

〈特別研究課題〉 災害リスクとコンパクト性を考慮した  
都市の最適土地利用モデルの開発  
助成研究者 名古屋工業大学 中居 楓子



## 災害リスクとコンパクト性を考慮した 都市の最適土地利用モデルの開発

中居 楓子  
(名古屋工業大学)

## Optimal Residential Area Model Taking Account of Tsunami Risks and Compactness of City

Fuko Nakai  
(Nagoya Institute of Technology)

### Abstract :

Ongoing urban planning forces us to consider both disaster risks and daily convenience as elements of well-being. This study developed an optimal residential area model for analyzing the trade-offs between safety from tsunamis and ordinary convenience, which will support pre-disaster recovery. The model consists of weighted multicriteria: the total tsunami risk, the total infrastructure maintenance cost, and the total traffic time for commuting with controlling optimal allocations of population, land use, and commuting trips. Here we optimize “Reduction Potential Achievement (*RPA*)”: it indicates how much the respective optimal value achieved against the value (reduced potential) that the three objectives were optimized alone as a baseline. We applied the model to Kuroshio, a tsunami-prone area along the Nankai Trough in Japan, and calculated for each 500-meter mesh. The analysis yielded the following main results for the target area. (1) the results with various combination patterns of the control variables showed that the larger the number of variables, the more concentrated residential areas became. (2) the sensitivity analysis results that change the weight of each criterion revealed trade-offs in which the more the tsunami risk is weighted, the more the infrastructure maintenance and traffic costs increase. Finally, (3) the optimal residential areas was examined every 10 years, with a planning period of 50 years. We conveyed sensitivity analysis that change the tsunami occurrence time, then revealed that the later

the year of occurrence, the larger the *RPA* for each objective. In addition, the most cost-effective plan is the large relocation in the initial period, regardless of the occurrence time.

## 1. はじめに

東日本大震災を契機に、土地利用計画において災害からの安全性を考慮することが主流になりつつある。2011年に制定された津波防災地域づくりに関する法律では、市町村は海岸保全施設だけでなく、地域全体で被害を減らす総合的対策を進めるための推進計画を作成できるようになった<sup>1)</sup>。また、2014年の都市再生特別措置法改正で創設された立地適正化計画制度<sup>2)</sup>では、都市のコンパクト化を図るための居住誘導区域を定めるようになり、さらに、2020年には居住誘導区域内の災害ハザードエリアにおいて、開発抑制や移転の促進を含む「防災指針」が定められるようになった<sup>3)</sup>。

しかし、津波リスクの低い高台に居住エリアを、海岸や河岸付近に商業施設や公園などを立地させた職住分離のまちでは、通勤時間の増加に加え、都市のコンパクト性が低下して財政を圧迫するなどの問題も指摘されている。実際、南三陸町の都市構造を震災前と復興計画実施後で比較した森田ら<sup>4)</sup>は、復興後は住宅の高台移転により浸水建物数が減り、集約型都市構造になるものの、通勤通学などに要する移動距離は復興後に増え、生活範囲が拡大したことを示している。また、Iuchi and John<sup>5)</sup>やESSC<sup>6)</sup>によれば、フィリピンの一部地域では、復興後の低所得者層向け住宅に移転した人々は、電気、水道等の公共サービスに接続されていないことや、就業の機会が少ないために生活拠点を元の地域に戻ってしまったことが示されている。特に、海や山などの土地に根差した資源がまちの産業基盤であるケースでは、生業の拠点の位置を変えることは難しい。したがって、制度の運用にあたっては、日常の利便性を損なわない範囲で安全な住まい方を検討することが必要である。

以上のような複数の目的を考慮した問題に 대응する方法の一つとして、多目的最適化モデルがある。先行研究には、自然の価値およびレクリエーション価値の最大化と土地利用の転用費用の最小化を同時に考えた問題<sup>7)</sup>や、都市のコンパクト性と生物多様性との間に生じるトレードオフ構造を多目的最適化問題を用いて検討したもの<sup>8)</sup>など、自然保護と人間の生活のバランスを取り扱ったものがある。また、防災に関わるものとしては、加知ら<sup>9)</sup>による交通利便性、居住快適性、災害安全性の3つの指標に価値観(重み)をかけた値の和から算出されるQOL指標を最大化するモデルや、長尾ら<sup>10)</sup>によるQOLと維持管理の両立を考えた場合の最適化問題が挙げられる。

一方で、上記の研究<sup>9, 10)</sup>は、東日本大震災の復興や、フィリピンの事例<sup>5)</sup>で指摘される職住分離による不便さの問題を明示的に扱うものではない。そこで、本研究では、災害リスクの低減と災害復興のためインフラ建設費用・移住費用、日常の施設運営費用に加えて、自宅から職場までの通勤時間を目的関数内に含めることで職住の近接性を考慮したOkubo et al.<sup>11)</sup>のモデルを基に検討する。Okubo et al.<sup>11)</sup>では、南三陸町を少数のゾーンに分けた空間に適用しているが、本研究では、より空間的に詳細な検討をおこなうため、500mメッシュ単位で計算可能なモデルに拡張し、津波リスクとインフラ維持費、交通時間を最適にするように土地の開発有無、人口、トリップ生成量を計画する最適居住地域配置モデルとする。モデルの適用として、高知県黒潮町を対象とする。まず、制御変数の組み合わせ、すなわち政策の自由度を変えた時の最適な居住地域配置を分析する。さらに、各目的の重要視度合いを変えた感度分析を行い、対象地域における津波リスクと平常時の利便

性の間に生じるトレードオフ構造を把握し、防災まちづくりに対応した住まい方を探る。また、都市を最適な状態へ再開発するためには多額の費用と時間がかかる。そこで、発展型として、都市の諸費用に引越し費用を加え、最適な都市への変化の過程を含めた段階的モデルに改良した。これにより「災害の発生時期によらず移転すべき地域はどこか」等の検討をおこなう。

## 2. 最適居住地域配置モデルの定式化 [基本モデル]

### 2.1 状況設定

本研究では $n$ 個の500mメッシュに分割された地域を考え、各メッシュに住宅と日常の活動を行う施設が配置されているものとする。活動は利用する施設 $a$ の種類に応じて決まり、 $a \in A = \{\text{自宅, 小学校, 農地, ...}\}$ で表す。なお、土地に根差した産業基盤を持つまちでは、産業の立地を変えることは難しいため、現在の施設の配置は所与とする。ここで、メッシュ $i$ の居住人口を $X_i$ とし、活動 $a$ を行う場所を $j$ とする( $i, j \in N = \{1, 2, \dots, n\}$ )。また、居住者は、夜間は住宅のあるメッシュ $i$ に、昼間は活動施設があるメッシュ $j$ に滞在し(図1)、交通時間は居住地と施設の移動のみ、つまり $ij$ 間の移動のみを考慮する。なお、地方の状況を反映し、全ての移動は車で行われることとする。

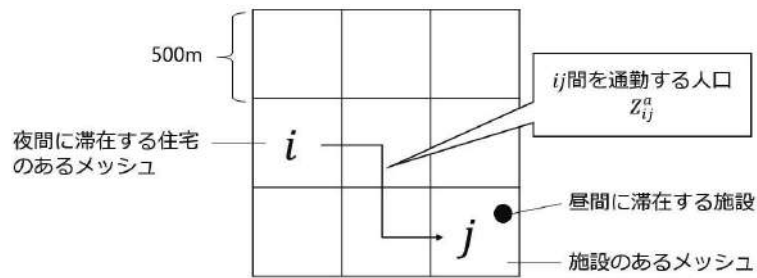


図 1. 本モデルで仮定する居住者の行動

### 2.2 目的関数の定式化

本モデルでは、各メッシュの土地の開発有無 $\mathbf{S} = \{S_i: \forall i \in N\}$  および人口 $\mathbf{X} = \{X_i: \forall i \in N\}$ 、メッシュ間の交通量、つまり活動目的別トリップ生成量 $\mathbf{Z} = \{Z_{ij}^a: \forall (i, j) \in N \times N, \forall a \in A\}$ を制御変数として、住民が居住地及び施設利用中に受ける総津波リスク $D(\mathbf{X}, \mathbf{Z})$ 、土地を利用するために必要な総インフラ維持費 $E(\mathbf{S})$ 、通勤に伴う総交通時間 $T(\mathbf{Z})$ の3つの部分目的で構成された目的関数を考える。

総津波リスク $D(\mathbf{X}, \mathbf{Z})$ は、居住者が夜間の自宅または昼間の活動先で被災すると考え、各メッシュに予想される被害および夜間と昼間の滞在人口に応じて次のように決定されるものとする。

$$D(\mathbf{X}, \mathbf{Z}) = \sum_{i \in N} d_i X_i + \sum_{j \in N} (d_j \sum_{a \in A} \sum_{i \in N} Z_{ij}^a) \quad (1)$$

平常時の費用として計上するインフラ維持費 $E(\mathbf{S})$ は、メッシュに住宅あるいは施設を配置し、開発・利用するためのインフラ(電気、水道、ガス、道路などのライフライン)に係る費用を考える。メッシュ $i$ の開発の有無を二値変数 $S_i = \{0, 1\}$ で表し、 $S_i = 1$ のときにメッシュ $i$ を開発する。

$$E(\mathbf{S}) = \sum_{i \in N} b_i S_i \quad (2)$$

総交通時間 $T(\mathbf{Z})$ は、メッシュ $ij$ 間の最短移動時間 $t_{ij}$ と活動目的別トリップ生成量 $Z_{ij}^a$ を乗じた値の総和をとった下式で定義する。ただし、最短移動時間は同じ $ij$ 間の移動であれば、活動によらず同

一の経路を利用すると仮定する。メッシュ  $j$  に配置された居住者が活動  $a$  を行うことができる施設 (学校, 医療機関, 職場など) の数を  $Y_j^a$  とする。また,  $Z_{ij}^a$  は活動目的別トリップ生成量, つまり活動  $a$  に伴って生じるメッシュ  $ij$  間の交通量を表す。

$$T(\mathbf{Z}) = \sum_{a \in A} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} Z_{ij}^a \quad (3)$$

スケールの異なる変数を含む目的を一つのモデルで検討するため, 本研究では低減ポテンシャルの達成度 ( $RPA$ : Reduction Potential Achievement) という値を独自に定義し, 一貫した比較ができるようにした。これは, 各部分目的が達成可能な最小値の下限を基準として, 全体最適においてどの程度費用を抑えられているかを表す指標である。ここで,  $D^*$ ,  $E^*$ ,  $T^*$  は, その部分目的が達成可能な最小値の下限であり, 各部分目的はなるべくこれに近づくように最適化される。各部分目的  $D(\mathbf{X}, \mathbf{Z})/D^*$ ,  $E(\mathbf{S})/E^*$ ,  $T(\mathbf{Z})/T^*$  の各  $RPA$  を  $RPA_d$ ,  $RPA_e$ ,  $RPA_t$  で表した多目的最適化問題を考える。

$$\min_{\mathbf{S}, \mathbf{X}, \mathbf{Z}} \beta_d RPA_d + \beta_e RPA_e + \beta_t RPA_t \quad (4a)$$

ただし,

$$RPA_d = \frac{D(\mathbf{X}, \mathbf{Z})}{D^*} \quad (4b)$$

$$RPA_e = \frac{E(\mathbf{S})}{E^*} \quad (4c)$$

$$RPA_t = \frac{T(\mathbf{Z})}{T^*} \quad (4d)$$

であり,  $RPA$  の値が小さいほど, 部分目的関数値が低減ポテンシャルに近づいていることを表す。各  $RPA$  の値は1以上の値をとり, 低減ポテンシャルの何倍まで部分目的の値を近づけることができているかを示す。また, 本研究では, 居住地域配置計画において重視すべき部分目的を柔軟に調節可能な枠組みとするため, 非負の重み  $\beta = \{\beta_d, \beta_e, \beta_t\}$  を考える。重みは,

$$\beta_d + \beta_e + \beta_t = 1 \quad (5)$$

を満たすように設定する。これにより, 重みを大きく設定した部分目的の値ほど目的関数に反映されやすくなるため, 当該部分目的の値を下げるように最適解が求められる。

### 2.3 制約条件の定式化

制約条件として, 以下式 (6) ~ (11) を考慮する。土地利用計画において各メッシュに配分する人口の総和は, 現在の黒潮町の総人口  $P$  とする (6)。また, メッシュ  $j$  に施設  $a$  が配置される ( $Y_j^a=1$ ) なら, 施設利用者数  $Z_{ij}^a$  は, 施設  $a$  を維持するための最小利用者数  $N^a$  よりも多く (7), キャパシティ  $M^a$  を超えない (8)。活動  $a$  のトリップ生成の頻度を  $f^a$  として人口  $X_i$  と乗じた値をメッシュ  $i$  からのトリップ生成量とし, 全てのトリップはいずれか一つの活動  $a$  を行うと仮定し施設利用者数  $Z_{ij}^a$  と一致する (9)。人口一人当たりの居住面積を  $f$ , 活動  $a$  に必要な施設の面積を  $g^a$  としたとき, その面積の総和は開発可能面積を超えない (10)。在宅, 農業の場合は, 他のメッシュに移動しない (11)。

$$\sum_i X_i = P \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} Z_{ij}^a \geq N^a Y_j^a \quad \forall a \in A, \forall j \in N \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} Z_{ij}^a \leq M^a Y_j^a \quad \forall a \in A, \forall j \in N \quad (8)$$

$$l^a X_i = \sum_{j \in N} Z_{ij}^a \quad \forall a \in A, \forall i \in N \quad (9)$$

$$f X_i + \sum_{a \in A} g^a Y_i^a \leq F_i S_i \quad \forall a \in A, \forall i \in N \quad (10)$$

$$Z_{ij}^{\text{自宅}} = Z_{ij}^{\text{農地}} = 0 \quad \text{if } i \neq j \quad \forall (i, j) \in N \times N \quad (11)$$

### 3. 引っ越し費用を考慮した段階的最適居住地域配置モデルの定式化[発展モデル]

#### 3.1 状況設定

本モデルでは、基本的な設定は2に従うが、移転の実施期間 $T$ において、事業を開始する基準年 $t_0$ から各経過年数 $t$ に段階的に人口が移転することを考える。計画期間は50年とし、10年ごとにメッシュ間の移転を検討する。また、津波は期間内のどこかで一回だけ必ず発生するものとし、津波発生後は、浸水域には人が住めなくなるものとする(図2)。移転前の居住地を $k$ 、移転候補地を $i$ で、通学、通院、仕事などの昼間の活動を $a$ で表し、その活動を行う場所を $j$ とする。また、 $t$ 年に $k$ から $i$ に移転する人口を $X_{ki}^t$ のように表し、その他の変数も同様に時間の次元 $t$ を含むものとする。

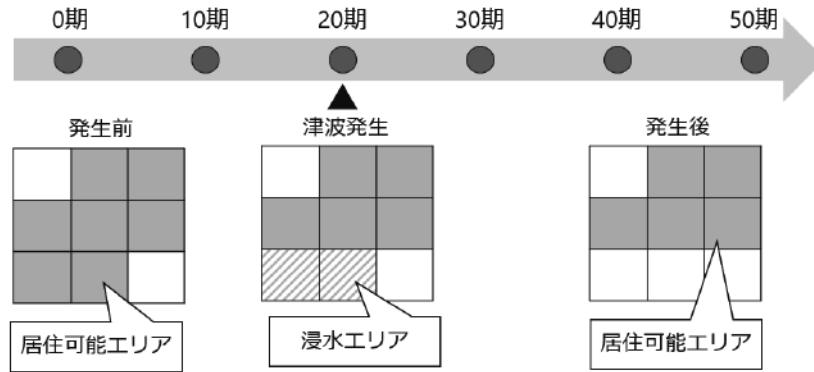


図2. 計画期間50年における津波発生に関する仮定

#### 3.1 目的関数の定式化

目的関数は住宅の移転費用 $C(X)$ を加えた下式とする。

$$RPA = \min_{S, X, Z} \frac{D(X, Z)}{D^*} + \frac{E(S)}{E^*} + \frac{T(Z)}{T^*} + \frac{C(X)}{C^*} \quad (12)$$

総津波リスク $D(X, Z)$ は、2の式(1)に対し、 $t$ 年における津波の発生有無 $h_t = \{0, 1\}$ を乗じた値の累積和とする。また、 $r$  ( $0 < r < 1$ )を現在価値換算するための割引率とする。

$$D(X, Z) = \sum_{t \in T} (1-r)^t h_t D_t \quad (13a)$$

$$D_t = \sum_{i \in N} d_i \sum_{k \in N} X_{kit} + \sum_{j \in N} d_j \sum_{a \in A} \sum_{i \in N} Z_{ijt}^a \quad (13b)$$

インフラ維持費 $E(\mathbf{S})$ 、総交通時間 $T(\mathbf{Z})$ は、2の式(2)(3)を現在価値換算した上で計画期間の累積和をとったものとする。

$$E(\mathbf{S}) = \sum_{t \in T} (1-r)^t \sum_{i \in N} b_i S_{it} \quad (14)$$

$$T(\mathbf{Z}) = \sum_{t \in T} (1-r)^t \sum_{a \in A} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \tau_{ij} Z_{ijt}^a \quad (15)$$

さらに、移転費用として、メッシュ $k$ の土地買収費 $c_k^l$ 、建物取り壊し費 $c^r$ 、建物補償費 $c^c$ を考慮する。移転費用 $C(\mathbf{X})$ は、移転に必要な費用にメッシュ $ki$ 間の移転人口 $X_{kit}$ を乗じたものとする。

$$C(\mathbf{X}) = \sum_{t \in T} (1-r)^t \sum_{k \in N} c_k \sum_{i \in N} X_{kit} \quad \text{where } k \neq i \quad (16a)$$

$$c_k = c_k^l + c^r + c^c \quad (16a)$$

### 3.2 制約条件の定式化

各時点で各メッシュに配分する人口の総和は、現在( $t=0$ )の町の人口の総和 $P_0$ とし、人口減少を考慮しない。その他は、(7)～(11)に時間の次元を加えたものであるが、ここでは割愛する。

$$\sum_{k \in N} \sum_{i \in N} X_{kit} = \sum_{k \in N} \sum_{i \in N} X_{ki0} = P_0 \quad \forall t \in T \quad (17)$$

## 4. データ

数値計算においてモデルの外生変数(パラメータ)として、対象地域である高知県黒潮町のデータ(次ページ表1)を用いる。なお、詳細については中居ら(印刷中)<sup>12)</sup>を参照されたい。

## 5. 結果

### 5.1 基本モデル：政策自由度の異なるシナリオ別分析結果

2で示した基本モデルの部分目的の重み $\beta$ を除いたものに対し、4のパラメータを適用し、政策自由度の差異を制御変数の差異として考慮した3つのシナリオについて最適解を求めた。シナリオA「現状2020」では、現状の居住地配置を変えない場合を考慮し、国土数値情報の2020年500 mメッシュ別の将来推計人口を $\mathbf{X}$ の値として外生的に与えた。また、シナリオB「開発地域外生化」では、昼間の活動先だけでなく、住民の居住地配置も変えることができる状況を考え、メッシュ間の交通量 $\mathbf{Z}$ に加えて、メッシュ人口 $\mathbf{X}$ も制御変数として考えた。さらに、シナリオCの「全内生化」では、これまでに居住地として利用されてきたメッシュの利用有無を改めて検討することを考えた。

結果を図3～5に各シナリオの人口分布と人口分布の重心を示す。現状の黒潮町の人口分布を所与として示しているシナリオA(図3)では、既に建物が建っている沿岸部の開発可能面積が広く、施設も沿岸部に多くあるため、沿岸部に人口が集中した。一方、居住地の移転を考えたシナリオB(図4)では、シナリオAに比べて、人口が津波リスクの低い山間部に移動し、居住地が分散した。開発有無も政策として考えたシナリオC(図5)では、シナリオBに比べて、山間部の広い範囲を居住

地として使用するような分散が抑制され、沿岸寄りのメッシュに人口が集中した。また、3つのシナリオの交通 $RP4$ にあまり違いは見られなかったものの、いずれの目的においても、制御変数を増やすにつれて、低減ポテンシャル達成度が大きく改善されることが分かった。

表1. 外生変数として用いるデータ一覧

外生変数	用いるデータ
人口 $X_i$	黒潮町の国土数値情報の2020年500mメッシュ別の将来推計人口データ。
昼間の活動（トリップ生成頻度） $l^a$	通院、通学、通勤など、一日の活動のうち主要なもののみ。平成27年国勢調査に基づく高知県の年齢別労働力状態 <sup>13)</sup> を基に労働状態を分類したうえで、黒潮町の年齢別就業者産業割合 <sup>14)</sup> を用いて就業者を年齢別・施設タイプ別に分類し、各メッシュからの活動別トリップ生成頻度を算出する。
活動施設 $a$	国土数値情報データに掲載された、小学校、中学校、高校、医療機関、漁港、郵送・輸送関連施設、市役所の7つを与えた。
活動に伴う移動時間 $t_{ij}$	「ESRI ジャパン データコンテンツ ArcGIS Geo Suite 道路網 2017」の四国道路網から道路ネットワーク上のノード、道路リンク、および各道路リンクの重みとして昼間非混雑時旅行時間を抽出し、全ノード間の最短経路を計算した。
津波リスク $d_i$	国土数値情報の津波浸水想定10mメッシュ <sup>15)</sup> をもとに、成田ら <sup>16)</sup> の津波被害関数を用いて平均建物被害率を計算した。
1人あたりの居住地単位面積 $f$	住宅・土地統計調査 <sup>17)</sup> の高知県の平均1住宅当たり敷地面積（一戸建及び長屋建）である204m <sup>2</sup> を黒潮町の平均世帯人数約2名で除した100m <sup>2</sup> とした。
インフラ維持費 $b_i$	各メッシュ一律の定数として1億円とおいた。
開発可能面積 $F_i$	土地利用細分メッシュ <sup>18)</sup> の土地利用種別が建物用地である面積の和とする。
施設のキャパシティ $M^a$	Okubo et.al. <sup>11)</sup> のデータを参考に設定した。
施設の最小利用者数 $N^a$	施設の位置・数の最適化をしないため、今回は0に設定した。

表2. 政策自由度の差異を制御変数の差異として考慮した3つのシナリオ

	シナリオ A	シナリオ B	シナリオ C
名称	現状 2020	開発地域外生化	全内生化
S:開発有無	外生化	外生化	制御変数
X:メッシュ人口	外生化	制御変数	制御変数
Z:交通量	制御変数	制御変数	制御変数

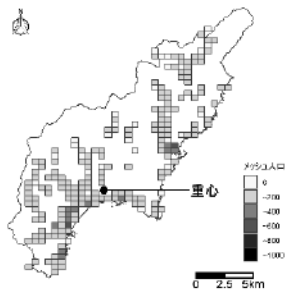


図3. A: 現状2020

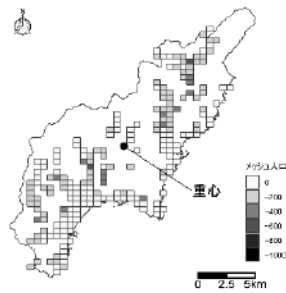


図4. B: 開発地域外生化

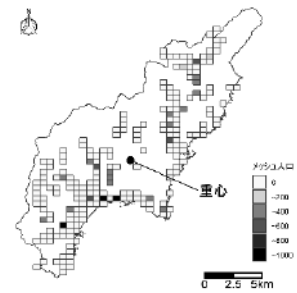


図5. C: 全内生化

## 5.2 基本モデル：まちづくりにおいて津波リスクの重要視度合いを変えた場合の感度分析

2で示した基本モデル部分目的の重み $\beta$ を各々変化させたときの全体の低減ポテンシャル達成度、人口分布の変化を分析する。本稿では津波リスクの重みの分析のみを紹介する。津波 $RPA_d$ の重み $\beta_d$ を増やすということは、まちづくりにおいて津波リスクを重視する度合いを高めることを意味する。

図6に、開発有無の有無 $S$ 、メッシュ人口 $X$ 、メッシュ間の交通量 $Z$ のすべてを制御変数とし、津波リスクの部分目的 $RPA$ の重みを単独で変化させたときの各部分目的 $RPA$ 値の変化を示す。これは、津波 $RPA_d$ の重み $\beta_d$ を0.1～0.9まで0.1刻みで変え、残りの重みは他の重み $\beta_e, \beta_t$ に均等に分配したとき

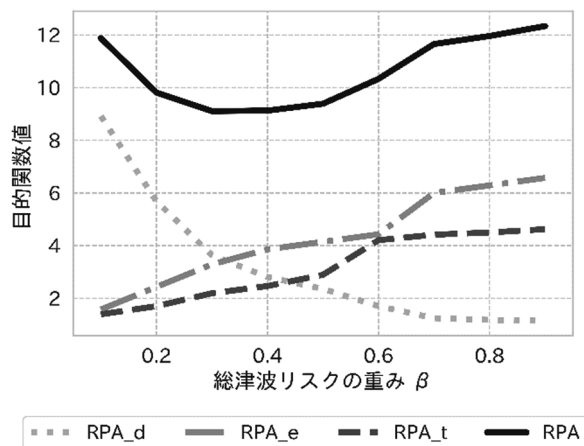


図6. 津波 $RPA_d$ の重みを変化させたときの各目的関数値の変化

の各 $RPA$ の変化である。結果、総 $RPA$ はV字構造になった。総 $RPA$ が最小となる点は津波 $RPA_d$ の重み $\beta_d=0.3$ 付近にあり、津波リスクを軽視すると津波 $RPA_d$ が増大し、重視しすぎると、交通時間、インフラ維持費などの平常時のコストに関する $RPA$ が増える。また、 $\beta_d \leq 0.3$ において、津波 $RPA_d$ は大きく減少するのに対して、交通 $RPA$ はあまり上昇していない。このことから、津波 $RPA_d$ の重みをある程度(今回は $\beta_d \leq 0.3$ )に留めておけば、津波リスクを減らすことによる交通時間の増加は顕著でないとと言える。

また、上記の感度分析に対応した人口分布の変化を、津波 $RPA_d$ の重みが小さい方から順に図7(a)～(e)に示す。津波 $RPA_d$ の重みが小さいうちは海沿いに人口が集中しているが、大きくなるにつれて山側に分散する。ここで人口が集中しているエリアは、開発可能面積が広いメッシュである。現状の黒潮町では、こうした地域が津波リスクの高い海岸近くに位置するため人口が集中しやすい。

また、この感度分析における人口分布の重心の推移をみると、津波 $RPA_d$ の重みが増えるにつれてその重心は沿岸部から市の中央付近の山間部に向かう。津波 $RPA_d$ の重みが0.3付近以降では既に山間部に人口が分散しきっているため、重心はほぼ市の中央に達しそこからあまり変化がない。



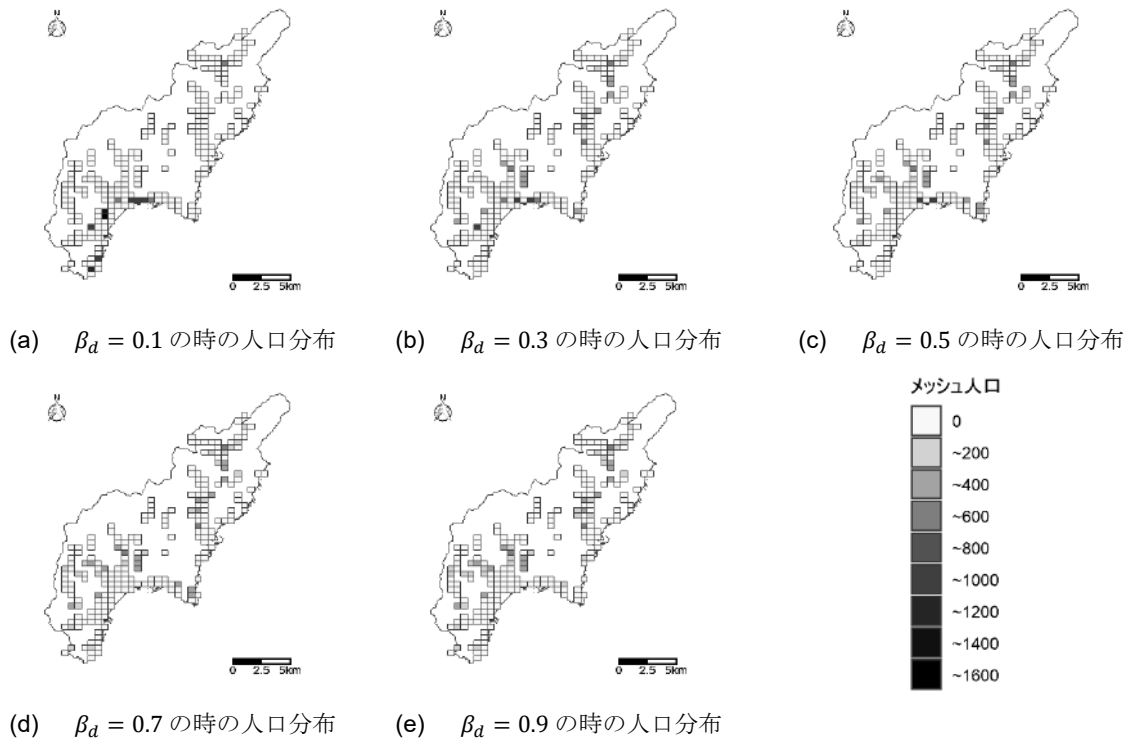


図7. 津波RPA<sub>d</sub>の重み $\beta_d$ を変化させたときの人口分布の変化

### 5.3 発展モデル：引っ越し費用を考慮した段階的最適居住地域配置

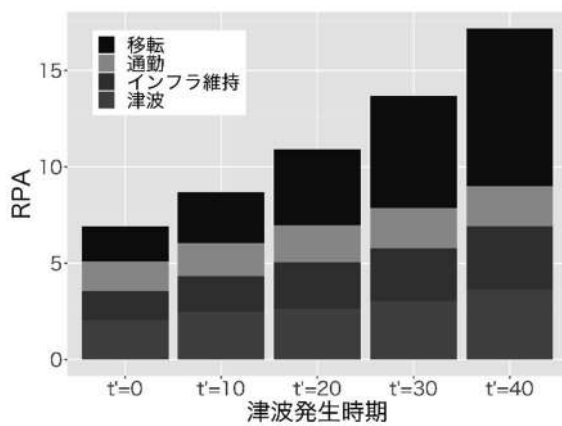


図8. 津波発生時期を外生変数とした感度分析による各RPAの変化

移転が行われたのは、始めの期と災害発生直後のみであった。これらの期に大規模に移転すると、最も費用が抑えられることが明らかになった。また、濃黒で示すエリア(高台)に大規模な流入があることもわかる。津波発生時期が第0期～第50期まで、全てのパターンについて感度分析を試みたが、これらの傾向はほぼ変わらず観察された。ただし、津波発生時期が遅くなればなるほど、津波発生直後の移転人口は増える結果となった。

3に示すモデルの計画期間を50年として、10年ごとの最適な居住地配置を検討した。津波発生時期を外生変数とした感度分析の結果(図8)、津波発生時期が遅くなるほど、各目的関数のRPAが大きくなった。この理由を式(12)の分母と分子の値の動きに着目して分析したところ、分子(全体最適において実現される値)が分母(各目的が達成可能な最小値)よりも、相対的に大きく減っているためであることがわかった。

また、図9に津波発生時期が第40期の場合の各期における最適な居住地移転数を示す。

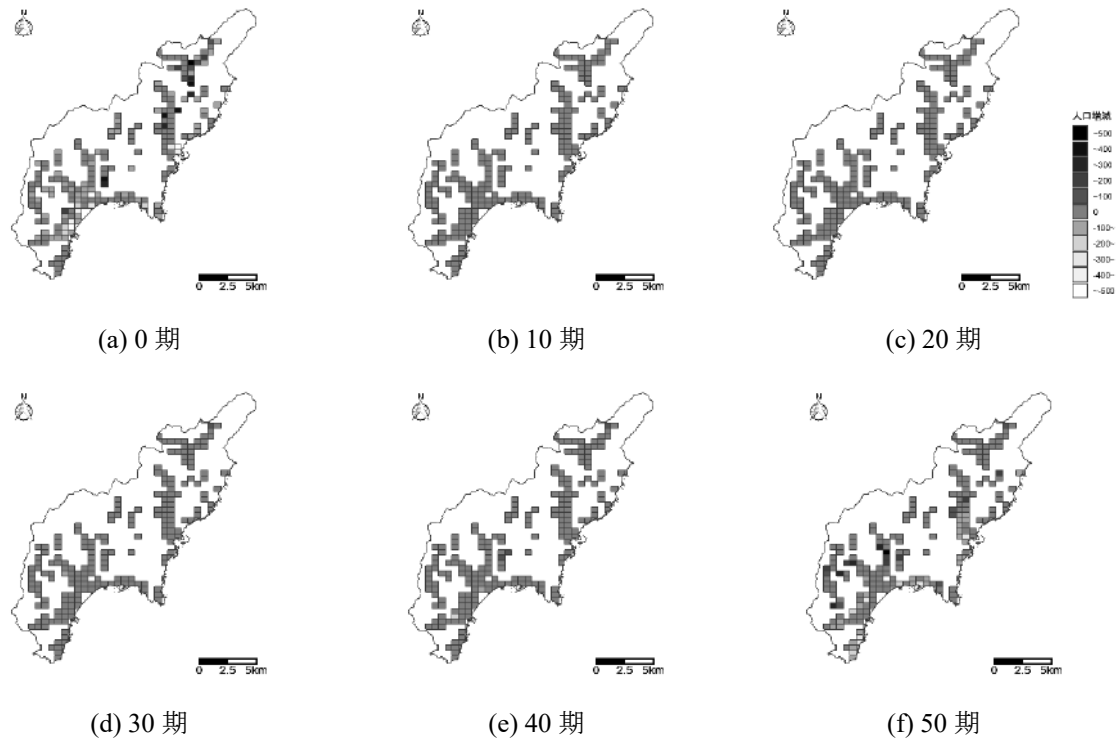


図 9. 津波発生時期が第40期の場合の各期における最適な居住地移転数

## 6. 考察とまとめ

5.1の結果からは、居住地域の変更を政策として考えることで、現状の居住地配置よりも大幅に津波リスクを減少させることができること、さらに、土地の開発有無において、現在、既に利用されている土地を使用しないという判断を政策として加えることができれば、都市の維持費をさらに改善できることがわかった。これは、現状黒潮町で開発されている地域にこだわらなければ、長期的にはまち全体の総費用を減少できるということを意味する。また、5.2の結果からは、津波リスクを重視する度合いをある程度(今回の場合、 $\beta_d=0.3$ 程度)にとどめておけば、まち全体の総交通時間をさほど上昇させずに津波リスクを下げるということがわかった。つまり、対象地域においては、ある程度津波リスクを考慮したまちづくりは、日常の利便性を大きく損なわずに実施できるといえる。さらに、5.3の結果からは、どの時期に津波が発生しようとも、計画初期と災害発生直後に大規模な移転をおこなうことで、諸費用を最小化できることがわかった。

将来の被災を考慮したまちづくりでは、まちを「どうすべきか」の議論が求められる。しかし、東日本大震災後の復興ケースでは、「悲劇」の経験から、安全性を求める市民感情が大きくなり、災害のリスクを重視したまちづくりに傾いた一方で、実際に復興したまちに対して「過剰な対策だったのではないか」といった声が聞かれることもあった。このような状況を防ぐためには、「何よりも安全性を重視したまちの姿」「ある程度津波のリスクを受け入れたまちの姿」の具体的なイメージを事前に検討しておく必要があると考えられる。本研究で提案した最適居住地域モデルは、それらを踏まえた事前の計画において「各目的をそれぞれの程度重視すると、まちの姿がどのようになるか」という対応関係を描くツールとしての意義があると考えられる。

## 謝辞

この研究は、名古屋工業大学大学院工学研究科の内生蔵達也氏と、東北大学大学院国際文化研究科の大窪和明准教授との共同によるものである。成果の一部は中居ら<sup>12)</sup>に掲載予定である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局参事官(社会資本整備)：津波防災地域づくり推進計画作成ガイドライン(平成30年4月)。 <https://www.mlit.go.jp/common/001230612.pdf>, 2021.6現在。
- 2) 国土交通省都市局都市計画課：改正都市再生特別措置法等について(平成27年6月1日版)。 <https://www.mlit.go.jp/common/001091253.pdf>, 2021.6現在。
- 3) 国土交通省都市局都市計画課：立地適正化計画作成の手引き(令和3年3月改訂)。 [https://www.mlit.go.jp/toshi/city\\_plan/content/001396716.pdf](https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/content/001396716.pdf), 2021.6現在。
- 4) 森田哲夫, 細川良美, 塚田伸也, 湯沢昭, 森本章倫：津波被害を考慮した地域構造に関する研究, 社会技術研究論文集, Vol. 11, pp. 1-11, 2014.
- 5) Iuchi Kanako, Mutter John：Governing community relocation after major disasters: An analysis of three different approaches and its outcomes in Asia, Progress in Disaster Science, Vol. 6, pp. 100071, 2020.
- 6) Environmental Science for Social Change：Rapid Assessment of the Performance of Post-Disaster Housing Reconstruction Approaches. 2014.
- 7) Stewart Theodor J., Janssen Ron, Van Herwijnen Marjan：A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning, Computers and Operations Research, Vol. 31, No. 14, pp. 2293-2313, 2004.
- 8) Schwarz Nina, Hoffmann Falk, Knapp Sonja, Strauch Michael：Synergies or Trade-Offs? Optimizing a Virtual Urban Region to Foster Plant Species Richness, Climate Regulation, and Compactness Under Varying Landscape Composition, Frontiers in Environmental Science, Vol. 8, No. February, pp. 1-14, 2020.
- 9) 加知範康, 加藤博和, 林良嗣, 森杉雅史：余命指標を用いた生活環境質(QOL)評価と市街地拡大抑制策検討への適用, 土木学会論文集D, Vol. 62, No. 4, pp. 558-573, 2006.
- 10) 長尾征洋, 青野隆仁, 戸川卓哉, 加藤博和, 佐野充：QOL指標と維持費用に基づく撤退・集結市街地の遺伝的アルゴリズムを用いた選定方法, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol. 68, No. 5, pp. I\_339-I\_348, 2012.
- 11) Okubo Kazuaki, Kim Jinyoung, Okumura Makoto：Sustainable land-use planning model for disaster-affected areas, Proceedings of the International Symposium on City Planning, pp. 10, 2013.
- 12) 中居楓子, 内生蔵達也, 大窪和明：津波リスクの低減と平常時の利便性を考慮した最適居住地域配置モデルによるトレードオフの分析, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol. 77, No. 5. 印刷中。
- 13) e-Stat：国勢調査 / 平成27年国勢調査 / 就業状態等基本集計(労働力状態, 就業者の産業・職業など) 都道府県結果 39高知県 表1-2.

- 14) e-Stat : 国勢調査 / 平成27年国勢調査 / 就業状態等基本集計(労働力状態, 就業者の産業・職業など) 都道府県結果 39高知県 表6-2.
- 15) 国土交通省 : 国土数値情報 津波浸水想定データ. [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A40-v2\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A40-v2_0.html), 2021.6現在.
- 16) 成田裕也, 越村俊一 : 東日本大震災の建物被害データを用いた津波被害関数に基づく建物被害特性の把握, 土木学会東北支部技術研究発表会, pp. II-73, 2014.
- 17) e-Stat : 住宅・土地統計調査 平成30年住宅・土地統計調査 住宅の構造等に関する集計 全国・都道府県・市区町村.
- 18) 国土交通省 : 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, 2021.6現在.