

# 立地均衡型都市モデルを用いた水害リスク分布の時系列推計とリスク軽減施策の評価

Estimation of time-series distribution of flood risk using the location equilibrium type urban model and evaluation of risk mitigation measures

佐藤徹治研究室 22R2007 坂野 繁輝

## 1. 序論

近年、激甚災害に認定された台風や豪雨は増加傾向にあり、2018年から2023年の直近5年間では15件発生している。そのため、洪水等の水害に対応する施策がこれまで以上に重要になっている。

本研究では、立地均衡型都市モデルを用いた都市内の住宅タイプ・年齢階層別人口分布、住宅タイプ・年齢階層別、浸水深別のリスクの違いを踏まえた水害リスク分布の時系列推計手法を提案する。また、宮崎県宮崎市を対象に実証モデルを構築し、リスク軽減施策が都市内人口分布、水害リスク分布に及ぼす時系列の影響を分析する。さらに、水害リスク軽減施策の評価を行う。

立地均衡型都市モデルを用いて、水害リスク軽減施策の実証的な評価手法を提案している既往研究として、寺本ら<sup>1</sup>、今井ら<sup>2</sup>がある。寺本らは、世帯所得の分布を考慮した立地均衡モデル、水害リスクに対応した土地利用規制の費用便益評価手法を構築し、土地利用規制が世帯に与える影響を所得の違いに応じて分析した。今井らは、時系列に拡張した立地均衡モデルを構築し、富山市を対象に人口誘導、立地規制等の水害リスク軽減施策が都市内人口分布に及ぼす長期的な影響を分析した。

しかし、これらの研究では、水害リスクを評価する上で不可欠な年齢階層別の人口分布推計が行われていない。また、所得や人口の増減のみから施策評価を行っており、水害リスクの視点からの施策評価が行われていない。住宅タイプ・年齢階層別の人口分布を推計可能なモデルを構築する点、人口分布に基づくリスク分布を推計してリスク軽減施策の評価を行う点は本研究の特徴である。

## 2. 評価手法の開発

### 2.1 評価手法の概要

評価手法の全体構成を図-1に示す。

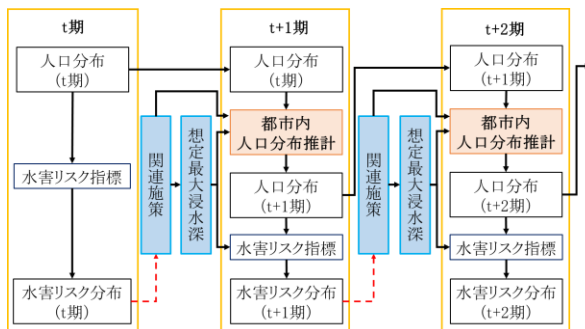


図-1 評価手法の全体構成

評価手法は、都市内人口分布推計モデルと水害リスク指標を組み合わせたものとする。都市内人口分布推計モデルでは、関連施策、想定最大浸水深が転居行動に影響を与えると仮定する。水害リスク指標は、各期の人口分布と想定最大浸水深を用いて算出する。

なお、水害リスク分布が関連施策に影響を及ぼすことも考えられるが、本手法では考慮しない。

### 2.2 都市内人口分布推計モデル

#### (1) 概要

モデルは、立地均衡モデルとコーホート要因法を組み合わせたものとする。立地均衡モデルでは、転居の有無で世帯を分け、転居世帯による全住宅タイプの住宅床の需要と不在地主による住宅床の供給が均衡することを仮定する。また、住宅タイプ、世帯主の年齢階層によって浸水深や施策を踏まえた転居行動の違いがあることを想定する。図-2に人口分布推計モデルのフローを示す。

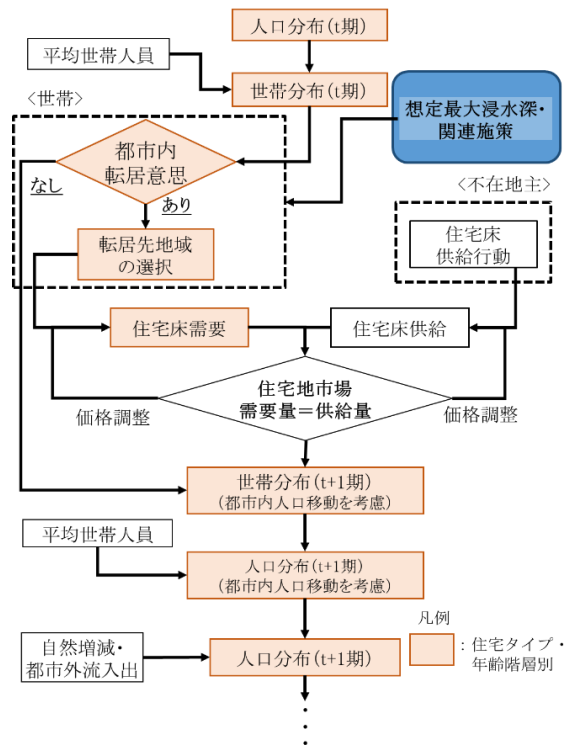


図-2 都市内人口分布推計モデルの全体フロー

#### (2) 転居先ゾーンの選択

各世帯の転居先ゾーンの選択確率は、住宅タイプ・世帯主の年齢階層別に転居先候補の効用水準を基に多項ロジットモデルで表現できると仮定する。転居先ゾーン選択確率を(1)式、各ゾーンの部分効用を(2)式に示す。

ここで、下添字  $i$  はゾーン、 $h$  は住宅タイプ、 $g$  は年齢階層、 $t$  は年を表す。  $P$  は転居先ゾーン選択確率、 $V$  は部分効用、 $\tau$  はその他の効用、 $r$  は床賃料、 $Z$  は床賃料以外の各種要因ベクトルを表す。

$$P_{i,h,g,t} = \frac{\text{EXP}(V_{i,h,g,t} + \tau_{i,h,g})}{\sum \text{EXP}(V_{i,h,g,t} + \tau_{i,h,g})} \quad (1)$$

$$V_{i,h,g,t} = f(r_{i,t}, Z_{i,t}) \quad (2)$$

### (3) 住宅床需要量

各ゾーンの住宅床需要量は(3)式に示すとおり、1世帯あたりの住宅床需要量に各ゾーンに転入する世帯数を乗じて求める。1世帯あたりの住宅床需要量は、(4)式に示すとおり、床賃料によって変化すると仮定する。各ゾーンに転入する世帯数は(5)式で表される。

ここで、 $D$  は住宅床需要量、 $L$  は1世帯あたりの住宅床需要量、 $N$  は転入世帯数、 $y$  は所得、 $NT$  は都市内転居意思ありの総世帯数である。

$$D_{i,h,g,t} = L_{i,h,t} \cdot N_{i,h,g,t} \quad (3)$$

$$L_{i,h,g,t} = \frac{b_h}{r_{i,t}} y_{i,h,g,t} \quad (4)$$

$$N_{i,h,g,t} = P_{i,h,g,t} \cdot NT_{h,g,t} \quad (5)$$

### (4) 住宅床供給量

不在地主による住宅床供給量は、(6)式に示すとおり、床賃料によって変化すると仮定する。ここで、 $S$  は住宅床供給量、 $\sigma$  はパラメータ、 $\bar{S}_{i,t}$  は供給可能面積である。

$$S_{i,t} = \left(1 - \frac{\sigma_i}{r_{i,t}}\right) \cdot \bar{S}_{i,t} \quad (6)$$

### (5) 住宅床市場の均衡

各ゾーンにおいて、全年齢階層・全住宅タイプの住宅床需要量と住宅床供給量が一致するように住宅床市場で価格調整が行われ、最終的に立地面積が決定される。 $t$  期における住宅床の需要と供給の均衡を(7)式に示す。

$$S_{i,t}(r_{i,t}) = \sum_h \sum_g D_{i,h,g,t}(r_{i,t}) \quad (7)$$

## 2.3 水害リスク指標

水害リスク指標は、家屋の資産価値を考慮する「資産リスク指標」、避難に要する時間を考慮する「避難リスク指標」の2指標とする。資産リスク指標では、想定最大浸水深と住宅タイプ別人口、重み付けパラメータを用いて浸水深別、住宅タイプ別のリスクの違いを表現する、避難リスク指標では、想定最大浸水深と年齢階層別人口、重み付けパラメータにより、浸水深別、年齢階層別の避難リスクの違いを考慮する。(8)、(9)式に資産リスク指標、避難リスク指標を示す。

ここで  $AR$  は資産リスク指標、 $ER$  は避難リスク指標、 $FD$  は想定最大浸水深、 $POP$  は人口、 $\theta_{FD}$  は浸水深別重み付けパラメータ、 $\theta_h$  は住宅タイプ別重み付けパラメータ、 $\theta_g$  は年齢階層別重み付けパラメータを表す。

$$AR_{i,t} = \theta_{FD} \cdot FD_{i,t} \cdot \sum_h \theta_h \cdot POP_{i,h,t} \quad (8)$$

$$ER_{i,t} = \theta_{FD} \cdot FD_{i,t} \cdot \sum_g \theta_g \cdot POP_{i,g,t} \quad (9)$$

## 3. 宮崎市を対象とする実証モデルの構築

### 3.1 対象圏域・ゾーン区分

実証モデルの対象圏域は、宮崎市の市域のうち、2020年時点で人口および供給可能床面積が存在するメッシュとする。ゾーン区分については、すべて世界測地系 1kmメッシュとする。ゾーン総数は335メッシュである。

### 3.2 転居先ゾーン選択要因

床賃料以外の転居先ゾーン選択要因、即ち(2)式の床賃料以外の説明変数として、研究目的から「洪水による想定最大浸水深」、既往研究を参考に「中心市街地までの距離」を選定した。さらに、2016年に行われた宮崎市民アンケート調査における質問「あなたの日常生活について、その活動の重要度をお答えください」に対する回答を参考に、「食品スーパーまでの距離」、「町医者・クリニックまでの距離」を候補に加えた。

### 3.3 アンケート調査の実施

(2)式のパラメータを推定するため、宮崎市の住民に対してアンケート調査を実施した。アンケート調査では、希望住宅タイプ別に3つの仮想的な転居先地域から最も望ましい1地域を選択する設問に4度回答していただいた。調査では、上記に加え、個人属性(年齢、世帯人数、所得等)、転居意向(5年以内の転居意思、希望住宅タイプ、水害リスク軽減施策実施時の転居意思の変化等)を併せて尋ねた。

調査は、Google Forms で実施し、民間WEB調査会社のモニタ登録者のうち、宮崎県宮崎市在住の世帯主に回答を依頼した。2023年7月27(木)～31(月)の間に445の回答を得ることができた。

### 3.4 部分効用関数のパラメータ推定

部分効用関数(2)式のパラメータ推定は、アンケート調査結果の個票データを用いて、最尤法(20%水準で非有意な変数を除いて推定を繰り返す減少法)により住宅タイプ別、年齢階層別に行った。ただし、サンプル数の不足等により有意な推定結果が得られなかった場合には、年齢階層を一部統合して推定することとした。(2)式の住宅タイプ・年齢階層区分を表-1に示す。

表-1 部分効用関数の住宅タイプ・年齢階層区分

戸建て		賃貸マンション・アパート		分譲マンション	
20歳未満	30代以下	20歳未満	20代以下	20歳未満	40代以下
20代		20代	30, 40代	30代	
30代		30代	40代	40代	
40代	40代	40代	30, 40代	40代	50-60代
50代	50-64歳	50代	50代	50代	
60-64歳		60-64歳	60-64歳	60-64歳	
65-69歳	65歳以上	65-69歳	50歳以上	65-69歳	70歳以上
70-74歳		70-74歳		70-74歳	
75-79歳		75-79歳		75-79歳	
80歳以上		80歳以上		80歳以上	

### 3.5 水害リスク指標重み付けパラメータ推定

(8), (9)式の浸水深別重み付けパラメータ $\theta_{FD}$ は、国土交通省水管理・国土保全局の「治水経済調査マニュアル(案)」<sup>3)</sup>に記載されている「家屋被害」の「浸水深別被害率」を参考に、表-2のように設定した。

(8)式の住宅タイプ別重み付けパラメータ $\theta_h$ は、「治水経済調査マニュアル(案)」<sup>3)</sup>の「家屋資産額」の「家屋資産額補正」を参考に、表-3のとおり設定した。

(9)式の年齢階層別重み付けパラメータ $\theta_g$ は、阿久津(1975)：「歩行の科学：運動不足克服のために」<sup>4)</sup>の「5歳階級別平均歩行速度」に基づき設定した。平均歩行速度をそのまま乗じた場合、歩行速度が速いとリスクが増加するため、逆数を取り、パラメータとして使用した。

年齢階層別重み付けパラメータを表-4に示す。

表-2 浸水深別重み付けパラメータ

想定最大浸水深	0m	0.25m	1.75m	4.0m	7.5m
パラメータ	0.000	0.058	0.468	0.843	0.843

表-3 住宅タイプ別重み付けパラメータ

	戸建て	マンション	アパート
パラメータ	1.0	平均階層(f)が3階未満の場合 1.0	平均階層(f)が3階以上の場合 2/f

表-4 年齢階層別重み付けパラメータ

年齢階層	秒速(m/s)	逆数	年齢階層	秒速(m/s)	逆数
24歳以下	1.348	0.742	50~54歳	1.208	0.828
25~29歳	1.328	0.753	55~59歳	1.134	0.882
30~34歳	1.398	0.716	60~64歳	1.078	0.928
35~39歳	1.271	0.787	65~69歳	1.030	0.971
40~44歳	1.278	0.783	70~74歳	0.964	1.037
45~49歳	1.343	0.745	75歳以上	0.877	1.141

## 4. シミュレーション分析

### 4.1 リスク軽減施策実施範囲の設定

施策実施範囲の違いによる施策の影響を検証するため、2通りの範囲を設定した。範囲1は人口集中地区(2015年度)かつ鉄道駅から半径1km圏、範囲2は範囲1内かつ浸水時に大規模な被害が予想される1級河川大淀川沿いの浸水区域とした。範囲1, 2を図-3に示す。

### 4.2 リスク軽減施策の設定とシミュレーションケース

水害リスク軽減施策としては、浸水深を低減するハード施策、施策実施地域に転居する世帯に補助金を給付するソフト施策を実施することとする。ここでは、ハード施策の実施により、施策実施地域の想定最大浸水深が0mとなることを仮定する。ソフト施策については、施策実施地域に転居した世帯は補助金分の可処分所得が増加することを仮定する。補助金給付額については富山県富山市と北海道深川市の居住事業を参考に設定する。施策一覧とシミュレーションケースを表-5に示す。

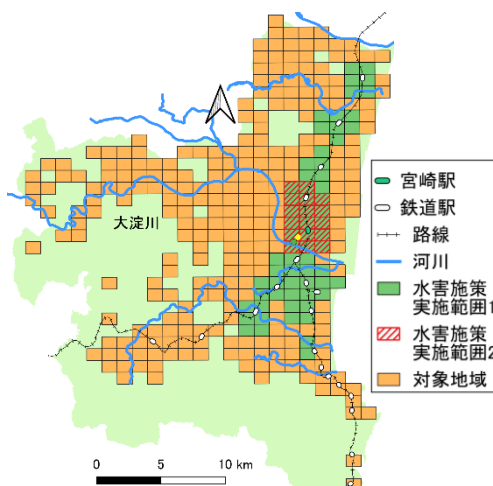


図-3 水害施策実施範囲

表-5 水害リスク軽減施策とシミュレーションケース

	ソフト施策	ハード施策
ケース0	-	-
ケース1	補助金: 50万円	-
ケース2	補助金: 300万円	-
ケース3	-	浸水深0m
ケース4	補助金: 50万円	浸水深0m
ケース5	補助金: 300万円	浸水深0m

### 4.3 分析結果

構築した実証モデル、水害リスク指標および設定した各種重み付けパラメータを用いて、ケース0~5における2025~2045年(5年おき)の人口分布、水害リスク分布の推計を行った。分析結果の例として、ケース5の人口分布のケース0と比較しての変化(施策実施範囲: 範囲2, 2045年)を図-4に示す。

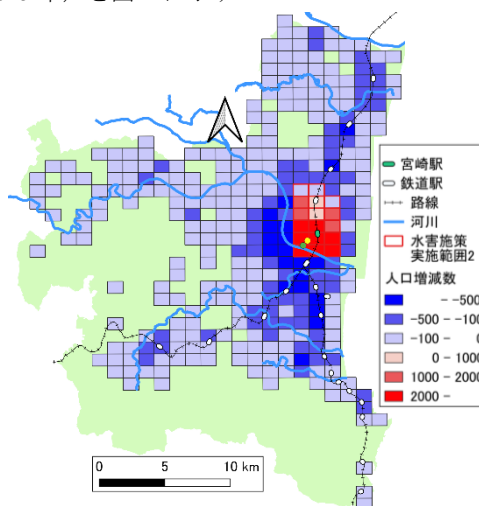


図-4 人口分布の変化(ケース5-ケース0)  
(施策実施範囲: 範囲2, 2045年)

## 5. 水害リスク軽減施策の評価・検討

### 5.1 施策による人口・水害リスクの変化

各ケースの2045年の施策範囲内・外の人口割合を表-6, 表-7に示す。また、施策実施による宮崎市全体の資産リスク、避難リスクの変化をそれぞれ表-8, 表-9に示す。

表-6 施策実施範囲内外の人口割合（範囲1，2045年）

水害施策実施範囲1				
ケース	範囲1内 人口	範囲1外 人口	範囲1内 割合	範囲1外 割合
ケース0	228,348	140,049	62.0%	38.0%
ケース1	230,700	137,697	62.6%	37.4%
ケース2	240,463	127,934	65.3%	34.7%
ケース3	243,727	124,670	66.2%	33.8%
ケース4	250,640	117,757	68.0%	32.0%
ケース5	256,326	112,070	69.6%	30.4%

表-7 施策実施範囲内外の人口割合（範囲2，2045年）

水害施策実施範囲2				
ケース	範囲2内 人口	範囲2外 人口	範囲2内 割合	範囲2外 割合
ケース0	112,504	255,892	30.5%	69.5%
ケース1	114,620	253,777	31.1%	68.9%
ケース2	124,638	243,759	33.8%	66.2%
ケース3	133,134	235,263	36.1%	63.9%
ケース4	136,818	231,579	37.1%	62.9%
ケース5	149,714	218,682	40.6%	59.4%

表-8 施策による市全体の資産リスク変化（2045年）

ケース0：		140,915					
水害施策実施範囲1				水害施策実施範囲2			
ケース	資産 リスク	ケース0差	ケース0比	資産 リスク	ケース0差	ケース0比	
ケース1	139,719	-1,196	-0.85%	140,549	-366	-0.26%	
ケース2	134,452	-6,464	-4.59%	138,383	-2,532	-1.80%	
ケース3	89,994	-50,922	-36.14%	104,932	-35,983	-25.54%	
ケース4	88,383	-52,532	-37.28%	103,377	-37,538	-26.64%	
ケース5	81,240	-59,675	-42.35%	97,873	-43,043	-30.54%	

表-9 施策による市全体の避難リスク変化（2045年）

ケース0：		376,722					
水害施策実施範囲1				水害施策実施範囲2			
ケース	避難 リスク	ケース0差	ケース0比	避難 リスク	ケース0差	ケース0比	
ケース1	375,341	-1,381	-0.37%	376,789	67	0.02%	
ケース2	369,455	-7,266	-1.93%	376,883	162	0.04%	
ケース3	175,329	-201,392	-53.46%	241,128	-135,593	-35.99%	
ケース4	172,588	-204,133	-54.19%	237,513	-139,209	-36.95%	
ケース5	158,022	-218,700	-58.05%	234,821	-141,901	-37.67%	

施策範囲内の人口割合は、転入世帯への300万円の補助金給付によって約3%、ハード施策によって4.2~5.6%、これらの組合せによって10%近く増加する結果となった。また、資産リスク・避難リスクはハード施策を実施することで大きく減少する結果となった。

## 5.2 施策の費用対効果分析

ここでは、ケース1~5の資産リスク・避難リスクとケース0の資産リスク・避難リスクの差分を効果と見做し、施策費用との比率を費用対効果とする。

ソフト施策の費用は、ケース毎の補助金給付額に施策実施範囲への転入世帯数を乗じることで算出した。ハード施策については、北小岩一丁目地区高規格堤防整備事業の費用を基に算出した。2045年のケース1~5の避難リスクの費用対効果を表-10に示す。

ケース3（ハード施策のみ）が最も大きくなった。ケース1, 2（ソフト施策のみ）の費用対効果は、ケース3~5と比較して極めて小さいことが明らかとなった。また、範囲1と2で費用対効果を比較すると、ケース1, 2は範囲1、ケース3~5は範囲2の方が大きいことが分かる。

表-10 施策の費用対効果（2045年）

ケース	水害施策実施範囲1			水害施策実施範囲2		
	リスク差	費用 (億円)	リスク差/費用	リスク差	費用 (億円)	リスク差/費用
ケース1	1,381	351.7	3.93	67	177.2	0.38
ケース2	7,266	3,481.6	2.09	162	1,848.7	0.09
ケース3	201,392	617.2	326.30	135,593	308.6	439.38
ケース4	204,133	1,081.1	188.82	139,209	594.0	234.35
ケース5	218,700	4,223.4	51.78	141,901	2,633.9	53.87

## 6. まとめ

本研究では、住宅タイプ・年齢階層別の転居行動の違いを考慮した立地均衡型都市モデルを構築するとともに、住宅タイプ・年齢階層別、浸水深別のリスクの違いを踏まえた水害リスク分布の時系列推計手法の枠組みを示した。また、宮崎市を対象に、水害リスク軽減施策（ソフト・ハード）が2045年までの人口・水害リスク分布に及ぼす影響の推計、施策の費用対効果分析を行った。

分析の結果、ソフト施策（施策実施範囲への転入世帯への補助金給付）、ハード施策（想定最大浸水深を0とする施設整備）ともに、人口集約に効果的であることが明らかとなった。また、費用対効果の観点からは、ハード施策の費用対効果はソフト施策と比較して極めて大きいこと、施策実施範囲は人口集中地区かつ鉄道駅1km圏の全域よりも、大淀川沿いの浸水区域に限定する方が効果的であることが示された。以上から、水害リスク軽減施策としては、ソフト施策よりもハード施策を優先して取り組むことが望ましいことが示唆された。

なお、本研究では、様々な水害リスク軽減施策がある中で、補助金給付と想定最大浸水深を0とするハード施策のみを考慮した。本研究で提案した手法を用いて様々な施策の組み合わせによるシミュレーション分析を繰り返し実施し、最適な施策を検討する余地がある。

## 参考文献

- 1) 寺本雅子・市川温・立川康人・椎葉充晴（2010）：水災害危険度に基づく土地利用規制の費用便益評価―世帯所得の分布を考慮して―，土木学会論文集B，Vol.66，No.2，pp.119-129
- 2) 今井一貴・佐藤徹治・神永希・杉本達哉・高森秀司（2016）：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，Vol.72，No.5，pp.423-434
- 3) 国土交通省，水管理・国土保全局（2020）：治水経済調査マニュアル（案）
- 4) 阿久津邦男（1975）：「歩行の科学：運動不足克服のために」，不昧堂新書