 42(2), 360-375, 2008
- 11) Farhana Yasmin, Catherine Morency, Matthew J. Roorda: Assessment of Spatial Transferability of Activity-based Model, TASHA, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78, 200-213, 2015.
- 12) Wolfgang Scherr, Patrick Manser, Patrick Butzberger: SIMBA MOBI: Microscopic Mobility Simulation for Planning, *Transportation Research Procedia*, Vol.49, pp.30-43, 2020.
- 13) Theo A. Arentze, Harry J. Timmermans: A Learning-based Transportation Oriented Simulation System, *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(7), pp.613-633, 2004.
- 14) Andreas Horni, Kai Nagel, Kay W. Axhausen: *The Multi-Agent Simulation MATSim*, Ubiquity Press, 620pp.
- 15) Deming W. Edwards, Stepan F. Frederick: On a Least Square Adjustment of a Sampled Frequency Table When the Expected Marginal Totals are Known, *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(4), 427-444, 1940.
- 16) Richard J. Beckman, Keith A. Baggerly, Michael D. McKay: Creating Synthetic Baseline Populations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 30, Issue 6, pp.415-429, 1996.

- 17) 倉内慎也, 萩尾龍彦, 石村龍則, 吉井念雄: 世帯および個人属性分布を考慮した PT 調査データの拡大係数算出手法の適用, 土木計画学論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, (土木計画学研究・論文集第 28 巻), I_759-I_767, 2011.
- 18) 花岡和聖: 焼きなまし法を用いたパーソントリップ調査データの拡大補正法に関する研究—平成 12 年度京阪都市圏パーソントリップ調査データを用いて—, 都市計画論文集, No.41-3, pp91-96, 2006.
- 19) 花岡和聖: 全国版の小地域マイクロデータの構築と災害分析への活用—国勢調査・匿名データの利用—, 地域安全学会論文集, No.29, pp.247-255, 2016.
- 20) 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.
- 21) iTIC Foundation “Historical Raw Vehicle and Mobile Probes Data in 2019”, <https://www.iticfoundation.org/>(Last Accessed in September 2022).
- 22) Noriyasu Tsumita, Sittha Jaensirisak, Hiroki Kikuchi, Atsushi Fukuda: Analysis of Travel Behaviors during Floods in Ubon Ratchathani City, Thailand, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 832, 012034, 2021.
- 23) Sentinel Asia Thailand floods in Sept.2019 <https://sentinel-asia.org/EO/article20190920TH.html>, Last Accessed in September 2022.
- 24) Geoffrey Hilly, Zoran Vojinovic, Sutat Weesakul, Arlex Sanchez, Duc Nguyen Hoang, Slobodan Djordjevic, Albert S. Chen and Barry Evans: Methodological Framework for Analysing Cascading Effects from Flood Events: The Case of Sukhumvit Area, Bangkok, Thailand, Water, 10, 81, 2018.
- 25) The Office of Transport and Traffic Policy and Planning. The Study of the Master Plan Development of the Public Transportation Systems in Cities, Regions of the Country, Thailand, 37 pp. (In Thai).

第5章 洪水の発生に対する適応策の整理とシナリオの設定

本章では、適応策のうち順応策と撤退策について、既存のガイドラインや既存文献等を用いて整理した。この中から評価する適応策を選定した上で、複数の適応策シナリオを設定した。また、各適応策シナリオにおける選定した適応策の導入の検討方法については、順応策は、優先付け方法に関する研究を整理した上で、新たにアクセシビリティ指標に基づく優先付け方法を提案し、その結果に基づき適応策の導入する道路区間の選定した。また、撤退策は、移転行動のモデル化を行った上で、移転世帯を設定した。これらの結果から適応策の評価に向けた優先順位付け手法の提案およびシナリオの設定を行った。

5.1 洪水の発生に対する適応策の整理と選定

都市洪水の発生に対する適応策のうち本論文で評価する順応策と撤退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。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)）¹⁾、我が国における気候変動適応計画²⁾、European Environment Agency³⁾、アジア開発銀行が発行している適応策に関する報告書⁴⁾および既存文献^{5),6)}で示された順応策と撤退策を表 5-1 にまとめた。

表 5-1 洪水の発生に対する順応策および撤退策の整理

区分	適応策
順応	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
撤退	ピロティ建築(高床式住居)
	洪水ハザードマップの提供
	水害リスクによる移転促進
	建築規制

この中から、順応策として“道路嵩上げ政策”および“ピロティ建築（高床式）”と撤退策として“浸水リスクを考慮した移転促進政策”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。例えば、2011年のタイ・チャオプラヤ川の氾濫によって発生した大洪水後にバンコク郊外の国道9号線を対象として適用された事例がある(図 5-1)⁷⁾。また、カンボジア国道1号線についても洪水に対して適応するために、一部区間で導入が検討されている(図 5-2)⁸⁾。この他にも、我が国においても同様に、洪水が発生した際にモビリティを確保するための対応として道路の嵩上げが広く検討や導入されている(図 5-3)⁹⁾。また、対象都市においても既にバイパスの一部区間を対象として実施されてお

り, 導入に際しての実行可能性が比較的高いため, 本論文で評価する順応策として選定した(図 5-4).



図 5-1 道路嵩上げ政策の導入例 1 (タイ王国・国道 9 号線)



図 5-2 道路嵩上げ政策の導入例 2 (カンボジア王国・国道 1 号線)



図 5-3 道路嵩上げ政策の導入例 3 (日本・国道 175 号線)



図 5-4 道路嵩上げ政策の導入例 4 (タイ・ウボンラチャタニ)

また、ピロティ建築（高床式住居）については、道路の嵩上げを行った際にも変わらずにアクセスできるように設定する。そのため、ピロティ建築の導入にあたっては、後述する優先度が高く嵩上げ政策を導入すると選定された区間の沿道を対象に実施することを想定した。これまで、洪水の発生に対応した住居の形態として図 5-5 に示す 4 つの分類（①宅地の嵩上げ、②高床、③囲む、④建物防水）が提案されている¹⁰⁾。この中で、本論文では、ピロティ建築を選定した上で、評価した。これら 2 つの順応策を導入した場合のイメージについて図 5-6 および図 5-7 に示す。図で示すように、道路嵩上げを実施することで、都市のモビリティを確保しながら、家屋から道路へのアクセスも目指すことを目的としている。

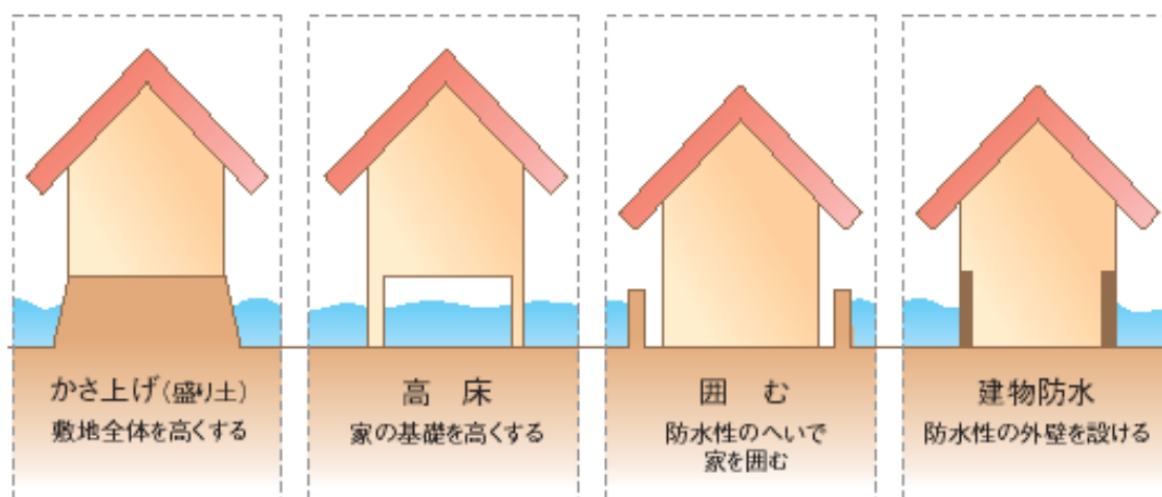
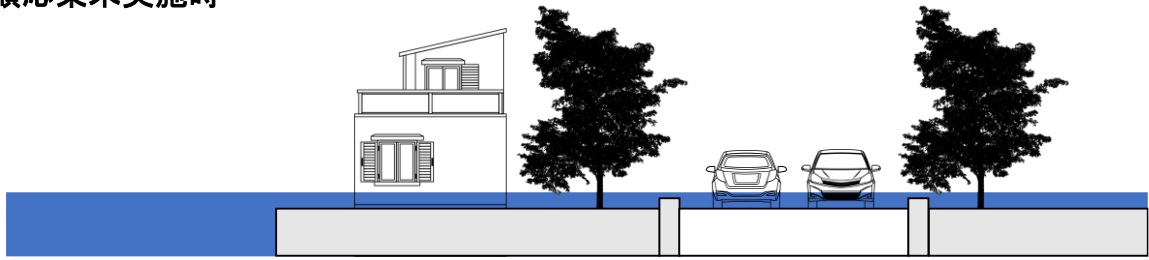


図 5-5 洪水の発生に対応する家屋の分類

順応策未実施時



順応策実施時

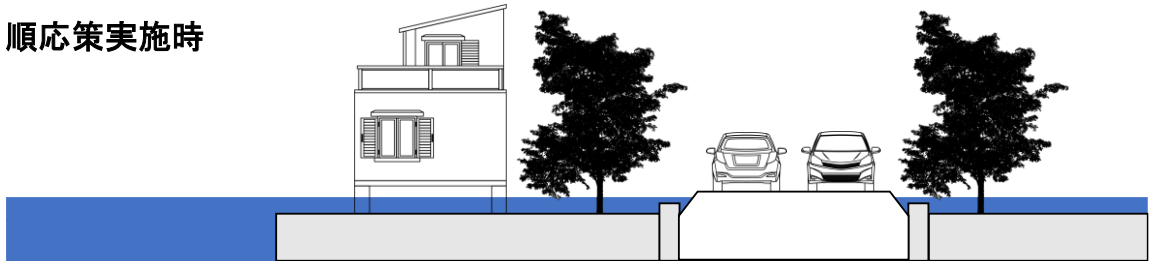


図 5-6 本論文で実施する道路嵩上げ政策の導入時のイメージ 1

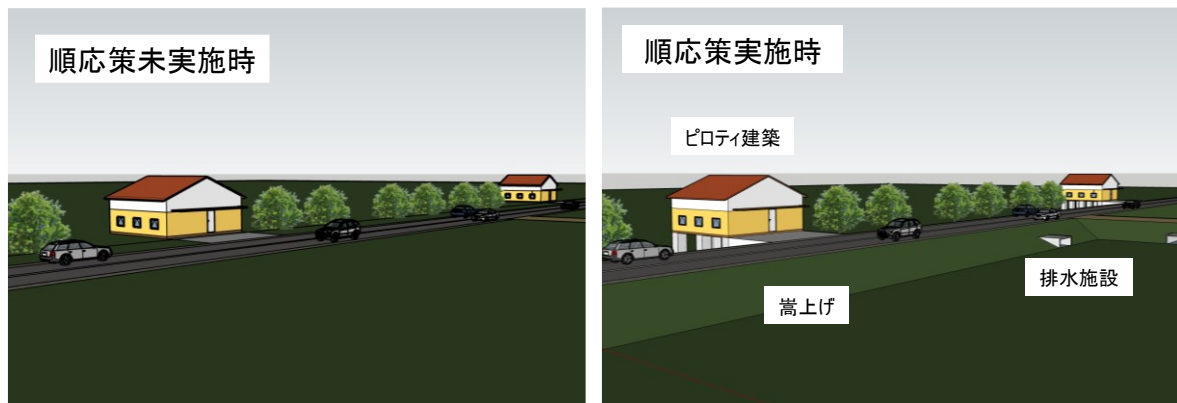


図 5-7 本論文で実施する道路嵩上げ政策の導入時のイメージ 2

図 4-6 に示したように、ウボンラチャタニ市で洪水が発生した際の浸水深は、我が国の洪水発生時と比較すると、最大浸水深は高くはない。しかし、洪水発生時には、我が国と比較して非常に長期間（1 ヶ月以上）に亘って洪水の影響が生じる状態が継続する。そのため、住民の都市生活に甚大な影響を及ぼすことが今後も想定されるため、浸水リスクを考慮した移転促進政策を選定した。

浸水リスクを考慮した移転促進政策のような土地利用に関連する政策として、タイ・コンケン市でも雨季に洪水の発生が深刻化しているため、都市化区画上で特に洪水の被害が大きな都市の東側の地域を対象として、新たな開発の規制が設定された事例¹¹⁾がある（図 5-8）。図中では、コンケン市における 2017～2020 年に策定された土地利用計画について示しているが、都市の東側には、ウボンラチャタニ市を流れるムン川に注ぐチー川が流れており、ウボンラチャタニ市と同様に雨季には洪水が発生し、深刻な被害が発生している¹¹⁾。そのため、コンケン市では、これらのエリアの開発を規制する計画（図中網掛け部分）が策定されたという経緯がある。

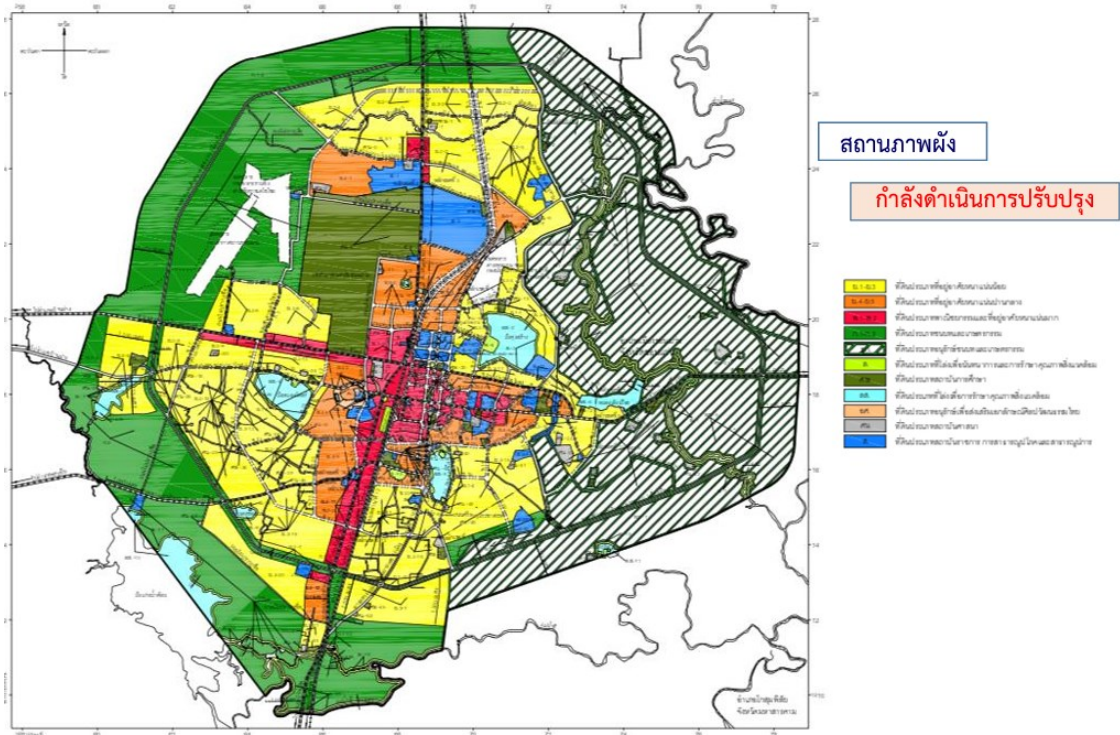


図 5-8 タイ・コンケン市における洪水を考慮した土地利用計画の策定例

また、フィリピン・カガヤンデオロ市でも 2011 年の台風センドンによって、深刻な被害を受けた中心市街地から地方政府や NGO が主導となって、郊外部の洪水の被害を受けない地域まで集団移転した例¹²⁾がある(図 5-9)。カガヤンデオロ市では、台風による被害が非常に甚大であり、堤防の整備等も進められているが、同時に、洪水が発生した際の浸水のリスクが高いエリアから郊外の標高が高いエリアへの移転の計画が検討され、実際に一部の住民については、中心部から郊外部へ移転した。そのため、浸水リスクを考慮した移転促進政策については、対象都市だけでなく、多くの東南アジア諸国の都市で適用可能性が高いと判断し、評価対象として選定した。



図 5-9 フィリピン・カガヤンデオロ市で実施された移転政策の移転先の住居

5.2 適応策シナリオの設定

前節で選定した道路嵩上げ政策と浸水リスクを考慮した移転促進政策の導入効果を評価するために、表 5-2 に示すように複数の適応策シナリオを設定した。具体的には、道路嵩上げ政策のみを実施した場合をシナリオ A として、後述する優先順位付けの結果に基づいて、優先度中（シナリオ A1）と優先度高（シナリオ A2）および優先度中+高（シナリオ A3）を実施した場合の 3 パターンを設定した。また、浸水リスクを考慮した移転促進政策のみを実施した場合をシナリオ B として、浸水深に基づいて浸水リスクが中のゾーン（シナリオ B1）または中+高のゾーン（シナリオ B2）に移転促進政策を適用した場合の 2 パターンを設定した。そして、上記の道路嵩上げ政策と移転促進政策を同時に導入した場合の効果を把握するために、政策を組み合わせた場合のケースをシナリオ C として設定し、道路嵩上げ政策の優先度高および中+高と移転促進（中ゾーン）を実施する 2 つのケース組み合わせたシナリオ C1 および C2 と道路嵩上げの優先度高および中+高と移転促進策（中+高ゾーン）を実施する 2 つのケース組み合わせたシナリオ C3 および C4 の計 4 つを設定した。さらに、これに加えて、洪水発生時に適応策を実施しない場合とこれまでに同都市で実施された東側バイパスの嵩上げを実施しなかった場合、浸水深が従来よりも 0.5m 低下した場合のシナリオを設定した。これらの設定した各シナリオの推計結果と定常時の推計結果を比較することで、適応策の導入効果を定量的に示した。

表 5-2 設定した適応策シナリオ一覧表

シナリオ	パターン設定	導入政策
A	A1: 優先度中の道路区間に導入	道路嵩上げ政策（順応）
	A2: 優先度高の道路区間に導入	
	A3: 優先度中+高の道路区間に導入	
B	B1: 浸水リスク中のゾーンを対象に移転を促進	浸水リスクを考慮した移転政策（撤退）
	B2: 浸水リスク中+高のゾーンを対象に移転を促進	
C	C1: A2 × B1	上記の組み合わせ（順応+撤退）
	C2: A2 × B2	
	C3: A3 × B1	
	C4: A3 × B2	
洪水あり	-	-
洪水あり— 東側バイパス	-	東側バイパスの整備なし
洪水あり— 浸水深0.5m	-	洪水発生時に浸水深を0.5m低下
洪水なし	-	定常時

5.3 適応策の実施に向けた優先付けの方法の検討と結果

前節では、道路嵩上げ政策と浸水リスクを考慮した移転促進政策を実施した場合の導入効果を推計するために、複数の適応策シナリオを設定した。洪水の発生に対する適応策の導入を洪水に

よる影響を受けるすべての道路区間や地域を対象として実施することが、適応策の費用や政策導入による経済的な効率性を考慮しない場合には、影響を最小化できる手段となる。しかし、現実的には、適応策を実施するために予算配分を得ることは難しいため、これまで多くの既存文献で優先順位付け手法が検討されている。そこで、本論文では、優先順位づけ手法を整理した上で、それぞれの適応策の導入に向けて優先付け方法を検討し、その結果に基づいて優先的に順応策や撤退策を導入が必要であると判断された区間やエリアを示した。

5.3.1 道路嵩上げ政策を導入する場合の優先順位付け方法の提案とその適用

これまで、多くの既存文献¹³⁾¹⁷⁾で自然災害などの被災によって影響を受けた道路区間の効率的な整備に向けて優先付け方法の検討および開発がされてきており、様々な方法が提案されてきた。その中で、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。例えば、大澤ら¹⁸⁾は、災害の発生によって影響の受ける道路区間の優先順位付けの評価基準として、①時間的距離・空間的距離が平時に近くなる道路ほど効果が高い、②整備による各地域におけるサービス機会への間接的または空間的な近接性が平時に近いほどが高いという2つを設定した上で、それらを分析する必要があることを述べた。また、この文献では、災害発生時における道路の整備によるアクセシビリティ改善量を旅行時間の短縮量として定義し、道路整備の優先順位付けの設定手法を開発した上で、熊本都市圏を対象として適用している。また、Talyorら¹⁹⁾は、提案したアクセシビリティ指標と一般化費用等に基づいて、オーストラリアの主要な道路ネットワークに対する整備による都市間のアクセシビリティの改善度を評価した。

そこで、本論文では、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割合として算出した。具体的には、図5-10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(第4章で示した配分用交通ネットワーク)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表現し、そのネットワークを利用して分析した。具体的には、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て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として表現した。本論文では、第4章で示した浸水深と旅行速度の関係を表す関数と浸水深データを用いて、各ゾーンの中心からアクセス可能な施設数を算出することで、分析した。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5-1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、第4章で示したアクティベースモデルの結果から得られたそれぞれの施設の訪問回数に基

づいて重みづけを行った(式5-2)。その後、都市全体でのアクセシビリティを算出(式5-3)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5-4)。

$$ACC_i = \frac{\sum_{f=1}^n ACC_{if}}{X_f} \quad \text{式5-1}$$

subject to $T_{ij} \leq 15$

ここで、ACC=アクセシビリティ、i=ゾーン、f=施設タイプ

$$ACC_{ivf} = \frac{\sum_{a=1}^i ACC_{a,f}}{\sum_{a=1}^t ACC_{a,f}} \quad \text{式5-2}$$

ここで、a:各施設の利用回数、t: 施設タイプ f の総利用回数

$$TA = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^f ACC_{ivf} \quad \text{式5-3}$$

ここで、TA:都市全体のアクセシビリティ

$$TAR^{with} = \frac{TA^{with} - TA^{without}}{TA^{usual} - TA^{without}} \quad \text{式5-4}$$

ここで、 TAR^{with} : 道路嵩上げを実施した場合のアクセシビリティの改善率、**With** : 道路嵩上げの実施あり、**Without** : 道路嵩上げの実施なし

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5-10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。

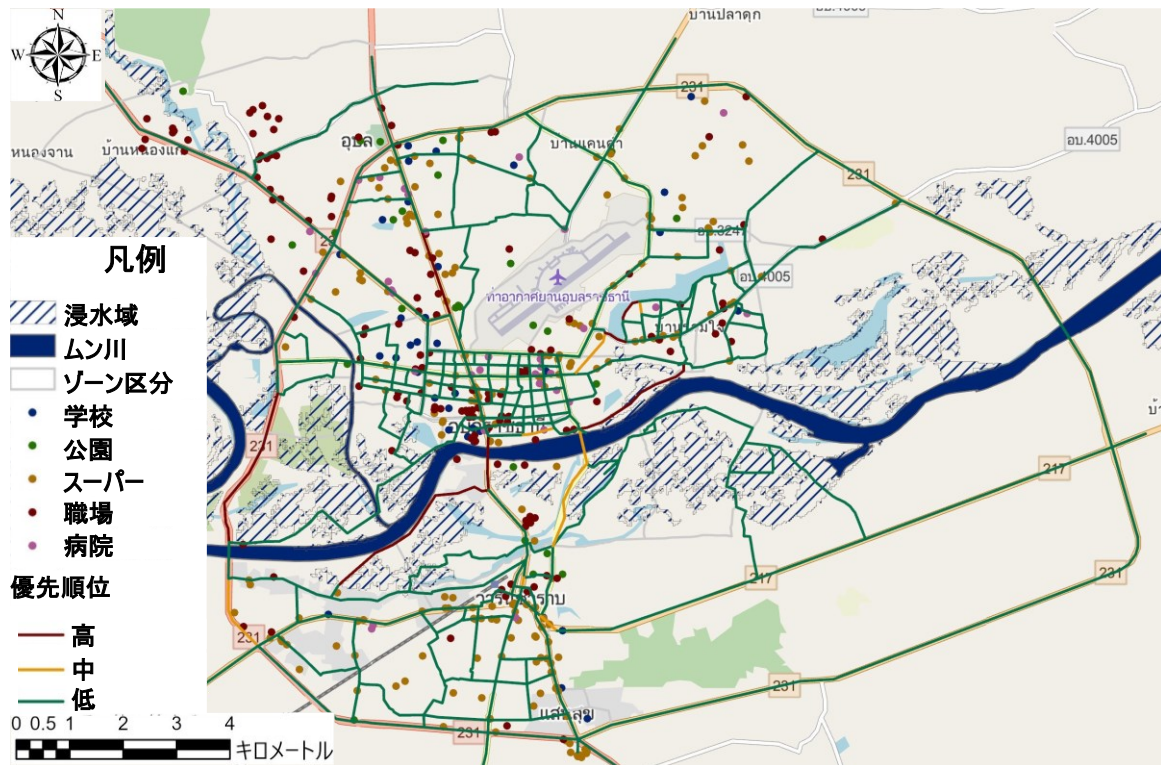


図 5-10 道路嵩上げを実施する場合の優先順位付けの結果

5.3.2 浸水リスクを考慮した移転政策を導入する場合の移転世帯の設定方法

選定した撤退策である浸水リスクを考慮した移転政策を実施する際に移転する世帯を設定するために、浸水深が大きなゾーンに移転選択モデルを適用した。本論文では、図 4-14 に示した浸水深に基づいて、リスク高：浸水深が 0.51m 以上の場合のゾーン（17, 18, 41, 42, 43）、リスク中：浸水深が 0.31m 以上の場合のゾーン（14, 15, 16, 38, 39, 40, 44, 45）として設定した（図 5-11）。リスク中の場合には、住宅地への浸水による影響は比較的小さいが、浸水深が 0.31m 以上になった場合には人々の移動が困難となり、モビリティが著しく低下する。そのため、この値を閾値として設定した。また、リスク高の場合には、住宅地への浸水する可能性が高く、床上浸水にならずとも床下浸水が発生する可能性がある。上記に示した浸水深の値は、我が国における値と比較すると、低くなっているが、非常に長期間（1 か月以上）に亘って洪水の影響が生じた状態が継続する。そのため、都市生活への影響は甚大なものとなっている。したがって、本論文ではこのように閾値を設定した。

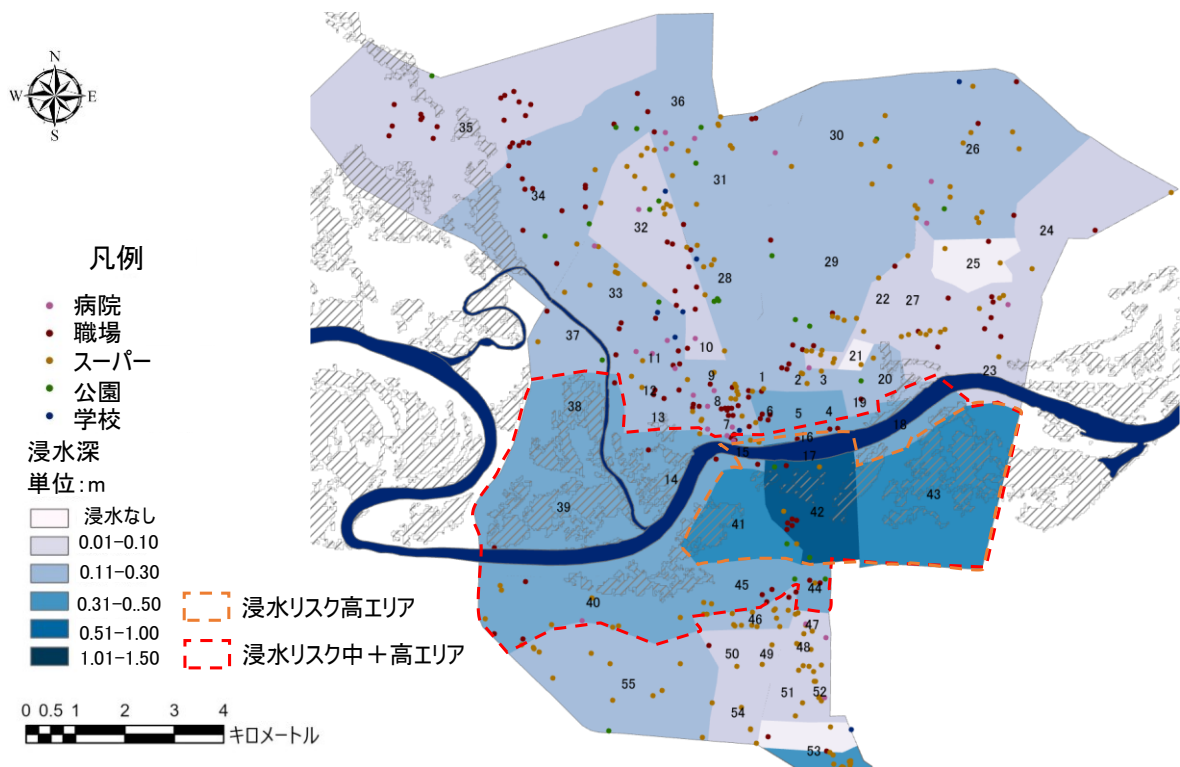


図 5-11 浸水リスクを考慮した移転促進政策の導入ゾーンの設定

5.4 第5章のまとめ

本章では、はじめに既存文献およびガイドラインに基づいて順応策と撤退策に関する適応策を整理した上で、道路嵩上げ政策および洪水リスクを考慮した移転促進政策を選定した。これらの適応策の導入による効果を推計するために、適応策シナリオを設定した。さらに、これらの適応策の導入に向けた優先順位付け方法を整理した上で、優先順位付け方法を提案した。具体的には、道路の嵩上げに関してはアクセシビリティ指標に基づく優先順位付け方法を提案した。この手法をウボンラチャタニ市の道路ネットワークに適用し、アクセシビリティの改善度が高い道路区間を優先度中と高として選定した。結果として、洪水の発生によって影響の生じる 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。一方で、移転促進政策については、アンケート調査から推定した浸水深と移転行動のアンケート調査の結果に基づく移転世帯の設定方法を提案し、適用した。これらの結果から、優先的に整備が必要な区間やエリアの選定を行う手法を確立した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 環境省：気候変動適応策計画，<http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf>.
- 3) European Environment Agency: Adaptation of Transport to Climate Change in Europe Challenges and Options across Transport Modes and Stakeholders, EEA Report, 2014.
- 4) Asian Development Bank: Climate Proofing ADB Investment in the Transport Sector Initial Experience, 120pp. 2014.
- 5) Iraklis Stamos, Evangelos Mitsakis, Josep Maria Salanova Grau: Roadmaps for Adaptation Measures of Transportation to Climate Change, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2532, pp.1-22, 2014.
- 6) Angel Aparicio: Transport Adaptation Policies in Europe: from Incremental Actions to Long-term Visions, Transportation Research Procedia 25c, 3533-3541, 2017.
- 7) 独立行政法人国際協力機構（JICA）：タイ王国東部外環道路（国道 9 号線）改修計画，URL: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12087235_01.pdf（最終アクセス：2022 年 11 月 24 日）。
- 8) 独立行政法人国際協力機構（JICA）：カンボジア王国国道 1 号線（プノンペンからネアックルン区間）改修計画，URL: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11785458_04.pdf（最終アクセス：2022 年 11 月 24 日）。
- 9) 国土交通省 近畿地方整備局：由良川直轄河川改修事業，URL: <https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/ippan/zigyohyoka/ol9a8v000000ceki-att/5.pdf>（最終アクセス：2022 年 12 月 8 日）。
- 10) 国土交通省：水害対策を考える・4-1-3 浸水の予防・人命を守る家づくり，URL: https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_4-1-3.html，（最終アクセス：2022 年 12 月 26 日）。
- 11) Khon Kaen Municipality: Three-year Development Plan (B.E. 2560-2562), http://www.kkmuni.go.th/2017/admin/file/files/1486109913_1267332564.pdf, (Latest accessed on December 8, 2022).
- 12) 独立行政法人国際協力機構（JICA）：フィリピン共和国洪水リスク管理事業（カガヤン・デ・オロ川）準備調査，URL: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12150124_01.pdf（最終アクセス：2022 年 12 月 26 日）。
- 13) 堀井雅史：代替機能を考慮した自然災害時における道路網復旧優先順位設定方法に関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集，Vol.15，pp.337-344，1998.
- 14) 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.
- 15) Xian-Zhe Chen, Qing-Chang Lu, Zhong-Ren Peng and John Eugene Ash: Analysis of Transportation Network Vulnerability under Flooding Disasters, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2532, Issue 1, pp.37-44, 2015.
- 16) Jungyul Sohn: Evaluating the Significance of Highway Network Links under the Flood Damage: An Accessibility Approach, Transport Research Part A, 40, pp.491-506, 2006.
- 17) 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

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 卷 1 号, pp.76-87, 2014.

- 18) 大澤脩司, 中山晶一郎, 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 卷), I_281-I_289, 2017.
- 19) Michael A. P. Taylor, Somenahalli V. C. Sekhar, Glen M. E'Este: Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks, Networks and Spatial Economics, 6, 267-291, 2006.

第6章 洪水発生時における影響の軽減に向けた適応策の導入効果の推計方法の提案

本章では、既存文献における洪水の影響の軽減に向けた適応策の導入効果を推計するための分析指標やその評価手法について整理した。第5章で設定した各適応策シナリオの導入効果を第4章で構築したアクティビティベースモデルを用いて交通需要を推計し、その推計結果から評価を行った。本論文では、アクティビティおよびモビリティの観点からみた複数の評価項目を設定し、評価した。また、それぞれの適応策シナリオが経済的に見合うものであるか判断するために、費用便益分析を実施して費用便益比を算出し、分析した。

6.1 適応策の導入効果の推計方法の設定

第5章で設定した適応策シナリオの導入によって、洪水の発生による影響の軽減効果をアクティビティおよびモビリティの評価項目をそれぞれ設定し、評価した。洪水の発生に対する適応策は、洪水発生時における影響を軽減することで、定常時の生活に近づけることを目的としている¹⁾。そこで、第5章で選定した道路嵩上げ政策と浸水リスクを考慮した移転促進政策および2つの適応策組み合わせを実施した場合においてどの程度定常時に近づけられているのかを分析した。以下に、それぞれの分析に用いる指標を示す。

6.1.1 アクティビティの評価項目

アクティビティの評価項目として、アクティビティパターン数とアクセスできる施設の訪問数を設定した。アクティビティパターン数については、第4章の表4-12に示したパターンに関して、シナリオ別に整理した上で、就業者、就学者および非就業者別に比較した。また、各シナリオにおけるアクセスできる施設の訪問回数をそれぞれの施設タイプ毎（就業地、就学地、商業施設、レジャー、その他）に集計した。また、定常時のアクセス可能な訪問回数と比較し、その差分を算出した。その結果から、適応策を実施することで、どの程度定常時に近づけることができているかを把握し、アクティビティへの影響の軽減度合いを分析した。

6.1.2 モビリティの評価項目

モビリティの評価項目として、ゾーン間平均旅行時間とトリップ毎の旅行時間に着目し、設定した。アクティビティベースモデルの交通需要の推計結果から、各シナリオの結果を比較した。ゾーン間平均旅行時間は発地ベースで集約し、式6-1に示すように計算した。これらの指標を用いて、すべてのシナリオで計算を行った上で定常時と比較し、定常時からの増加分を算出した。その後、洪水あり（対策なし）とそれぞれのシナリオの増加分を比較することで、適応策の実施によるモビリティの改善効果を分析した。

$$TT_i = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^j TT_{ij} \div \sum_{m=1}^j T_j \quad \text{式6-1}$$

ここで、 TT_i ：ゾーン*i*を発地とした移動の平均旅行時間、 TT_{ij} ：ゾーン*ij*間の旅行時間、 T_j ：ゾーン*j*を着地とした交通量、*i*：発ゾーン、*j*：着ゾーン

また、アクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計時には、各トリップの旅行時間を算出することができ、四段階推定法とは異なり、個人レベルでどの程度影響を受けたか把握することが可能である。そこで、それぞれの目的別のトリップに着目し、シナリオ別のトリップ毎の旅行時間を算出した。その結果を15分刻みで分類し、その割合を算出した。この結果から、どの程度人々の移動に対して適応策の実施によって影響を軽減することができるのかを把握した。これらの結果から、適応策シナリオの実施によって都市モビリティへの影響の改善量を定量的に分析した。

6.1.3 経済的な観点からみた評価項目

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た上で、費用便益比を算出した^{2),3)}。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。道路嵩上げ政策と浸水リスクを考慮した移転促進政策の導入効果を推計するために、政策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で公開されている走行時間短縮便益を用いて把握した。具体的には、以下の3式を用いて道路嵩上げ政策の導入前後での20年間の便益を計算した。

具体的には、式6-2では、政策導入有無時それぞれにかかる総走行時間費用をゾーン間交通量・旅行時間および時間原単位を用いて算定している。また、式6-3では、式6-2で算定された総走行時間費用を比較し、その差を走行時間短縮便益として算出している。そして、式6-4では、政策導入期間の便益に関して割引率を用いて基準年における現在価値に変換して推定をしている。

$$BT_i = \sum (Q_{ijl} \times T_{ijl} \times a) \times 30 \quad \text{式6-2}$$

$$BT_i = BT_{io} - BT_{iw} \quad \text{式6-3}$$

$$BofPV = \sum_t \left\{ \frac{B_t}{(1+d)^{s+t}} \right\} \quad \text{式6-4}$$

ここで、 i ：整備あり時、 w 、整備なし時 o 、 BT_i ：整備 i 時総走行費用（パーツ/年）、 Q_{ijl} ：整備 i 時 OD 間距離 l の車種 j の交通量（台/日）、 T_{ijl} ：整備 i 時 OD 間距離 l の車種 j の走行時間（分）、 a ：時間原単位、 $BofPV$ ：走行費用短縮便益の現在価値（パーツ）、 s ：基準年次から供用開始年次までの年数、 t ：供用開始年次を0年目とする年次（年）、 B_t ：供用開始後 t 年目の計測値（パーツ）、 d ：社会的割引率(=4.0%)

これらの3つの式を用いて走行時間短縮便益を推計した。本論文では、社会的割引率の設定を4.0%として計算した。この理由としては、タイで気候変動に関する政策の評価に関するガイドライン⁴⁾内では、社会的割引率を検討する際には、1.0~4.0%が望ましいとされているため、4.0%とし

て設定した。また、毎年、洪水が発生することを想定すると同時に、1年間のうち30日間に亘って、洪水発生時に同じレベルの冠水が発生すると想定し、便益を推定した。

6.2 分析指標に基づく各シナリオの導入効果の推計結果

6.2.1 アクティビティパターン数の比較

第4章で構築したアクティビティベースモデルを用いたそれぞれの適応策シナリオの交通需要の推計結果から、第3章のアンケート調査と同様に、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6-1および表6-2に示す。道路嵩上げを実施した場合（シナリオA3）には、就業者のアクティビティパターン数への影響が軽減していることがわかる。一方で、道路嵩上げと移転の促進（シナリオC4）では、就業者だけでなく、非就業者のパターン数への影響も軽減することができている。

表 6-1 シナリオ別のアクティビティパターン数の比較 1

アクティビティパターン	A1	A2	A3	洪水あり	洪水あり (浸水深低下)	洪水なし	
就業者 (合計:116,869)	HWH	24115 [20.63%]	24115 [20.63%]	25558 [21.87%]	25054 [21.44%]	27967 [21.96%]	38494 [32.94%]
	HSWH	5838 [4.99%]	5838 [4.99%]	5582 [4.78%]	6573 [5.62%]	6065 [5.19%]	4845 [4.15%]
	HWSH	10246 [8.76%]	10246 [8.76%]	10403 [8.9%]	12228 [10.46%]	11504 [9.84%]	6238 [5.34%]
	HWSWH	44971 [38.48%]	44971 [38.48%]	40739 [34.86%]	40891 [34.99%]	38555 [32.99%]	34386 [29.42%]
就学者 (合計:46,137)	HEH	31973 [69.3%]	32074 [69.51%]	31805 [68.94%]	32363 [70.15%]	31733 [68.78%]	31285 [67.81%]
	HLEH	955 [2.07%]	990 [2.15%]	990 [2.15%]	945 [1.69%]	958 [2.07%]	1963 [4.25%]
	HESH	5493 [11.91%]	5604 [12.15%]	6752 [14.63%]	6409 [13.89%]	4862 [10.56%]	7364 [15.96%]
非就業者 (合計:88,366)	HOH	13400 [15.09%]	13340 [15.10%]	12983 [14.69%]	13112 [14.84%]	13323 [15.08%]	16810 [17.91%]
	HLH	6225 [7.04%]	5657 [6.40%]	6225 [6.41%]	6142 [6.95%]	6252 [7.08%]	6304 [6.72%]
	HSH	36337 [41.12%]	36933 [41.79%]	37350 [42.3%]	35264 [39.91%]	38500 [43.57%]	43880 [46.75%]
	H	81452 [31.68%]	81450 [31.68%]	79083 [30.76%]	80341 [31.25%]	78864 [30.67%]	65544 [25.49%]

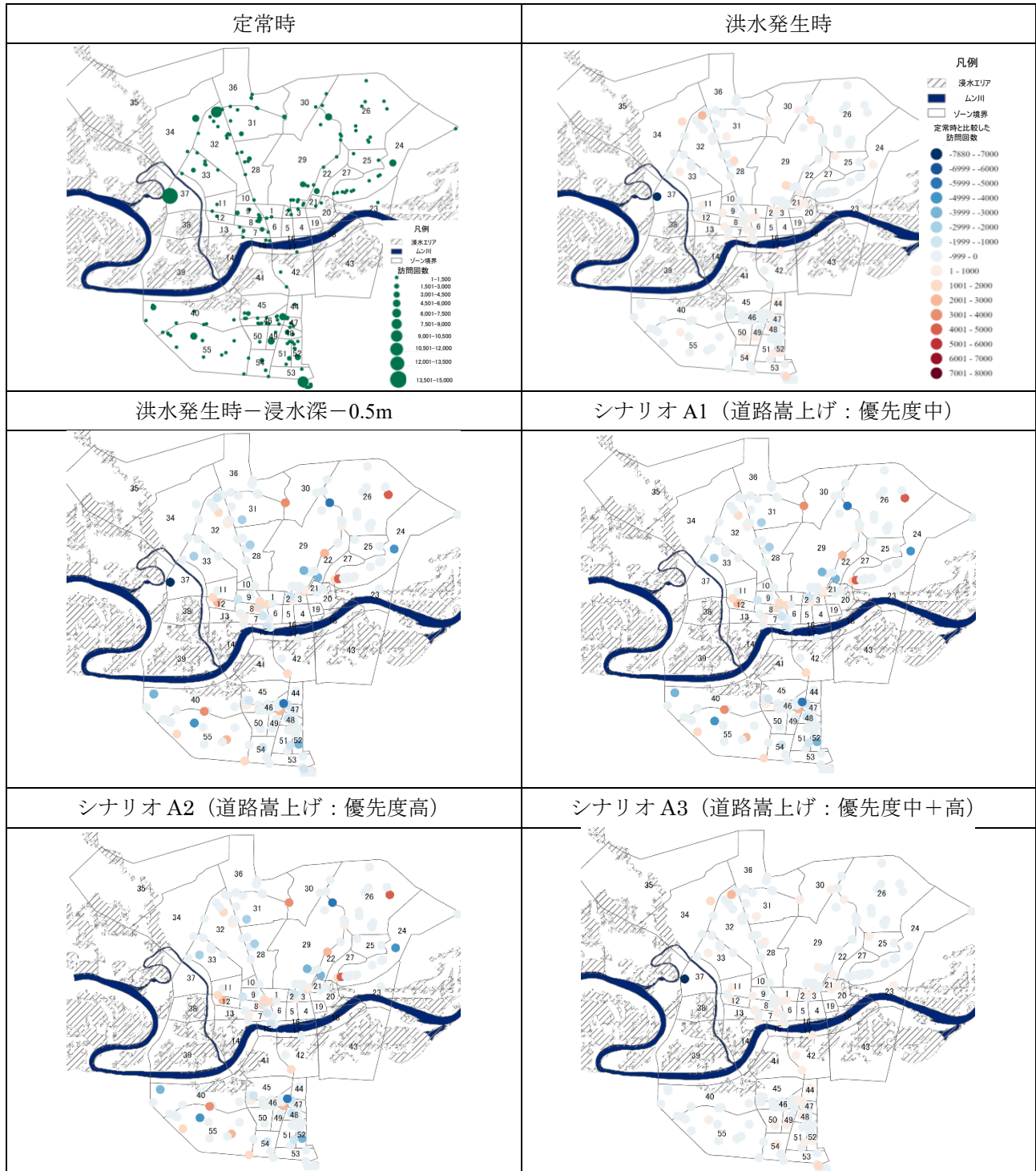
表 6-2 シナリオ別のアクティビティパターン数の比較 2

アクティビティパターン	B1	B2	C1	C2	C3	C4	
就業者 (合計:116,869)	HWH	25117 [21.49%]	24989 [21.38%]	25830 [22.10%]	24338 [20.83%]	25660 [21.96%]	29647 [25.37%]
	HSWH	6280 [5.37%]	5984 [5.12%]	5989 [5.13%]	5767 [4.94%]	5849 [5.00%]	4990 [4.27%]
	HWSH	12147 [10.39%]	12091 [10.35%]	11619 [9.94%]	10906 [9.33%]	10266 [8.78%]	9050 [8.59%]
	HWSWH	41387 [35.41%]	40599 [34.74%]	40657 [34.79%]	40100 [34.31%]	39503 [33.80%]	37940 [32.46%]
就学者 (合計:46,137)	HEH	32433 [70.29%]	32000 [69.36%]	31950 [69.25%]	31680 [68.67%]	31890 [69.12%]	31671 [68.65%]
	HLEH	965 [2.09%]	920 [1.99%]	942 [2.04%]	962 [2.08%]	1044 [2.26%]	1046 [2.27%]
	HESH	6517 [14.13%]	6970 [15.11%]	6795 [14.73%]	6943 [15.04%]	6820 [14.78%]	7012 [13.51%]
非就業者 (合計:88,366)	HOH	13183 [14.92%]	13275 [15.03%]	13968 [15.81%]	14103 [15.05%]	14103 [15.81%]	14275 [15.93%]
	HLH	6000 [6.79%]	6280 [6.52%]	5612 [6.35%]	6097 [6.89%]	5633 [6.38%]	6300 [6.62%]
	HSH	35064 [39.68%]	37050 [42.1%]	32984 [37.32%]	36212 [40.98%]	33487 [37.89%]	39702 [44.95%]
	H	81015 [31.51%]	81064 [31.53%]	78607 [30.57%]	78700 [30.61%]	78771 [30.64%]	78754 [30.63%]

6.2.2 アクセスできる施設の訪問回数の比較

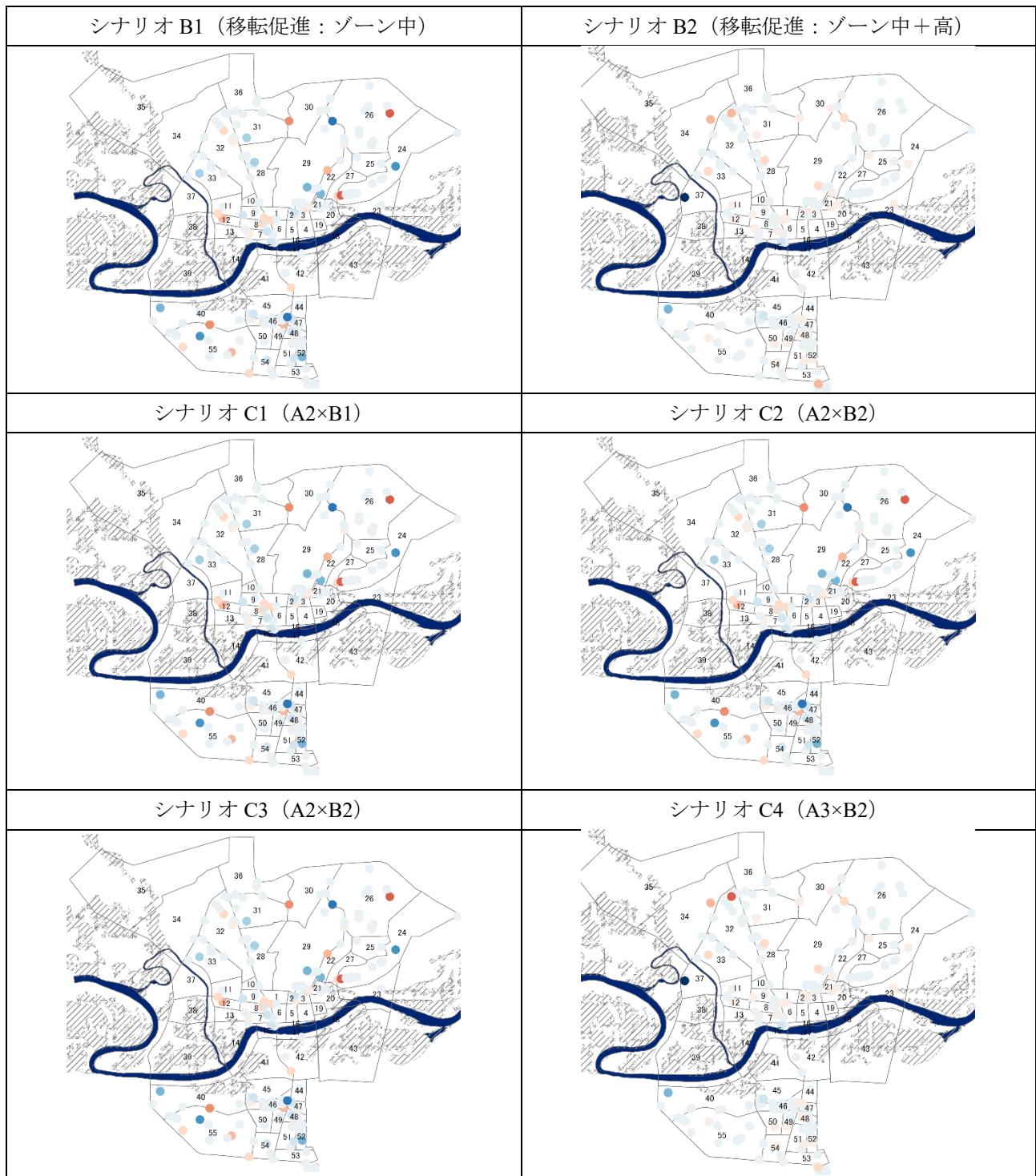
アクティビティベースモデルの交通需要の推計結果から、個人のアクティビティを行う際の訪問先のデータに基づいて、それぞれのシナリオにおけるアクセスできる商業施設の訪問回数を集計した（表 6-3 および表 6-4）。定常時については、円のサイズがアクセスできる施設の訪問回数を表している。また、定常時以外の図については、アクセスできる施設に対するそれぞれのシナリオにおける定常時と比較した際の訪問回数の増減を表している（赤：増加、青：減少）。

表 6-3 アクセスできる商業施設の訪問回数 1



この結果から、定常時には、郊外部の大型商業施設を訪問先として選択している人が比較的多いことを表している。これに対して、洪水発生時には、定常時と比較すると大型商業施設への訪問回数が大幅に減少し、郊外の大型商業施設以外のスーパー等へ訪問している回数が増加している。一方で適応策を実施した場合には、定常時に利用が多い、郊外部のショッピングセンターや市場への訪問回数が増加した。

表 6-4 アクセスできる商業施設の訪問回数 2



次に、それぞれのシナリオにおけるアクセスできる就業地の訪問回数の結果を表 6-5 および表 6-6 に示す。洪水が発生した際には、アクセスできる商業施設と比較すると、低下量は小さくなっているが、適応策を導入した場合には、その影響を軽減することができている。

表 6-5 アクセスできる就業地の訪問回数 1

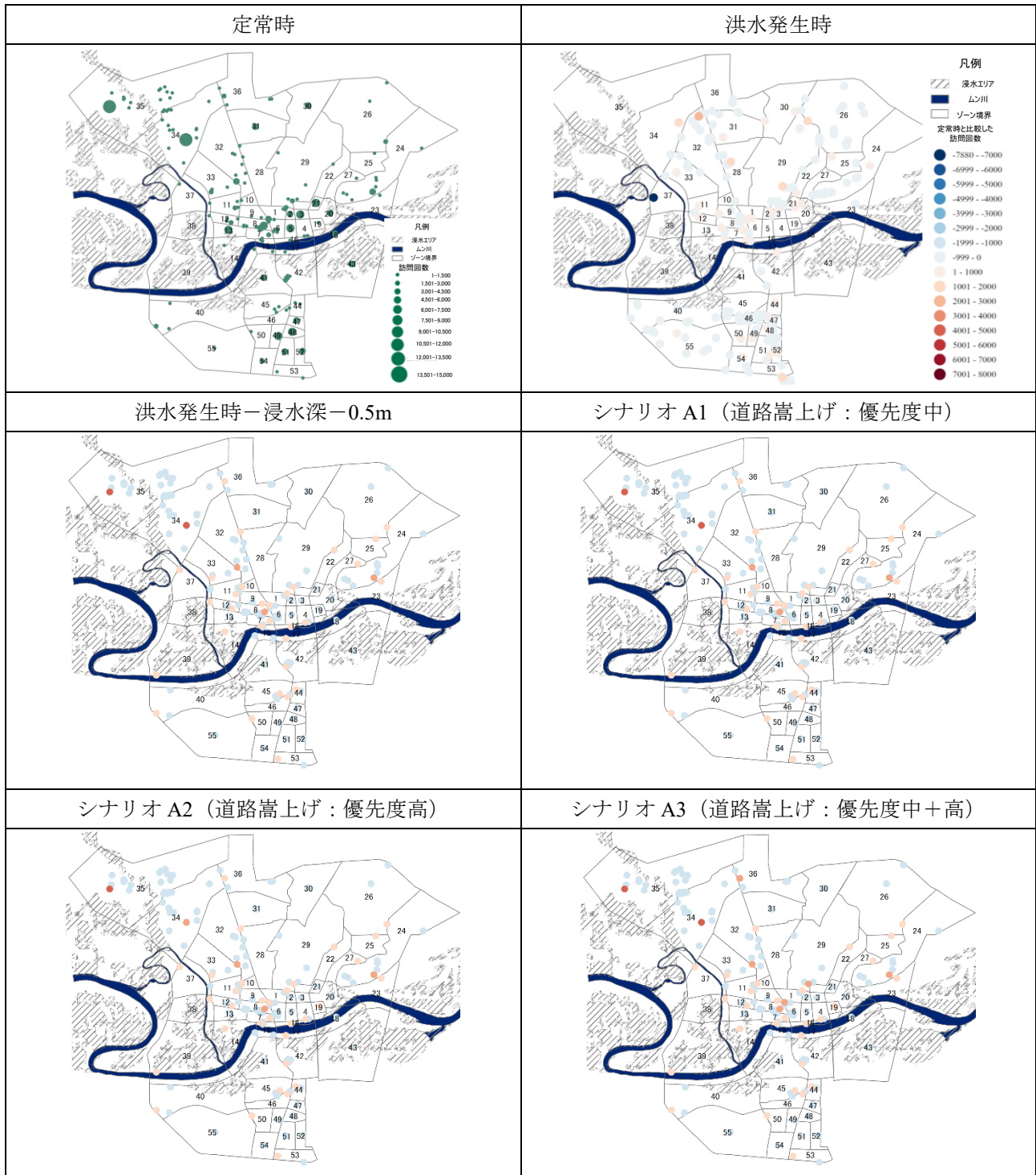
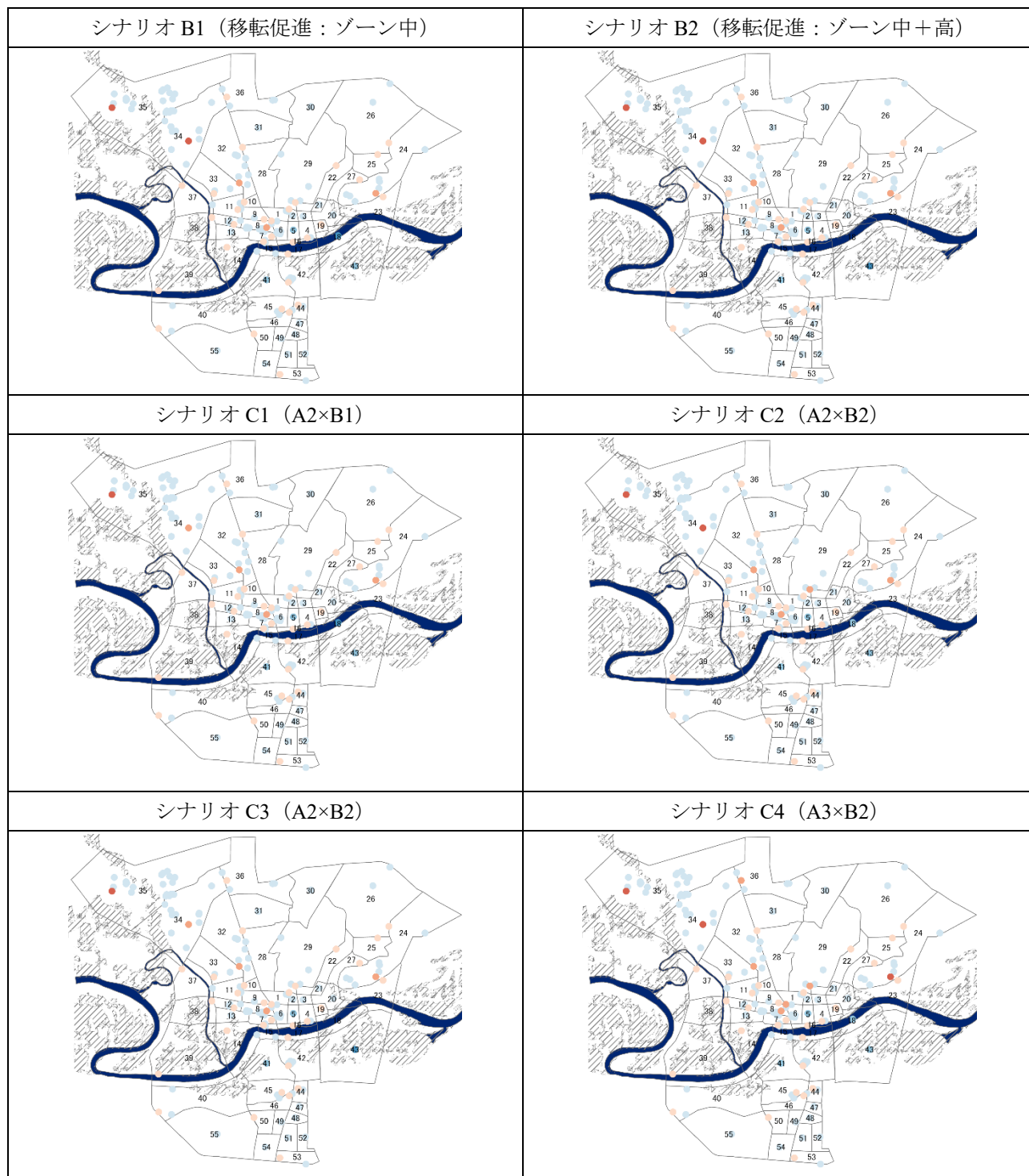


表 6-6 アクセスできる就業地の訪問回数 2



次に、それぞれのシナリオにおけるアクセスできる就学地の訪問回数の結果を表 6-7 および表 6-8 に示す。定常時には、特に、ムン川よりも北側のエリアでアクセスできる訪問回数が多くなっている。洪水が発生した際には、就業地と同様に訪問回数の低下量は小さくなっているが、適応策を導入した場合には、その影響を軽減することができる。

表 6-7 アクセスできる就学地の訪問回数 1

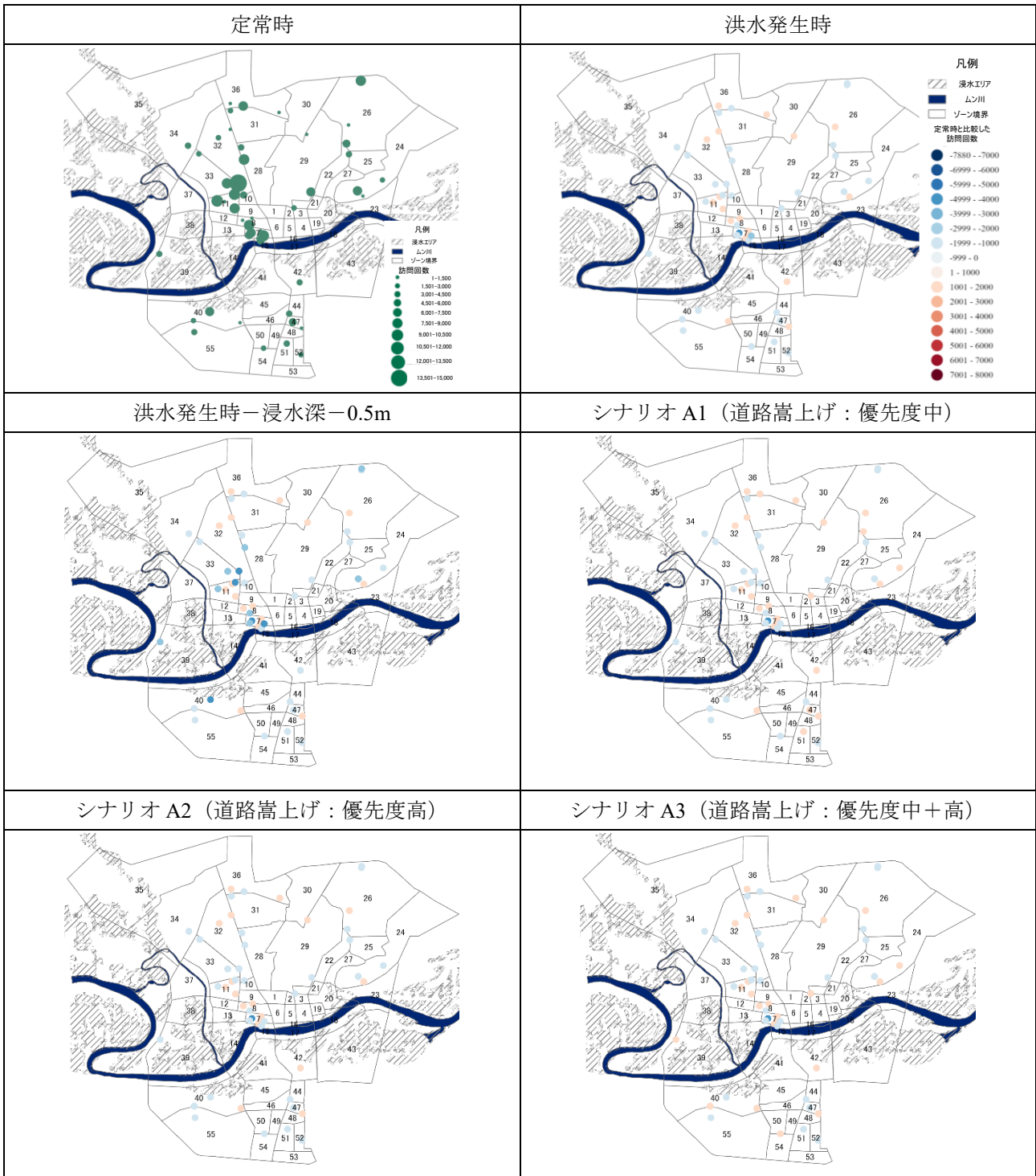
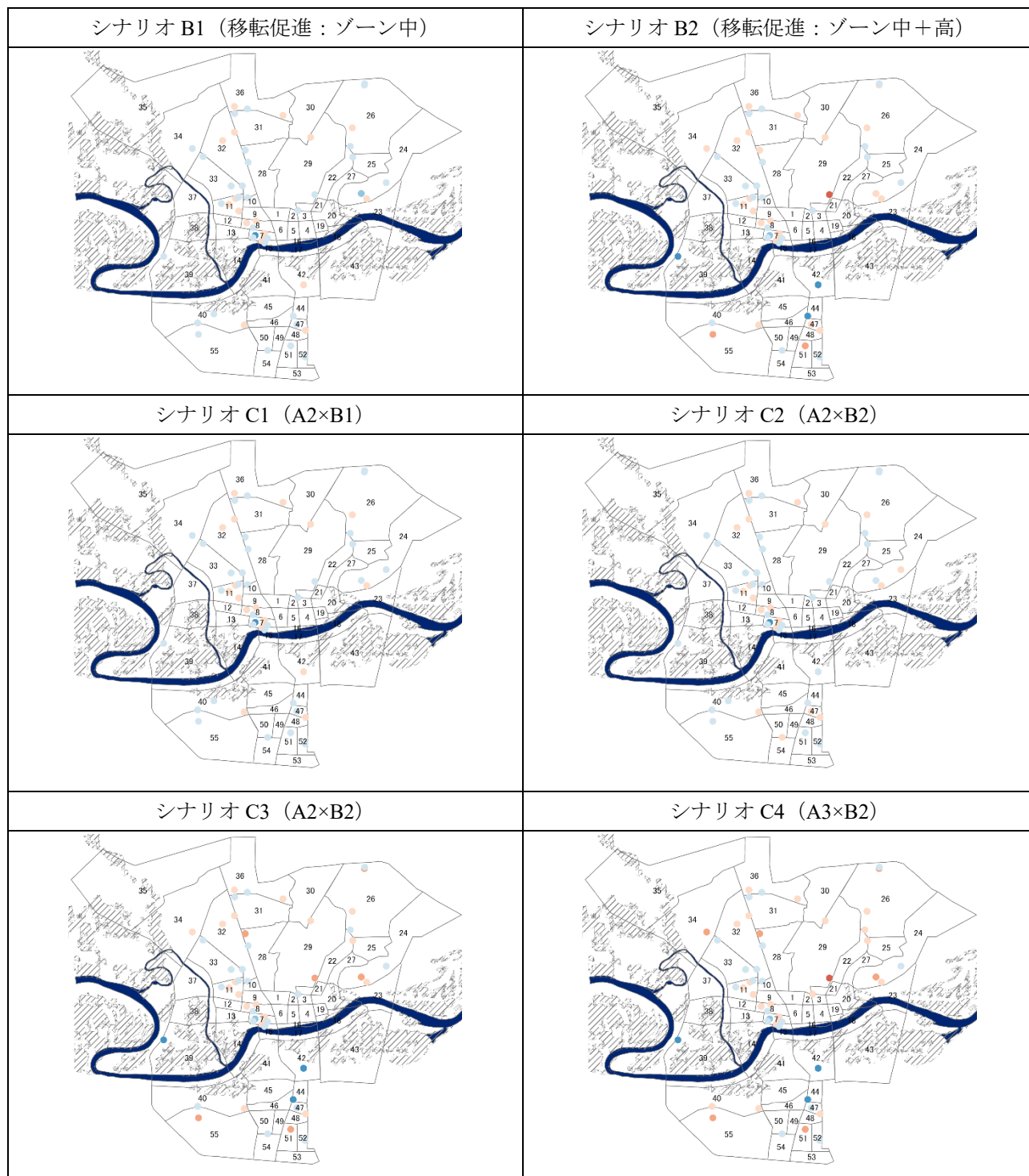


表 6-8 アクセスできる就業地の訪問回数 2



次に、それぞれのシナリオにおけるアクセスできる私事（病院）の訪問回数の結果を表 6-9 および表 6-10 に示す。洪水が発生した際には、アクセスできる商業施設と同様に、低下量は非常に大きくなっているが、適応策を導入した場合には、その影響を軽減することができる。

表 6-9 アクセスできる私事（病院）の訪問回数 1

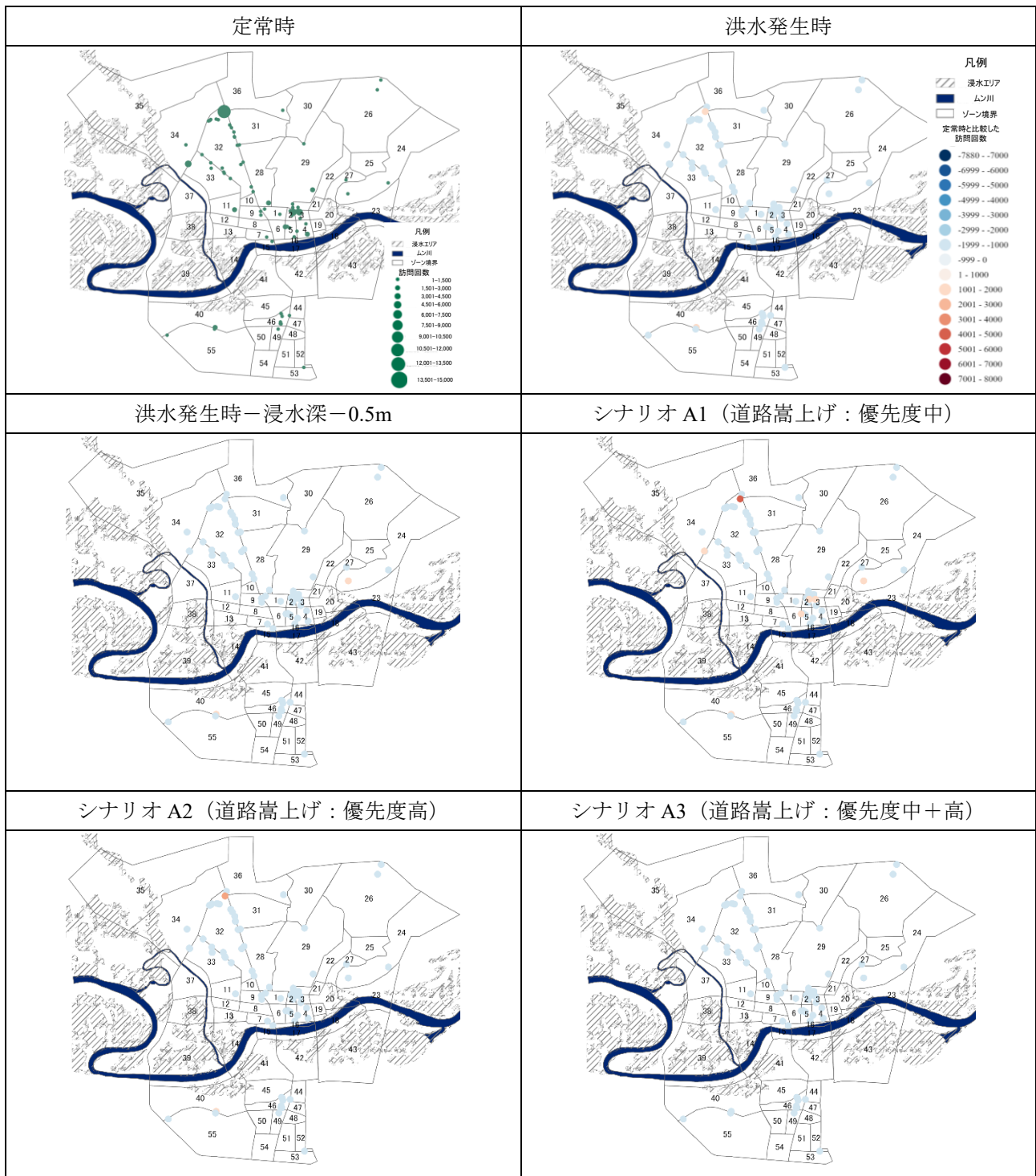


表 6-10 アクセスできる私事（病院）の訪問回数 2

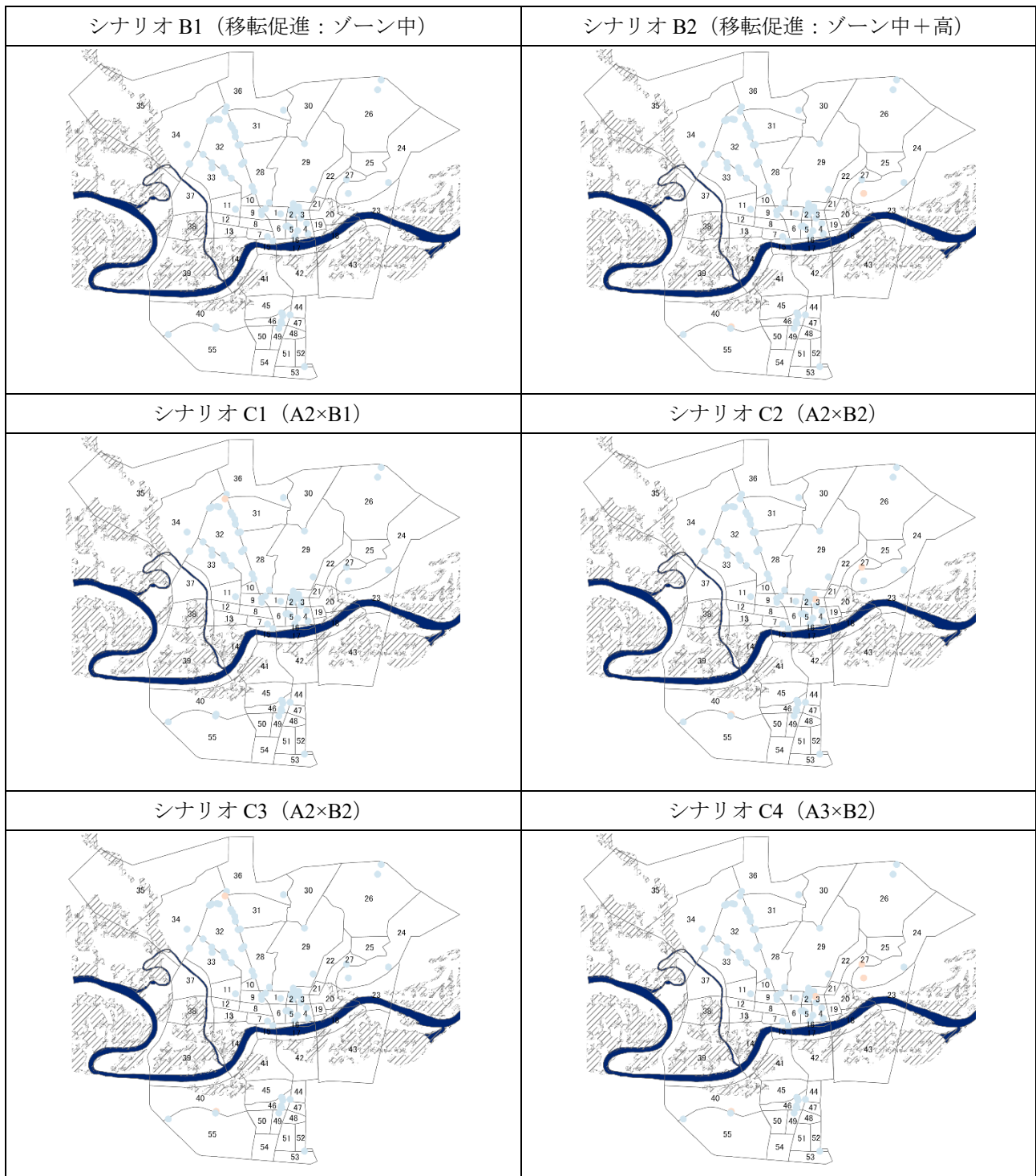


表 6-11 および表 6-12 に示す．洪水が発生した際には，河川よりも都市の北側の施設で訪問回数が増加し，南側では，訪問回数が減少している．一方で，適応策を導入した場合には，アクセシビリティが向上する河川よりも北側のエリアで訪問回数が増加し，その周辺では，訪問回数減少することを示した．

表 6-11 アクセスできるレジャー施設の訪問回数 1

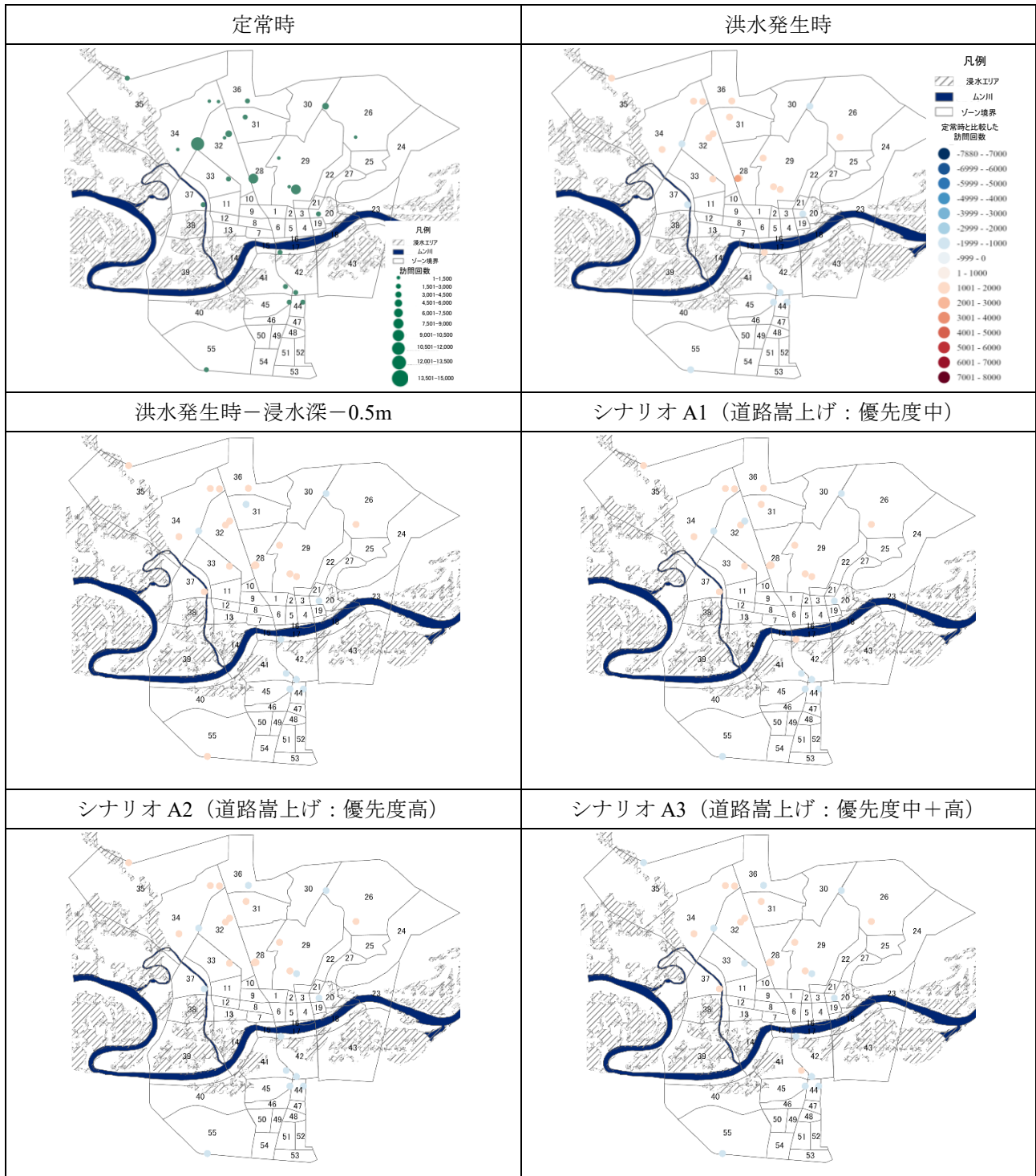
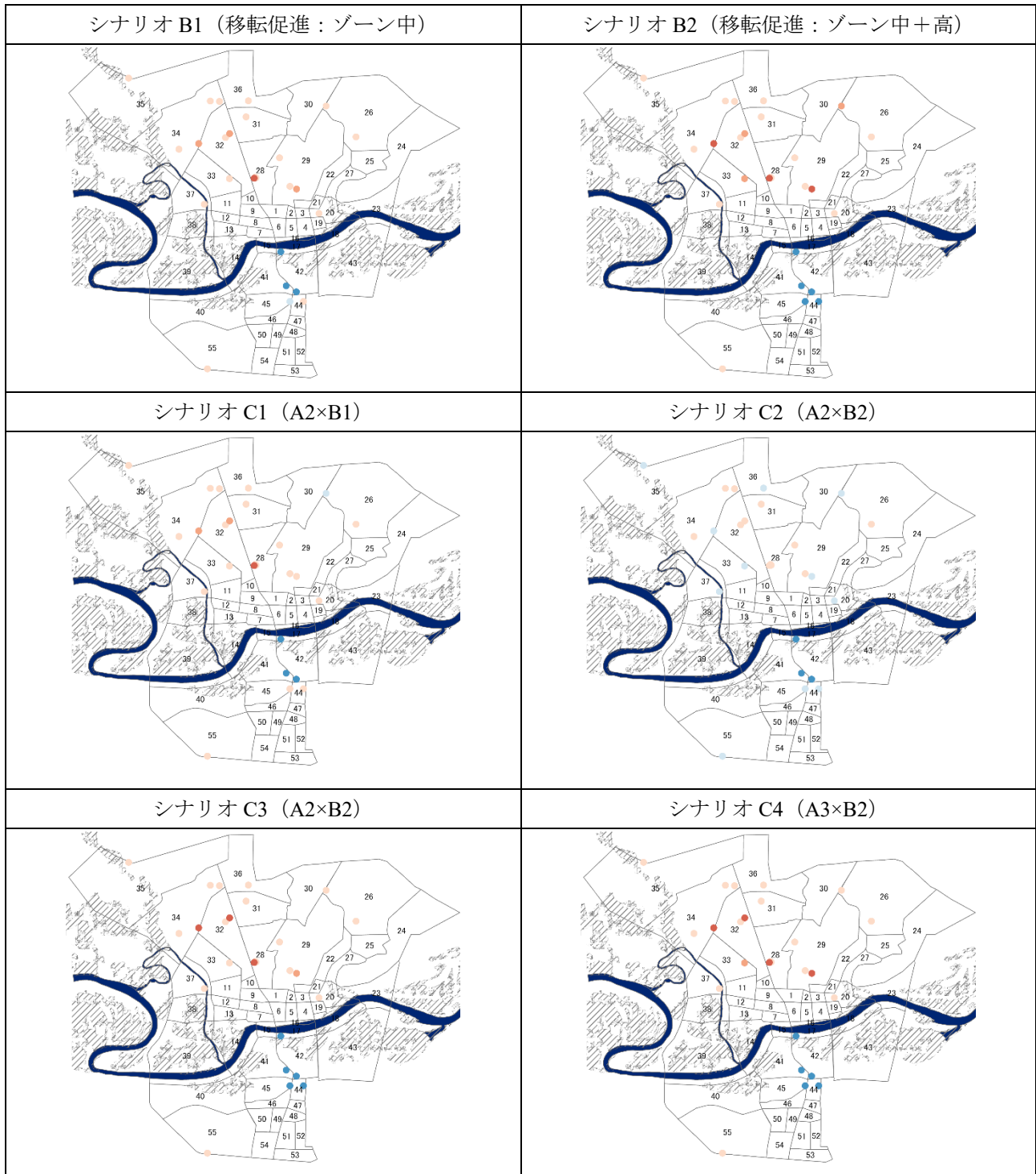


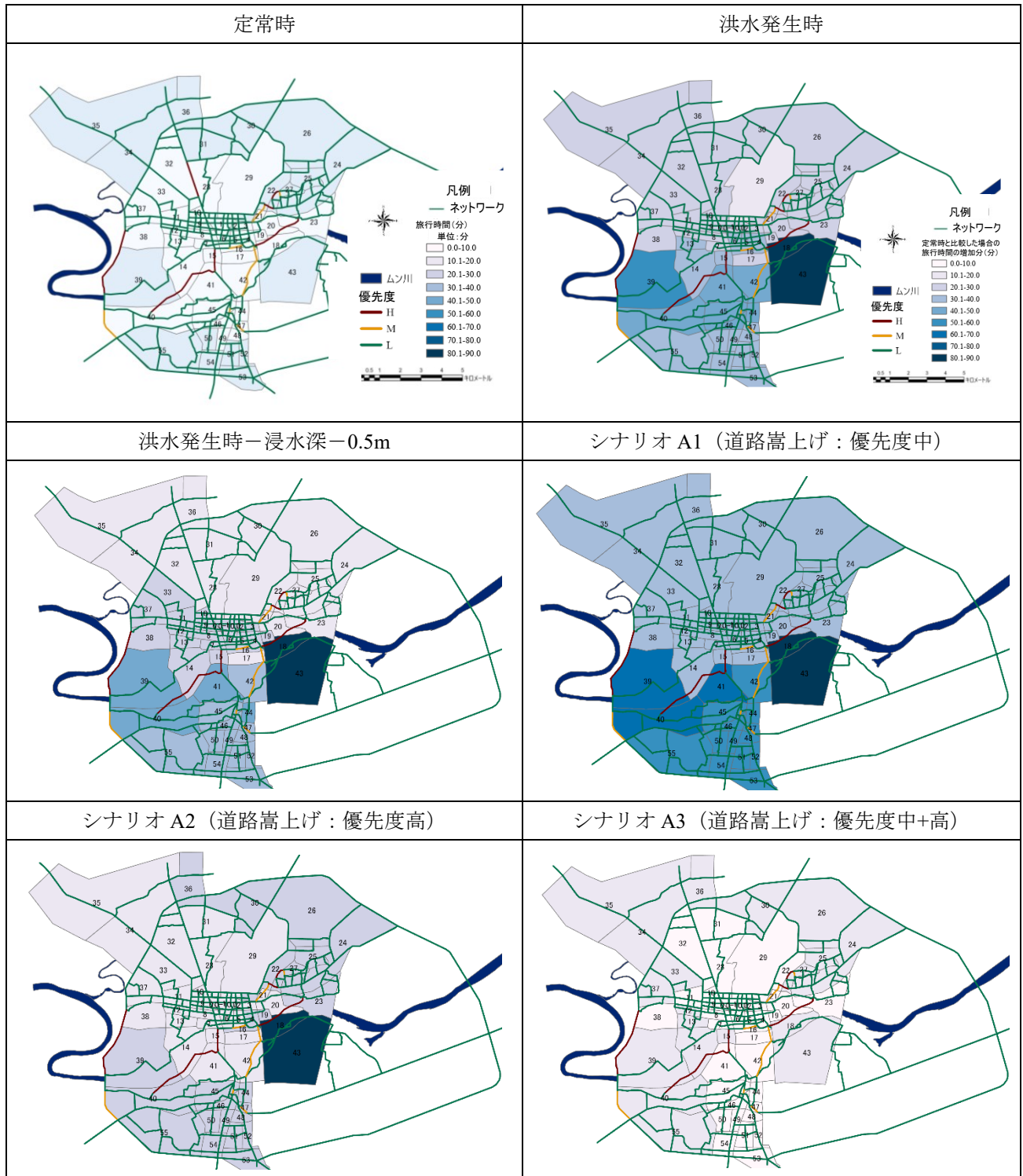
表 6-12 アクセスできるレジャー施設の訪問回数 2



6.2.3 ゾーン間平均旅行時間の比較

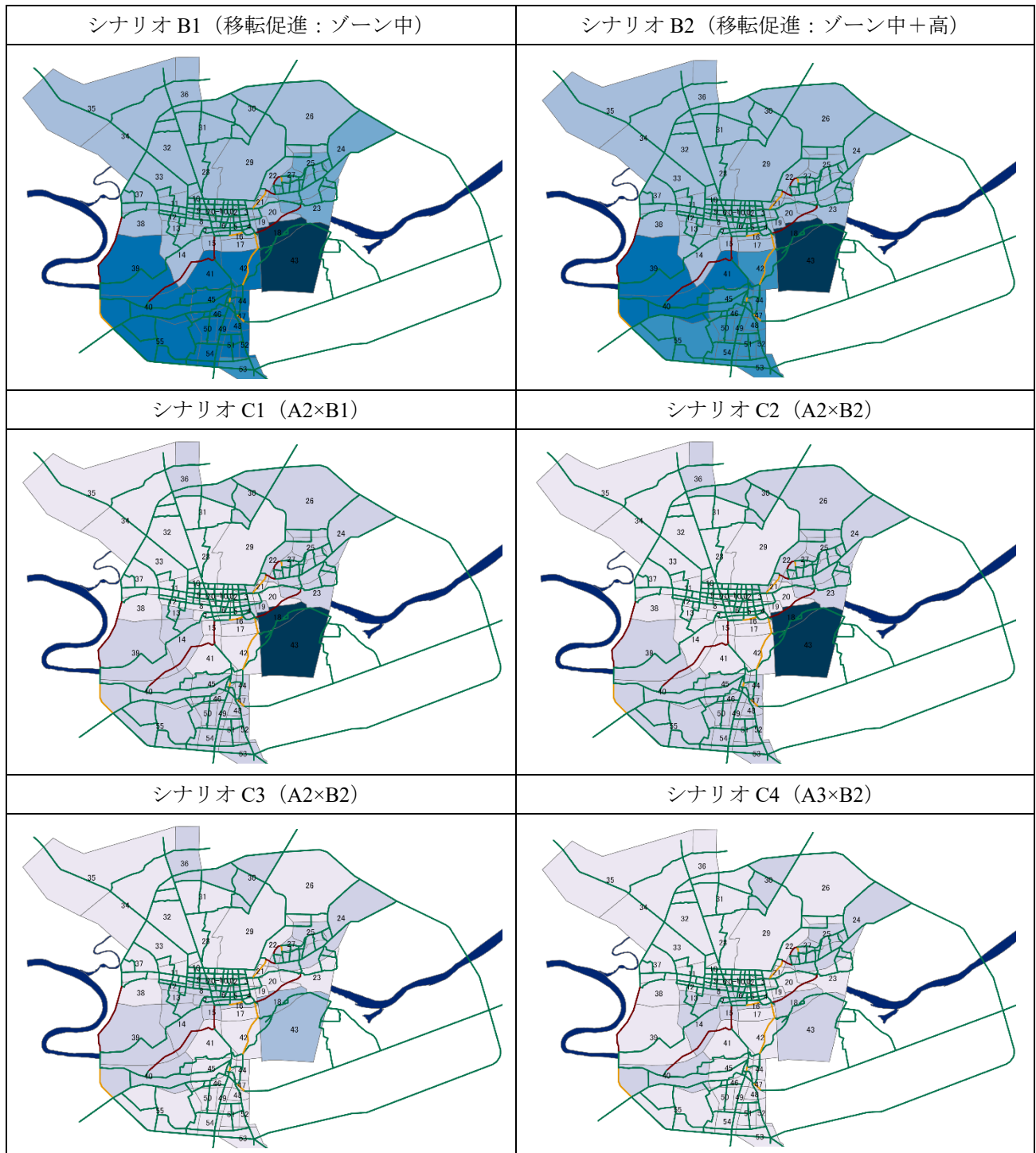
それぞれのシナリオにおける洪水発生時のゾーン間の平均旅行時間を算出し、定常時と比較した結果を表 6-13 および表 6-14 に示す。洪水発生時には、特に、河川周辺の 39～43 ゾーンで旅行時間が 50～60 分程度増加しており、都市の南側でも同様に 30～40 分程度増加し、モビリティが大きく低下していることを示した。

表 6-13 シナリオ別ゾーン間平均旅行時間 1



これに対して、道路嵩上げを優先度中と高の道路区間を対象に実施した場合（シナリオ A3）には、20～30 分程度増加した旅行時間を短縮することができ、モビリティへの影響を軽減することができることを示した。一方で、道路嵩上げ（A3）と移転促進（B2）を組み合わせた場合（C4）には、ゾーン間の平均旅行時間を短縮することができるが、道路嵩上げのみを行った場合よりもその短縮量は小さい。この理由としては、移転をすると選択した世帯については、中心部から被害の少ない郊外部へ移転をしたために、移動時間が増加したと推察される。

表 6-14 シナリオ別ゾーン間平均旅行時間 2



6.2.4 旅行時間別のトリップ数の比較

洪水の発生によるモビリティへの影響を把握するために、各トリップを旅行時間別に分類し、その割合を比較した。図 6-1 に就業を目的としたトリップの結果を示す。結果として、定常時（洪水なし）の場合には、95%のトリップについては、旅行時間が15分以内となっている。一方で、洪水あり（対策なし）の場合には、道路嵩上げを実施しない場合には、旅行時間が50分以上かかるトリップが25%程度ある。

これに対して、道路嵩上げを含むシナリオ（シナリオ A3 または C4）では、全てのトリップの旅行時間が45分まで減少している。この結果は、道路嵩上げの実施によって、都市のモビリティへ洪水の影響が軽減されていることを示した。また、洪水あり（浸水深低下）の場合にも、大きくモビリティへの影響を軽減することが示されたが、旅行時間が45-60分のトリップが、道路嵩上げを実施した場合と比較すると、多くなっている。そのため、洪水発生時にもモビリティを確保するためには、道路嵩上げを適切に導入することが効果的となる。

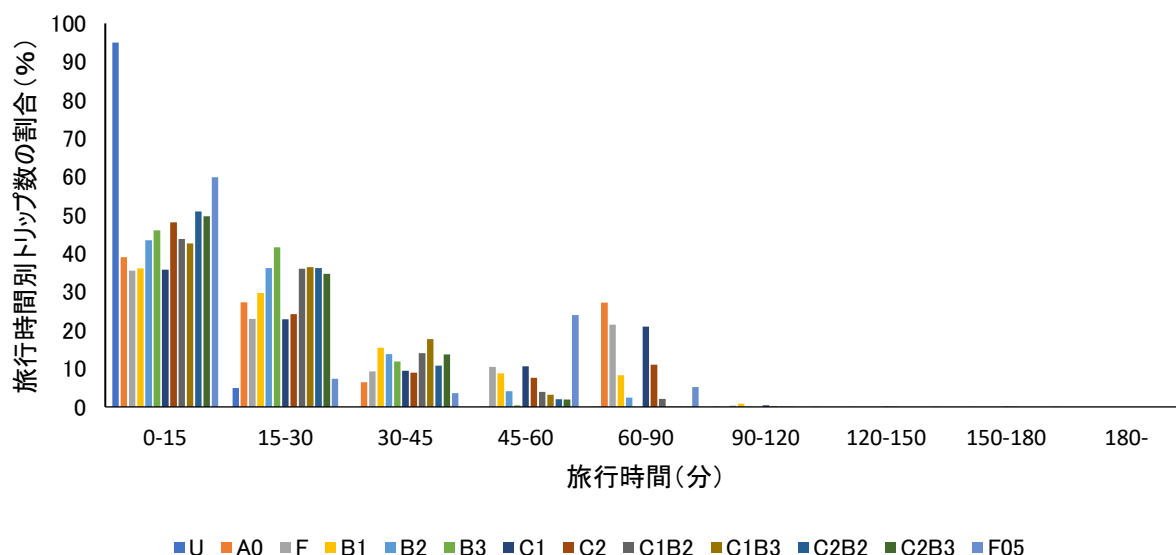


図 6-1 就業を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較

同様に、就学、買い物、レジャー、その他を目的とした移動についても就業と同様に、旅行時間別トリップ数の割合を算出し、比較した結果をから図 6-2～図 6-5 に示す。いずれの移動目的についても基本的には、図 6-1 に示した就業を目的とした旅行時間別トリップ数の割合と同様の傾向を示す結果となった。

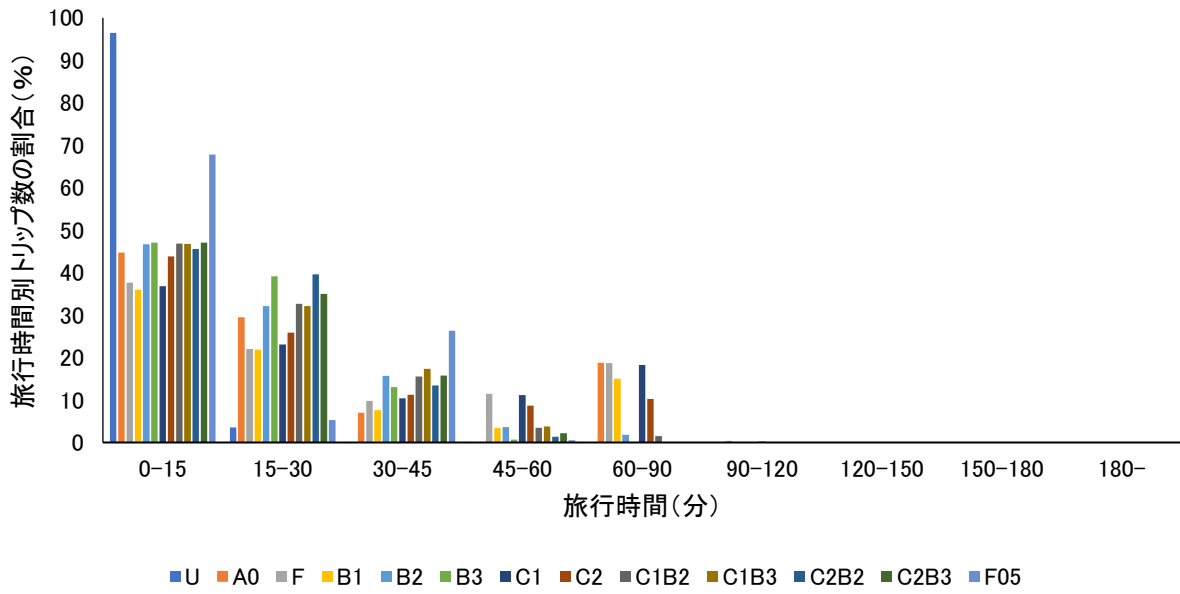


図 6-2 就学を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較

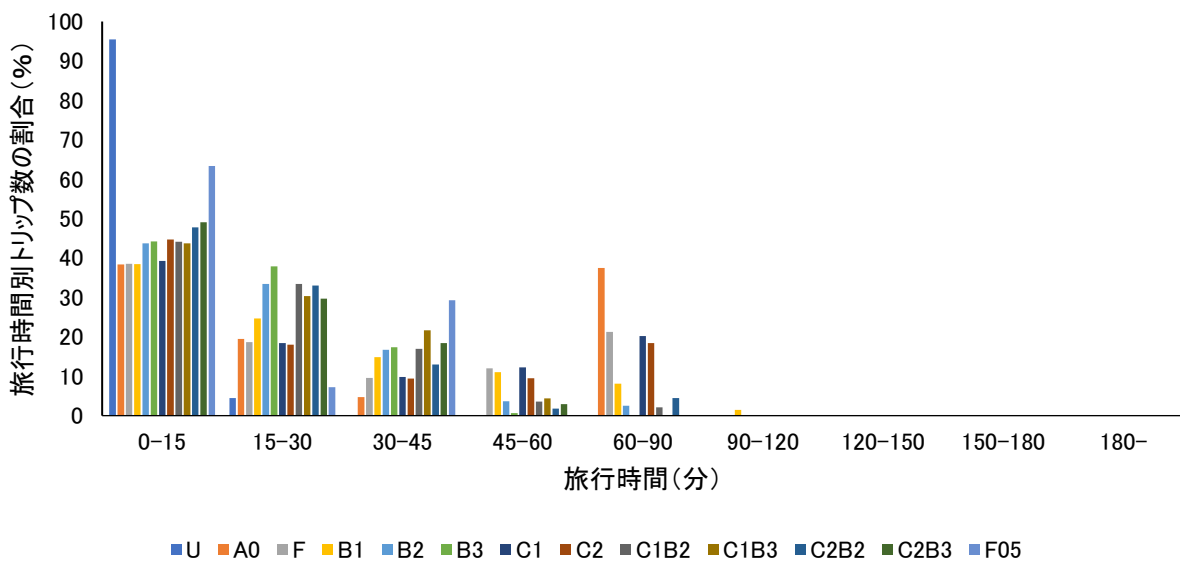


図 6-3 買い物を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較

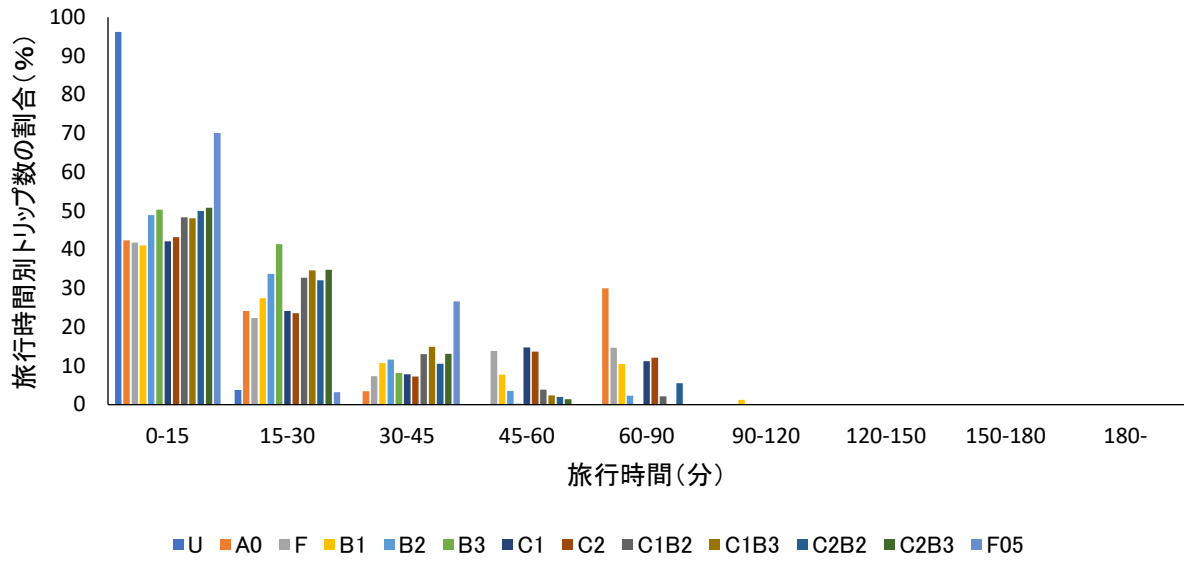


図 6-4 私事を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較

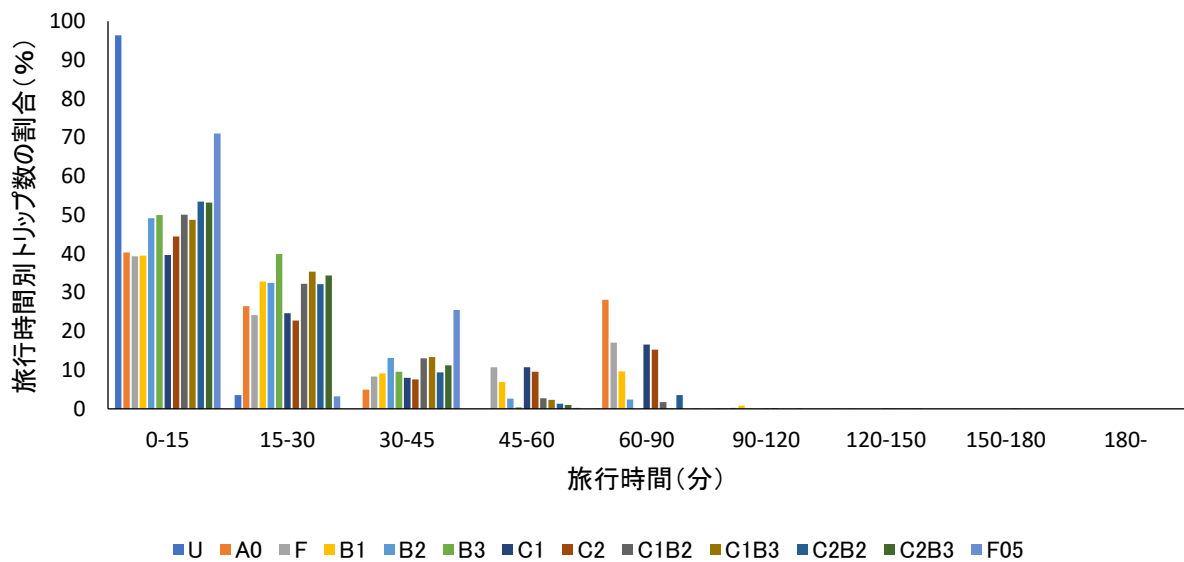


図 6-5 その他を目的とした旅行時間別のトリップ数の比較

6.2.5 費用便益分析

それぞれの適応策シナリオの導入が経済的に見合うものであるか判断するために、洪水の発生による適応策シナリオ実施有無での被害軽減額を算出した上で、適応策の実施による費用を推計した。

この結果に基づいて、費用便益比を算出した（表 6-15）。評価対象期間は 20 年とし、社会的割引率は 4%として設定した。その結果、全ての適応策シナリオで費用便益比が 1 を超えており、適応策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。この結果から、それぞれの適応策シナリオの実施については経済的には効率的であり、有効であることを示した。一方で、移転促進政策を実施する場合には、道路の嵩上げ策と比べて非常に大きな費用を要するため、どの地域に導入するか検討が必要である。

表 6-15 各シナリオの費用便益比の算出結果

シナリオ	適応策の実施費用 (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
B1 (移転促進：高)	845.3	1008.6	1.19
B2 (移転促進：中+高)	2900.1	4034.4	1.39
C1 (A2×B1)	1553.6	2252.7	1.45
C2 (A3×B1)	2061.7	2698.9	1.31
C3 (A2×B2)	3608.4	5088.5	1.41
C4 (A3×B2)	4116.5	5897.6	1.43

6.3 第6章のまとめ

第 5 章で選定した適応策（順応策：道路嵩上げ政策およびピロティ建築（高床式）と撤退策：浸水リスクを考慮した移転促進政策）の導入効果を把握するために、第 4 章で提案したアクティビティベースモデルの交通需要の推計結果に基づいて、それぞれの適応策シナリオをアクティビティとモビリティに関する複数の評価項目を用いて、評価した。各適応策シナリオの評価にあたっては、どの程度定常時に近づけることができているのかを把握するために、それぞれの評価項目について洪水発生時（適応策なし）における定常時からの変化量と適応策の実施における定常時からの変化量を比較し、その差分に基づいて適応策の導入効果を推計した。また、選定した適応策が経済的に見合うものであるか判断するために、各適応策シナリオを実施する際の被害軽減効果および適応策の実施費用を算出した上で、費用便益分析を実施した。

- ① アクティビティの評価項目としてアクティビティパターンとアクセスできる各施設へのショッピングの訪問回数を設定し、評価した。結果として、道路嵩上げおよび移転促進を組み合わせることで、影響を軽減することが効果的であることを示した。

- ② モビリティの評価項目として、ゾーン間平均旅行時間と各シナリオの目的別トリップの旅行時間を選定し、評価した。結果として、ゾーン間平均旅行時間に関しては、道路かさ上げと移転促進政策を組み合わせ導入することで、約 20 分程度旅行時間を短縮することができるが、道路嵩上げのみを導入した場合には約 30 分程度短縮することができることを示した。また、トリップ別の旅行時間については、浸水深を低下させることで 20 分程度短縮が可能であるが、道路嵩上げの実施によって 30 分程度の短縮可能であり、特に洪水の発生によって旅行時間が伸びたトリップ数の割合を減少することに寄与することを明らかにした。

これらの結果から、洪水の発生によるアクティビティおよびモビリティの両面の影響を軽減するためには、道路嵩上げ等の順応と移転の促進等の撤退に関する適応策を効果的に組み合わせ実施することが必要であることを示した。また、これらの適応策の実施は経済的にみて見合うものであり、洪水の発生に対して有効であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 国土交通省 道路局 都市局：費用便益分析マニュアル, https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/ben-eki_2.pdf (最終アクセス：2022年11月30日).
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局：治水経済調査マニュアル（案）, https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/r204/chisui.pdf (最終アクセス：2022年11月30日).
- 4) Climate Change Benefit Analysis CCBA Guidelines: Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning (ONEP), URL: <https://www.undp.org/thailand/publications/climate-change-benefit-analysis-ccba-guidelines> (Latest accessed on 5 January 2023).

第7章 洪水の発生を前提とした交通計画の在り方の検討

本章では、現在の交通計画と洪水が発生した際の被害の推計方法を整理した上で、本論文の第6章までで示した洪水発生時における人々のアクティビティの変化を反映した交通需要の推計および適応策の評価の方法を組み込んだ洪水の発生を前提とした交通計画の在り方を示した。また、提案した洪水の発生を前提とした交通計画を用いることで、今後の洪水発生時における都市のモビリティの確保の検討も含めた交通システムの構築を目指す方策について示した。

7.1 現在の交通計画と洪水被害の推定方法

はじめに、現在の交通計画と洪水発生時における被害の推計方法について整理した(図7-1)。現在の交通計画については、図7-1上段に示す手順で、立案されている。定常時における日常の移動を便利にして人々の都市生活を支えること、安全で快適なネットワークの構築すること、歩いて暮らせる都市空間の構築に向けた交通整備等の観点から、目標およびそのための評価指標を設定する。本論文で対象とした、ウボンラチャタニ市をはじめとした東南アジア諸国の都市の交通計画の中では、定常時のみを対象として扱っている。タイ・ウボンラチャタニ市だけでなく、公共交通機関の導入によって交通問題の解決に向けて目指している都市が多くある²⁾。次に、現況分析は、パーソントリップ調査の結果や様々なデータに基づいて分析し、各都市が抱える問題点を抽出する。その後、対象とする都市で実現可能な交通政策を整理した上で、既存の交通需要の推計手法である四段階推定法を用いた交通需要予測の結果から目標の達成に向けた評価指標に基づいて導入効果を推計し、評価する。その評価結果から、どの様な交通政策を導入する必要があるか検討した上で、交通計画を立案する。

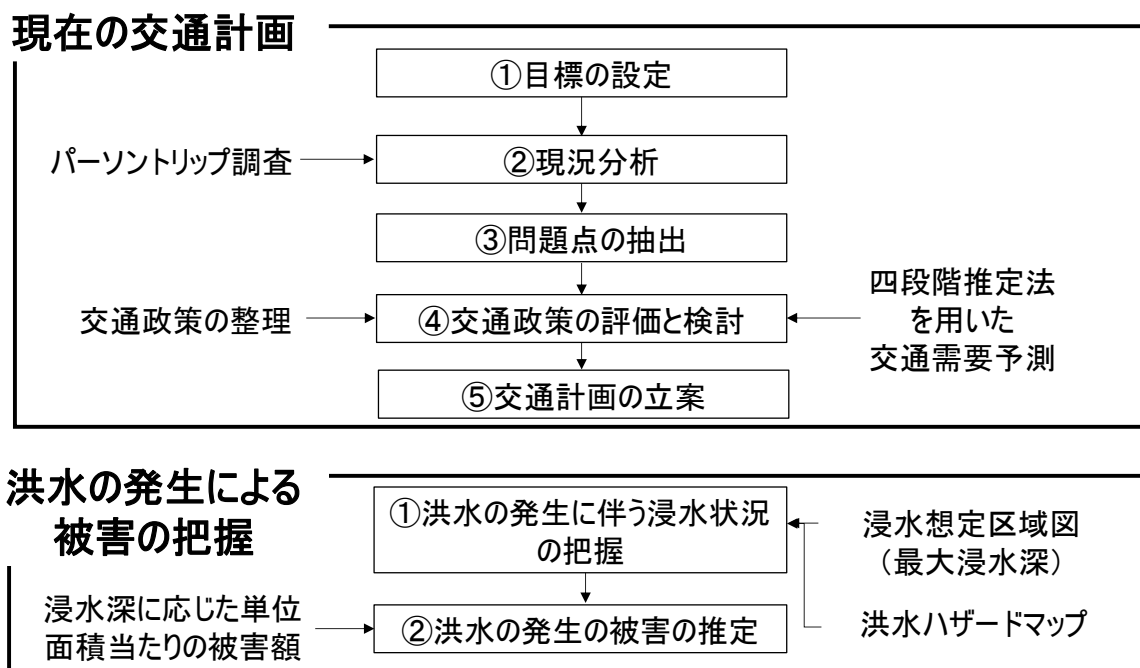


図 7-1 現在の交通計画と洪水の発生による被害状況の把握との関係性

一方で、洪水の発生による被害については、洪水の発生に伴う状況を浸水想定区域図（最大浸水深）や洪水ハザードマップを用いて、把握する（図 7-1 下段）。さらに、浸水深に応じた単位面積当たりの被害額等に乗じることで、洪水の発生による被害額を推定する³⁾。そのため、交通計画上で、本論文で示したようなモビリティの低下やそれに伴うアクティビティへの影響については、交通需要予測を実施する際に考慮されていない。したがって、洪水が発生した際の都市のモビリティの低下に関する分析やその対応については、検討されていない。特に、本論文で対象とした長期に亘って洪水の影響が継続し、モビリティが大幅に低下する都市では、本論文で示したようにアクティビティが定常時と比較して大きく制限されて変化する。しかし、その影響については交通計画の中で対象とされていない。したがって、洪水発生時の都市のモビリティの確保については分析されず、洪水発生下においてどのような交通システムを構築すべきであるかについての検討やその在り方は示されていない。

7.2 洪水の発生を前提とした交通計画の在り方

本論文では、従来の交通計画の対象となっている定常時だけでなく、洪水発生時についても交通計画の対象として、本論文で示した洪水の発生によるアクティビティの変化を十分に把握する。その後、都市のモビリティを確保するための洪水の発生を前提とした交通計画の枠組みを提案する（図 7-2）。

具体的には、目標設定の段階で定常時は従来の交通計画上を掲げている目標については、同様に設定した上で、洪水発生時においても都市のモビリティを確保することについても加える。次に、定常時および洪水発生時のそれぞれの交通状況を分析する。現況分析にあたっては、本論文の第 3 章で示したアクティビティダイアリー調査を実施し、その結果に基づいて分析する。その結果から問題点を抽出して定常時の交通政策に加えて、洪水発生時においてもモビリティを確保するために、道路嵩上げ政策の導入等を検討する。その際に、影響を大きく受ける箇所で道路嵩上げ等を実施するために、第 5 章で提案したアクセシビリティに基づく優先順位づけ手法を適用し、選定する。この中で、優先的に整備が必要であると判断とされた道路区間に嵩上げ等を導入した場合の効果を詳細に把握するために、第 4 章で提案したアクティビティベースモデルを用いて人々のアクティビティの変化を考慮して交通需要を推計し、その結果に基づいて適応策を評価する。この評価結果に基づいて、洪水の発生を前提とした交通計画を立案する（図 7-2）。なお、この交通計画については、長期に亘って適応するための移転政策等との連携も踏まえた上で策定する。

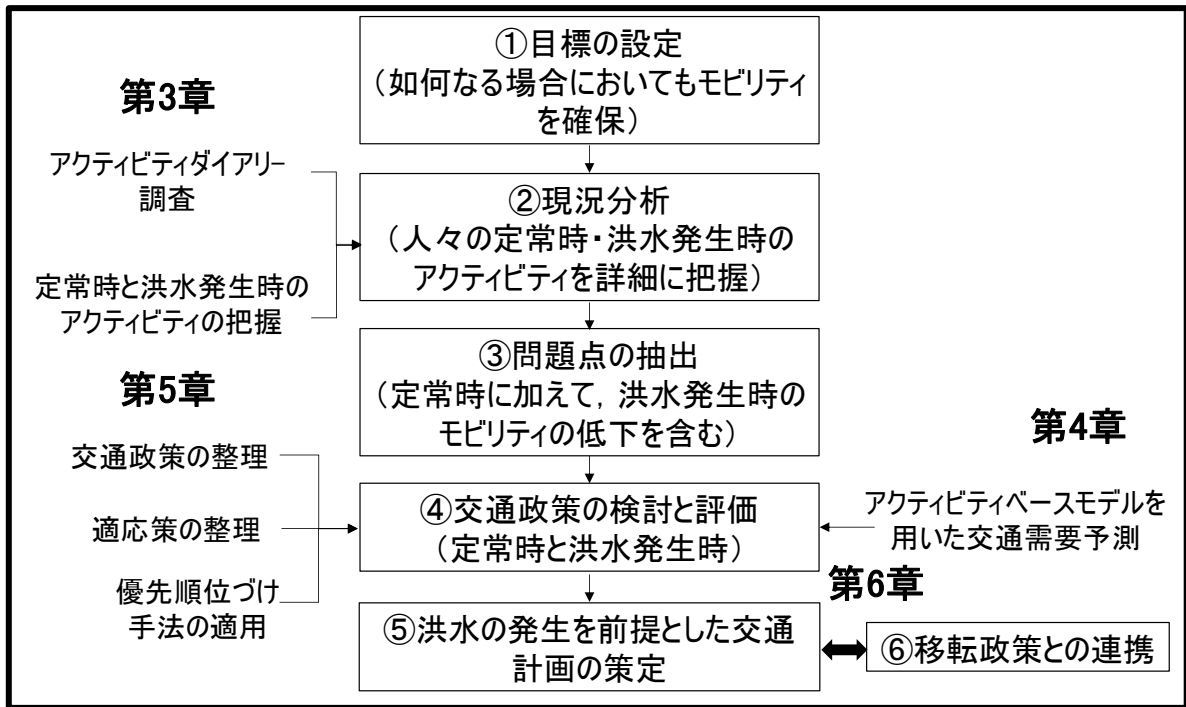


図 7-2 洪水の発生を前提とした交通計画の枠組み

7.3 第7章のまとめ

本章では、現在の交通計画の策定方法と洪水の発生による被害額の推計方法を整理し、洪水発生時における都市モビリティの確保については議論の対象とされていないことを示した。これに対し、本論文では、洪水が発生した際にも都市モビリティを確保するために、長期に亘って広範囲に影響が継続する洪水の発生に対する適応を前提とした交通計画の枠組みを検討した。具体的には、交通計画における目標の設定については、現在の交通計画と対象となっている定常時に加えて、洪水発生時においてもモビリティを確保することを設定する。これによって、洪水が発生した場合においてもなるべく定常時と同じ生活が営めるようになることを目指す。また、現況分析については、現状のパーソントリップ調査ではなく、第3章で示した定常時と洪水発生時のそれぞれの状況でアクティビティダイアリー調査を実施し、詳細にアクティビティの変化を分析した上で、課題を整理する。その後、この調査データを利用し、アクティビティベースモデルを用いて定常時と洪水発生時の交通需要を推計することで、アクティビティの変化を詳細に把握することができる。その後、第5章で示したアクセシビリティに基づく適応策の優先順位づけ方法を適用することで、導入区間を選定した上で評価する。本論文で提案したこれらの手法を適用し、洪水の発生を前提とし、その状況に適応するための交通計画の枠組みを示し、交通システムを構築するために必要な手法を提案した。

参考文献

- 1) 国土交通省：都市・地域総合交通戦略及び特定の交通課題に対応した都市交通計画検討のための実態調査・分析の手引き，URL：<https://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/pttebiki.html>（最終アクセス：2023年1月19日）。
- 2) Peraphan Jittrapirom, Sittha Jaensirisak: Planning Our Way ahead: A Review of Thailand's Transport Master Plan for Urban Areas, Transportation Research Procedia, Vol.25, pp.3985-4002 2017.
- 3) 山田真史，知花武義，渡部哲史：水害統計に基づくリスクカーブ生成による全国一級水系の水害リスク評価，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74，No.5，I_399-I_404，2018.

第8章 結論

8.1 本論文の成果

本論文では、今後も都市洪水の影響が長期に亘って生ずる都市では、洪水が発生した際に、定常時と比較して人々のアクティビティが大幅に変化することを示した上で、このような都市では、洪水の発生を前提とした交通計画を立案し、この状況に適応するための交通システムを実現する必要があることを示した。また、このような交通計画の策定や交通システムの導入を検討するためには、洪水発生時における人々のアクティビティの変化を十分に把握した上で、交通需要の推計時に反映する必要があることを示した。

そのため、本論文では、アクティビティの変化を十分に把握することができるアクティビティベースモデルを用いた交通需要を推計する手法を確立した。この手法と既存の四段階推定法を用いた交通需要の推計結果を比較した。結果として、洪水発生時には、構築したアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計が非常に有効であることを明らかにした。

さらに、構築したアクティビティベースモデルを用いた交通需要の推計手法に基づく適応策の評価方法を提案した。この方法を用いて、検討した順応策（道路嵩上げ政策およびピロティ建築）あるいは撤退策（浸水リスクを考慮した移転促進政策）およびそれらを組み合わせて導入した場合について評価した。また、順応策および撤退策の評価は、優先的に導入をする区間やエリアを設定するための優先順位づけ方法を提案し、適用した。

結果として、適応策の導入によって、アクティビティやモビリティへの影響を大きく軽減することを明らかにし、これらの導入は経済的にも十分に見合うことを示した。最終的には、これらの提案した方法を洪水発生時の交通計画の中に取り込み、都市モビリティを如何なる状況においても確保するための洪水の発生を前提とした交通計画の枠組みを示した。

8.2 本論文における主張する点

本論文の成果から主張する点として、洪水の発生を前提とした交通を実現するためには、以下のアクションが必要となる。

- 洪水が発生した際の都市モビリティの確保

- ①洪水発生時には、道路の冠水や寸断が発生することで、都市のモビリティが大幅に低下することで、住民の都市生活に甚大な被害をもたらす。そのため、個人のアクティビティに大きく影響を及ぼすため、どの様に人々のアクティビティが変化しているのかを事前に詳細に把握する必要がある。
- ②都市モビリティの確保に向けた適応策を検討するためには、人々のアクティビティへの影響を十分に表現できるアクティビティベースモデルを適用した交通需要の推計が必要となる。これによって、洪水の発生による人々のアクティビティの変化を詳細に把握した上で、適応策を評価し、分析することが可能となる。

- 洪水の発生を前提とした交通計画の立案

- ①洪水発生時においても、定常時となるべく同様の都市生活を実現するためには、道路の嵩上げを

はじめとした順応に関する適応策を定常時の計画を検討する際に取り入れる必要がある。そのためには、第7章で提案した洪水発生時の交通計画の在り方に基づいて、計画を策定することで実現する。

- ②洪水の発生を前提とした交通計画を策定する際には、洪水の被害の状況を考慮した移転促進政策等の撤退策との連携も検討する必要がある。

これらを実現することで、長期に亘って広範囲に影響が生ずる洪水の発生に対して、適応するための交通整備が可能となる。具体的には、道路整備における道路構造等の見直し、道路整備の優先順位付けの見直しおよび洪水の発生を考慮した土地利用計画と整合する道路ネットワークの整備の検討等を行うことが可能となる。

8.3 今後の課題

本論文の成果および主張する点から、今後の課題として、以下の事項が挙げられる。

- 提案手法を東南アジアの他都市での適用

本論文では、東南アジア諸国の1つの都市を対象として分析を実施したが、洪水発生時には、アクティビティの変化は大きく異なることが想定されるため、提案手法の適用に向けて、他都市での検証が必要となる。

謝辞

本論文は、非常に多くの方々にご指導、ご支援、ご協力をいただき完成させることができました。ここに深く感謝の意を表します。

主査である福田敦教授（日本大学理工学部交通システム工学科）には、学部2年次より8年間に亘り、大変熱心なご指導を賜りました。また、とても興味深く、時宜にかなったテーマに導いてくださいました。さらに、恵まれた研究環境を整えていただき、たくさんの貴重な経験をさせていただいたおかげでとても有意義な研究生活を送ることができました。今こうして本論文をまとめあげて謝辞を書けるのも、先生のご指導のおかげです。深く感謝申し上げます。

副査の大沢昌玄教授（日本大学理工学部土木工学科）には、我が国の都市計画や交通計画に関してご活躍されている経験から、本論文の前提条件の設定や提案手法の説明方法に至るまで様々なご助言やご指導をいただきました。また、副査の武藤慎一教授（山梨大学大学院総合研究部工学域）には公共事業評価や経済分析に関してご活躍されている経験から、本論文で実施した適応策シナリオの設定やその評価方法に関して多くのご助言をいただきました。同じく副査の小早川悟教授（日本大学理工学部交通システム工学科）には、博士論文の取りまとめ方や交通計画に関わる内容から、論文内の用語や説明の方法に関してご助言をいただきました。主査および副査を引き受けていただいた先生方に深く感謝申し上げます。

交通システム研究室の石坂哲宏准教授には、学部時代より、様々なご指導ありがとうございました。厚く御礼申し上げます。また、菊池浩紀助手には、学部時代から、既存文献の整理の重要性や論文の書き方をはじめとして研究を進める上で身に付けておくべき多くのことをご助言いただきました。厚く御礼申し上げます。

峯岸邦夫教授・前教室主任をはじめとする日本大学理工学部交通システム工学科の諸先生方には、審査会などにおいて多くのご意見、ご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

交通システム研究室の川口亮子秘書には、様々な研究活動のサポートをいただきました。御礼申し上げます。また、博士前期課程2年の宮村幸我氏、博士前期課程1年の佐伯章吾氏には、様々な研究活動のサポートをしていただきました。

本論文で使用した調査データの収集にあたっては、Ubon Ratchathani 大学 Sittha Jaensirisak 博士、Ratthanaporn Kaewklungklom 博士、Rajamangala 大学 Suwanno Piyapong 博士をはじめとする皆さまのご協力をいただきました。また、本論文で用いたアクティビティベースモデルの適用にあたっては、日本大学理工学部交通システム工学科交通システム研究室客員研究員 Sideney Schreiner 博士、昨年、日本大学大学院理工学研究科博士前期課程を修了した Rizky Wahyulinata 氏、PTV グループジャパン 端野良彦様をはじめとする皆さまのご協力をいただきました。

最後に、精神面、金銭面、健康面など全ての面で支えてくださった家族に深く感謝を申し上げます。ここに記しきれない程の国内外の多くの方々のご支援により本論文が完成したことを記し、結びとさせていただきます。

令和5年1月
積田 典泰