

開発途上国の都市洪水を対象とした 土地利用・交通分野における適応策の策定に 向けた定量的政策評価とその妥当性の検証

菊池 浩紀¹・積田 典泰²・福田 敦³・Sittha JAENSIRISAK⁴

¹正会員 日本大学助手 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:kikuchi.hiroki@nihon-u.ac.jp

²学生会員 日本大学大学院 理工学研究科交通システム工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:csno18006@g.nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:fukuda.atsushi@nihon-u.ac.jp

⁴Non-member of JSCE, Ubon Ratchathani University.

近年、気候変動による異常気象をもたらす大規模災害の一つとして、洪水災害が挙げられる。特に都市部において洪水が発生した場合、土地利用・交通分野に与える被害は大きいゆえに、その被害の軽減に向けた対策の実施が急務となっている。その対策例として、既に多くの都市では適応策の実施に向けて議論されているが、その政策の実施によって都市における洪水被害軽減の程度などの効果が定量的に評価できていない。そこで、本研究では都市洪水に対して脆弱である開発途上国の都市を対象とし、土地利用・交通および都市洪水の相互関係を表現したモデルをシステムダイナミクスを用いて構築した上で、各政策シナリオごとにシミュレーションを行い、そのシミュレーション結果の妥当性を検証した。ゆえに、精度の高いデータの未整備が多い開発途上国の都市においても、シミュレーションの実施により妥当性の高い結果を得られることが明らかとなり、適応策の実施効果を定量的に評価可能であることがわかった。

Key Words : *developing city, urban flooding, adaptation policy, dynamic model, policy evaluation*

1. はじめに

近年、地球温暖化による気候変動が急速に進行し、それを抑制するために緩和策などが実施されているが、その効果が現れる以前に異常気象が頻発し、自然災害が増加の一途を辿っている。特に、都市部では災害リスクが高い地域における居住や経済活動の拡大により、今後大規模災害による被害がさらに増加すると予想されている。このような課題に対して、国際社会における多くの政策決定者達は、財政的制約の中で都市部の損害を減らすために効果的な「適応策」の重要性に対する認識を高めている。「適応策」は、2010年に開催された第16回気候変動枠組条約締結国会議 (COP16) において採択されたカンクン合意¹⁾や2014年に開催されたCOP20において採択されたリマ声明²⁾において締結国が適応策を強化していくことが認識され、2015年に開催されたCOP21で採択されたパリ協定では、「適応能力の強化、回復力の強化、

気候変動に対する脆弱性の削減」³⁾という国際的な目標が設定された。特に、パリ協定では開発途上国に対しても先進国と同様の目標が設定され、多くの政策決定者に大きな影響を及ぼしており、各締結国は適応策の計画立案過程および行動の実施に取り組んでいる。締結国の一つである我が国では、適応策の実施に積極的に取り組むというビジョンを掲げた上で、気候変動の影響に対して適応するための気候変動適応計画⁴⁾や気候変動適応法⁵⁾が2018年に施行され、国家レベルだけではなく地方自治体レベルにおいても気候変動適応のための地域計画の確立に努めるという目標が課された。我が国では、適応策が政策レベルで認識されはじめ、それらを検討する体制は既に整備されつつあるが、各地方自治体では適応策に詳しい人材の不足などにより、未だに整備されていない場合が多い。また、地方自治体における適応策に関連する計画の策定状況⁶⁾は、都道府県レベルでは大部分の自治体で策定されているが、市町村レベルでは一部の政令

都市などの自治体を除き、大多数の自治体で適応策に関連する計画が策定されていない。一方で、多くの開発途上国では、適応策に関する計画が未整備の場合が多く、策定に向けた検討段階である場合がほとんどであるが、一部の新興国では、適応策に関する計画が策定され始めている。例えば、タイでは2015年に国家適応計画(NAP)⁷⁾やバンコク首都圏を対象とした気候変動に関するバンコク都マスタープラン⁸⁾などが策定されている。これらは、多分野を横断している計画であるが、各分野でどのような政策を実施していくかなどの具現化された計画まで至っていない。

このように、パリ協定締結国や開発途上国の都市レベルでは、適応策に関連する計画の策定がなされていない場合やその計画の具現化がなされていない場合が多い。さらに、多くの政策決定者は適応策の策定に積極的であるが、その都市で実施しようとする適応策が災害被害をどの程度軽減できるかなどの効果を定量的に明示、把握できていない場合が多い。

したがって、本研究では、自然災害に対して脆弱な開発途上国の都市を対象として、自然災害の一つである都市洪水に着目し、適応策の実施効果を定量的に評価することを目的とする。具体的には、土地利用・交通および都市洪水の関係を表現した動的モデルを構築し、適応策の実施を考慮した各シナリオごとにシミュレーションを行った。さらに、そのシミュレーション結果の妥当性を既存データを用いて検証し、都市における洪水の被害軽減に対する適応策の策定に向けた政策評価の必要性を明らかにする。

2. 既存研究の整理

前節で述べたように、近年、国や都市レベルにおいても適応策が着目されているが、学術レベルにおいても適応策の理論に関する研究が多く取り組まれている。例えば、三村⁹⁾は、適応策に関する認識の現状を整理し、今後の課題の把握を行っている。その上で、途上国における適応力の強化や適応策の具体化の方針が明確になっていない点が現状の課題として述べられている。また、白井¹⁰⁾は、適応策の理論的枠組みを提示した上で、気候変動が影響する分野毎の施策を具体化し、その枠組みが適応策を整理することに有効であるかを検証している。その上で、適応に対する技術と施策に関しては、地方自治体などのステークホルダーが主体となって、施策の精度を高めることが課題であると述べている。さらに馬場¹¹⁾は、気候変動適応策に関与するステークホルダーの利害関心を分析し、地方自治体における政策の実装化に向けた知見を得るためにステークホルダー分析を行い、

その分析結果から適応策の認知不足などの課題点を示し、実装化へ向けた提案を行っている。

また、理論的枠組みだけではなく、気候変動が起因する自然災害に対する適応策を様々な手法を用いて定量的に分析している国内外の研究も多くある。例えば、Singh¹²⁾は、アンケート調査から得られたマトリックスインデックス値を使用し、自然災害に関する適応と脆弱性を評価している。また、Koks¹³⁾は、洪水災害による予想年間被害(EAD)を推計するための土地利用、浸水、および被害モデルを開発し、堤防設置や土地利用制限などの政策を設定し、シナリオ分析を行っている。さらに、中道¹⁴⁾は、適応策に併せて緩和策の実施を想定したシナリオを設定し、家計の最終需要によるCO₂排出量を町丁目単位で定量的に推計している。結果として、削減効果が大きく、適応策と緩和策を同時に実施することは意義があることを明らかにしている。このように、近年では都市レベルにおいても定量的な分析や評価が多く取り組まれているが、想定した施策によるシナリオ分析の結果にどの程度の妥当性や信頼性があるのか検証されていないなどの課題点が残る。

また、自然災害が増加の一途を辿っており、交通や土地利用などの都市活動へ与える影響も非常に深刻になっているため、原因究明などを目的として、これらの問題を定量的に分析している研究も多く取り組まれている。例えば、Pyatkova¹⁵⁾は、洪水による災害を対象として、洪水モデルと微視的交通シミュレーションモデルの動的統合のための方法論を提案し、洪水発生時の道路区間の浸水に関するシミュレーションを行っている。一定期間に道路が浸水することにより、燃料消費量やCO₂排出量の増加などの影響を受けることを明らかにしている。神谷¹⁶⁾は、小規模集落における局地的な豪雨災害に対する課題抽出と支援方策に関してヒヤリング調査と氾濫シミュレーションの解析から明らかにしている。その結果、災害イメージの固定化や避難計画の必要性が指摘され、住民が災害に対する誤った認識があることが明らかとなった。上記のように、自然災害が都市活動へ与える影響を分析している研究では、被害軽減に向けた対策の抽出に焦点が当てられていることが多く、その対策や施策の実施時の効果が分析されていない場合が多い。

ゆえに、自然災害が頻発し、深刻な被害を受けているが、適応策の策定が発展途上やデータの未整備の場合が多い開発途上国の都市を対象として、土地利用、交通、洪水分野の相互関係を表現したモデルを用いて定量的かつ妥当性の高いシミュレーションを行うことで、適応策の実施に向けた定量的な政策評価の必要性が明らかとなるため、本研究は意義があると考えられる。

3. 研究方法

(1) 対象都市

本研究では、タイの北東部であるウボンラチャタニ市を対象とした。この都市の面積は105 km²であり、2015年時点の人口は257,113人の中規模都市である。近年、人口増加により、郊外では住宅地開発が急速に進んでいるが、都市部では未開発地域が不足しているため、洪水リスクの高い地域に開発が進行している。図-1に示すように、都市全体が55ゾーンに分割されており、都市中心部を分断するようにMun川が東から西に流れている。雨季に発生する集中豪雨による河川の氾濫が増加しており、特に、浸水地域は沿岸域を中心に市内中心部に集中している。都市内の洪水被害を軽減させるために、沿岸に洪水防壁が建設されているが、既存の対策では、今後増加すると予想される洪水被害を防ぐには不十分であると考えられる。したがって、洪水被害の軽減のための適応策の実施をシミュレーションを用いて分析することで、その政策の策定に向けた効果が明らかとなる。

(2) 研究の流れ

本研究における研究のフローを図-2に示す。本研究の手順としては、はじめに、対象都市を選定した。前節でも述べた通り、本研究ではウボンラチャタニ市を選定した。次に、モデルを構築した。その構築にあたり、本研究ではシステムダイナミクス (SD) ¹⁾を用いた。SDは、政策分析および設計に対するコンピューター支援のアプローチであり、非線形の微分 (または積分) 方程式に基づいて決定され、政策シナリオを動的にシミュレーション可能である。ゆえに、都市活動と洪水のシステムは複雑であるため、SDを用いて都市モデルおよび洪水モデルを構築し、相互の複雑な事象を表現した。モデルの



図-1 ウボンラチャタニ市におけるゾーンマップ

構築後、既存研究や報告書よりまとめた土地利用および交通分野に関連する適応策から、対象都市に適切な政策を選定した。政策選定後、政策の有無を想定したシミュレーションを実施するためのシナリオを設定した。本研究では、3種類のシナリオを設定し、各シナリオは、政策未実施、土地利用に関連する政策の実施、交通に関連する政策の実施、である。政策シナリオの設定後、構築したモデルを用いて各シナリオ毎にシミュレーションを実施した。シミュレーションの実施にあたり、結果の妥当性を本研究では、シミュレーション結果のアウトプットとして、以下の通りである。土地利用に関連する政策の実施によるアウトプットは人口、交通に関連する政策の実施によるアウトプットは平均旅行時間とした。最後に、上記で得られたシミュレーション結果の妥当性を検証した。本研究では、シミュレーション結果のアウトプットである人口増減率および平均旅行時間の短縮時間の値を妥当性の検証として、河川から各ゾーン中心への最短距離のデータを用いて比較した。比較した結果より、妥当性が十分に高いとされた場合は、適応策の実施効果が高く、定量的に評価できていることと判断した。

(3) モデルの構築

本研究では、SDモデルとして、Pfaffenbichler¹⁸⁾が開発した土地利用・交通モデルの1つであるMetropolitan Activity Relocation Simulator (MARS) は、土地利用と交通の相互作用を表現するためのアプローチであり、都市内の人々の移動や交通などの都市活動のシミュレーションすることが可能である。このモデルには、交通モデル、住

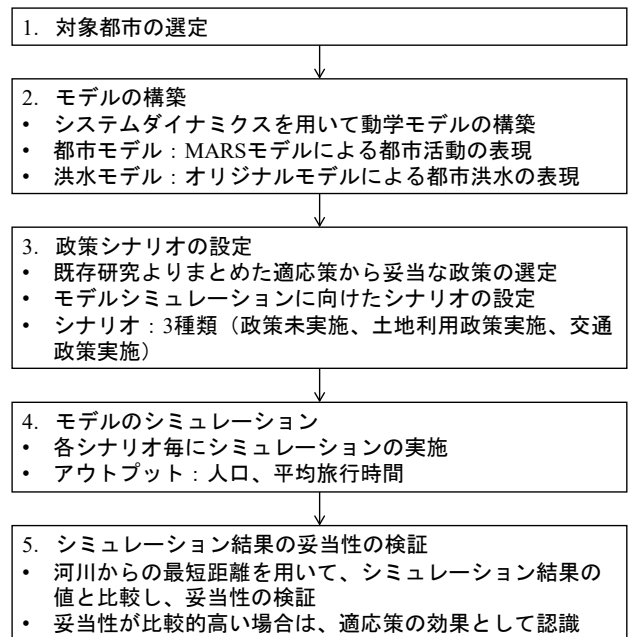


図-2 研究フロー

宅開発モデル，住宅選択モデル，職場開発モデル，職場選択モデル，および燃料消費と排出モデルで構築されている。また，洪水モデルは，筆者らの既存研究¹⁹⁾²⁰⁾において構築されたモデルである。このモデルは，降雨の頻度が高いほど，都市部において洪水が発生する確率が高くなることを表現している。洪水の発生頻度と降雨量は，過去の統計データである。洪水発生により，洪水リスクは河川からの距離や標高によって変化し，そのリスクは，都市活動と洪水モデル間の相互作用の重要な変数であり，洪水リスクが大きく変化すると，交通モデルにおける交通行動と，土地利用モデルにおける住居と職場の位置選択に大きく影響する。

なお，本研究では，適応策の実施効果の定量的評価とその妥当性の検証に着眼点を当てているため，モデルの詳細に関しては既存研究¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾を参照していただきたい。

(4) 政策シナリオの設定

本文の冒頭でも述べたように，多くの既存研究で様々な適応策に関して議論されており，それらの研究から，土地利用および交通分野における洪水災害のための適応策を収集した。本研究では，既存のインフラを活用する2種類の適応策を選択した。

具体的には，土地利用分野では，居住者の移転を促進させる適応策を選択した。具体的には，洪水モデルで推計された洪水リスクの高いゾーンか低いゾーンへ居住者を移転させる政策である。洪水モデルでは，洪水リスクの上昇に伴い，各ゾーンの魅力度が低下することにより，洪水リスクが拡大するにつれて，居住者の移転が増加する。特に，Mun川の沿岸域の居住者に対して効果的な政策であると考えられる。

また，交通分野では，洪水発生時の浸水の場合においても代替移動経路を確保するために，都市部の既存道路を嵩上げする適応策を選択した。嵩上げする道路の位置は，図-3に示す通りである。主要道路を嵩上げすることにより，浸水した場合でも都市部の主要なゾーンへアクセス可能となる。

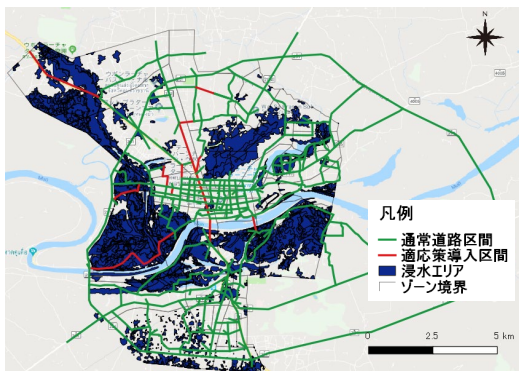


図-3 都市部の浸水域と適応策実施対象の道路区間

一方，シナリオの設定として，中長期における適応策の戦略に向けた3種類のシナリオを作成し，比較した。表-1に示すように，シナリオA，シナリオB，シナリオCを設定した。シナリオAは，政策未実施の場合，シナリオBは土地利用分野の政策を実施した場合，シナリオCは，交通分野の政策を実施した場合である。

4. シミュレーション結果

都市モデルおよび洪水モデルを用いて，各シナリオ毎のシミュレーションを実施した。シミュレーション結果のアウトプットとして，人口および平均旅行時間を以下の通りに示す。

(1) 人口

土地利用分野に関する適応策の実施による効果を明らかにするために，シナリオBのシミュレーションの結果からゾーンごとの人口の増減数（シナリオAとの差分）を図-4に示す。ただし，人口の増減が0であるゾーンはグラフ内から省略した。本研究では，各ゾーンの魅力度に関するパラメータを5段階に分けてシミュレーションを行った。これは，シミュレーション結果の妥当性を検証するために5段階のパラメータを設定した。なお，パラメータ値が大きいほど，適応策の実施が各ゾーンの魅力度に大きく影響することを意味している。

(2) 平均旅行時間

シナリオAとシナリオCの差分に基づく各ゾーンごとの平均旅行時間の短縮時間を図-5に示す。一部のゾーン

表-1 各シナリオの詳細

シナリオ	適応策 (土地利用)	適応策 (交通)
A	—	—
B	○	—
C	—	○

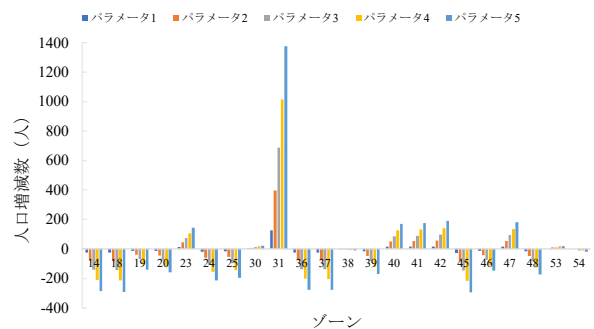


図-4 各ゾーンの人口増減数

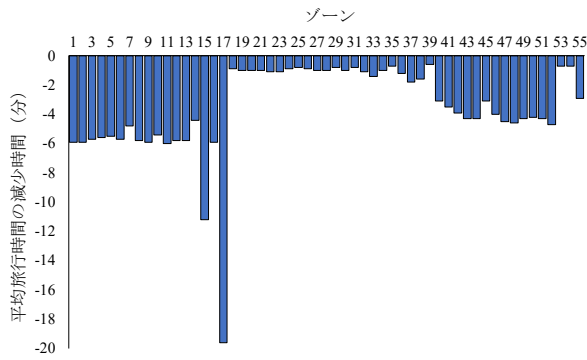


図-5 平均旅行時間の短縮時間

を除き平均旅行時間が減少していることがわかる。特に、Mun川沿岸のゾーン（ゾーン番号1~17）における移動時間は、他のゾーンと比較して約5分以上減少したことがわかる。平均旅行時間が減少したゾーンは浸水域と一致しているため、浸水時に寸断された道路ネットワークが適応策の実施によって通行可能となり、平均旅行時間の減少に繋がったことが推測される。ゆえに、本研究で選択された交通分野における適応策が効果的に機能することが明らかとなった。

5. 妥当性の検証

本研究では、シミュレーションの実施により得られた人口および平均旅行時間の結果の妥当性を検証するために河川から各ゾーンへの最短距離のデータと比較した。妥当性の検証することで、構築したモデルの精度だけではなく、シミュレーションで定量的に得られた適応策の実施効果の結果の信頼度は高くなり、これらの結果が意思決定者の一助となるため、データが未整備である場合が多い開発途上国の都市を対象とした場合においても、妥当性の検証を行う意義は大きいと考えられる。

具体的な検証方法は、地理情報システム (GIS) を使用して算出された河川からの各ゾーンへの最短距離のデータを用いて、その数値と本研究で推計されたシミュレーション値と比較した。ここで用いる河川からの各ゾーンへの最短距離のデータは、ゾーン中心から道路ネットワーク上における最短経路距離と定義した。

人口増減数から算出した人口増減率および平均旅行時間の短縮時間と河川からの最短距離をそれぞれ比較した検証結果を図-6および図-7に示す。

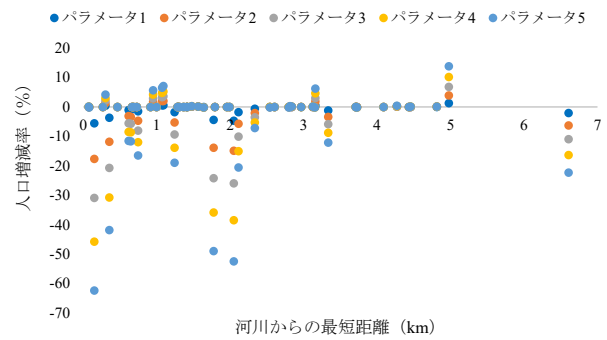


図-6 人口増加率と河川からの最短距離の比較

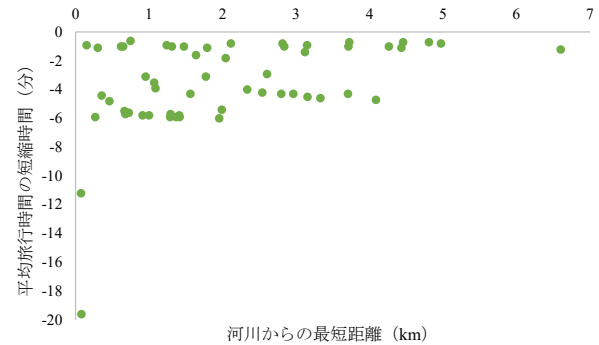


図-7 平均旅行時間の短縮時間と河川からの最短距離の比較

人口増減率と比較した場合は、どのパラメータにおいても河川からの最短距離が短いゾーン（特に約2km以内）の人口減少率が高いことがわかる。これは、土地利用分野の適応策の実施目的である洪水リスクの高い地域から低い地域へ移転することと合致しているため、適応策の実施効果が高いことが明らかであることから、妥当性が高いと言える。

また、平均旅行時間の短縮時間と比較した場合は、人口増減率に比べると特徴的な傾向がなかったが、河川からの最短距離が最も短い地域（X軸の最も0に近い値）では、平均旅行時間が10分以上短縮したことが示されており、河川に近い地域では平均旅行時間が大きく短縮されたことがわかる。それに加えて、河川からの最短距離が2km以内の地域においても約6分程度の時間が短縮されており、シミュレーションで得られた平均旅行時間の短縮時間は、ある程度の適応策の効果は出ているが、さらにモデルも改良することにより、より妥当性の高い結果が得られるのではないかと考えられる。

このように、定量的にシミュレーション分析をするために用いたSDモデルは、適応策の実施効果の影響がシミュレーション結果に反映されており、妥当性の高い数値であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、開発途上国の都市を対象とし、洪水災害に対する土地利用および交通分野における適応策の実施効果をモデルを用いて定量的に評価した。また、SDで構築された動学モデルによるシミュレーション結果の妥当性を検証することにより、信頼性の高い結果を得ることができ、意思決定者に対する中・長期的な政策の策定に向けた知見となり得る。さらに、データの未整備の場合が多い開発途上国の都市においても、信頼度の高いシミュレーションの実施および適応策の定量的評価を行うことで、都市レベル単位での政策の実施効果を明示することが可能である。ゆえに、増加の一途を辿る深刻な洪水災害に対する適応策の具体的な計画を策定する際に、本研究で明示した定量的な政策評価の結果が一助と考えられる。

しかしながら、シミュレーション分析においては妥当性の高い結果となったが、政策の策定においては、対象とする地域の住民の意見や日常の行動が重要となってくる。実際に洪水災害が発生した場合、その都市の人々はどういった交通行動をとり、どのように土地利用が変化するかなどの実態が本研究では検証できていない。

今後の課題として、洪水災害発生時における交通行動調査や住民移転調査などを実施し、実態を把握するための分析が必要となり、さらに、その実態に則したモデルの構築を行った上で、適応策の定量的な評価が必要である。

参考文献

- 1) UNFCCC : Cancun Agreements, <https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/cancun-climate-change-conference-november-2010/statements-and-resources/Agreements>, Last accessed on September, 2019.
- 2) UNFCCC : Lima call for climate action, <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2014/cop20/eng/10a01.pdf>, Last accessed on September, 2019.
- 3) UNFCCC : The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change, http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php, Last accessed on September, 2019.
- 4) 環境省 : 気候変動適応計画, <http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf>, 最終閲覧 2019年9月.
- 5) 環境省 : 気候変動適応法, <http://www.env.go.jp/earth/tikujyokaisetu.pdf>, 最終閲覧 2019年9月.
- 6) 気候変動情報プラットフォーム : 地方公共団体の適応に関する計画と情報, http://www.adaptation-platform.nies.go.jp/lets/local_list.html, 最終閲覧 2019年9月.
- 7) Climate Change Management and Coordination Division (CCMC) : Thailand's national adaptation plan, <https://climate.onep.go.th/wp-content/uploads/2019/07/NAP.pdf>, Last accessed on September, 2019.
- 8) Bangkok Metropolitan Administration : Bangkok master plan on climate change 2013-2023, <http://www.mayorsforpeace.org/english/whatsnew/activity/data/2018/Bangkok Master Plan on Climate Change.pdf>, Last accessed on September, 2019.
- 9) 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, pp.103-110, 地球環境, Vol.11, No.1, 2006.
- 10) 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—, pp.313-323, 環境科学会誌, 27(5), 2014.
- 11) 馬場健司, 松浦正浩, 篠田さやか, 脇岡靖明, 白井信雄, 田中充 : ステークホルダー分析に基づく防災・インフラ分野における気候変動適応策実装化への提案—東京都における都市型水害のケーススタディー, pp.II_443-II_454, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.6 (環境システム研究論文集第 40 巻), 2012.
- 12) Singh, R. B., Pandey, B. W. and Prasad, A. S. : Adaptation strategies for flood risk mitigation in lower Brahmaputra River basin, Assam through integrated river basin Management, pp.159-170, *Transactions*, 36-2, 2014.
- 13) Koks, E. E., Moel, d. H., Aerts, J. C. J. H. and Bouwer, L. M. : Effects of spatial adaptation measures on flood risk study of costal floods in Belgium, pp.413-425, *Regional Environmental Change*, 14, 2014.
- 14) 中道久美子, 山形与志樹, 瀬谷創 : 東京都市圏の気候変動緩和・適応策の相互作用に関する土地利用シナリオの CO₂排出量評価, pp. I_381- I_389, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.69, No.5 (土木計画学研究・論文集第 30 巻), 2013.
- 15) Pyatkova, K., Chen, A. S., Djordjevic, S., Butler, D., Vojinovic, Z., Abebe, Y. A. and Hammond, M. : Flood impacts on road transportation using microscopic traffic modelling techniques, pp.115-126, *Simulating Urban Traffic Scenarios*, 2018.
- 16) 神谷大介, 赤松良久, 板持直希, 竹林洋史, 二瓶泰雄 : 小規模集落における豪雨災害に対する課題と支援方策—奄美大島豪雨災害を事例として—, pp. I_305- I_312, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.5, 2012.
- 17) Morecroft, J. : A critical review of diagramming tools for conceptualizing feedback system models, pp.20-29, *DYNAMICA*, 8, 1982.
- 18) Pfaffenbichler, P. : The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator): Development, testing and application, *PhD Thesis Vienna University of Technology, Austria*, 2003.
- 19) Kikuchi, H., Fukuda, A., Tsumita, N. and Takigawa, T. : Dynamic simulation of adaptation policy for flood impacts on urban activities: A case study of Khon Kaen, Thailand, *Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology*, 2018.

- 20) Tsumita, N., Kikuchi, H. and Fukuda, A. : Estimation of disaster damage cost by urban flood and impacts of adaptation policies -The case study of Khon Kaen, Thailand-, *Proceeding of the 11th ATRANS Annual Conference*, 2018.

(?????.?.? 受付)

QUANTITATIVE POLICY EVALUATION AND ITS VERIFICATION OF
VALIDITY TOWARD THE DEVELOPMENT OF ADAPTATION POLICIES
IN THE LAND-USE AND TRANSPORTATION FIELDS FOR URBAN FLOODS
IN DEVELOPING CITIES

Hiroki KIKUCHI, Noriyasu TSUMITA, Atsushi FUKUDA and Sittha JAENSIRISAK