災害リスクと平常時のコストを考慮した最適土地利用モデルの提案と適用

名古屋工業大学　学生会員　○内生蔵　達也
名古屋工業大学　正会員　中居　楓子
東北大学　正会員　大窪　和明
名古屋工業大学　正会員　秀島　栄三

1. はじめに

土地利用計画において，災害リスクのみを考慮した場合，地域住民の日常生活の利便性が低下する可能性がある．加えて，人口減少下においては，新たに高台移転をし，居住地を拡大しても，インフラの維持費用を賄い続けられなくなる危険性がある．

Okubo et.al.[1]は災害リスクの低減と平常時の都市インフラの運用・維持費の増加との間に生じるトレードオフを考慮した土地利用モデルを開発し，事後的な復興計画に適用している．本研究では，施設や住宅のための土地の開発有無，人口，平常時のトリップ生成量の空間分布を制御変数として，総津波リスク，インフラ維持管理費，総交通時間の総和を最小化する最適化モデルを用い，津波災害が想定される高知県黒潮町をケーススタディとして事前の津波防災まちづくりで目指すべき方向性を検討する．

2. 最適土地利用モデルの定式化

(1) 目的関数の定式化

住民が居住地及び施設利用中に受ける総津波リスクD，土地利用に必要な総インフラ維持管理費E，施設利用のための利用者の総交通時間Tの 3 つの部分目的で構成された目的関数を最小化する問題を考える．目的関数は，各部分目的のみの最適化を考慮したときの値を，それぞれD^*, E^*, T^*とし，基準値として割ることで，各目的関数のスケールを揃える．

$$\min_{S,X,Z} \frac{D(X,Z)}{D^*} + \frac{E(S)}{E^*} + \frac{T(Z)}{T^*} \qquad (1)$$

(2) 変数・パラメータの定義

居住候補地をiで，昼間の活動（通学，通院，仕事など）をaで表し，その活動を行う場所をjとし，i, jは 500m メッシュとする．メッシュiの人口をX_i，土地の開発の有無を$S_i = \{0,1\}$とする．活動aをおこなう施設（学校，病院，職場など）のメッシュjにおける配置の有無を$Y_j^a = \{0,1\}$，メッシュiの居住者のうちメッシュjで活動aのために施設を利用している人数をZ_{ij}^aで表す．

総津波リスクDは，昼間と夜間を分けて計上する．メッシュiの夜間災害リスクは，一人当たりの災害リスクd_iを人口X_iに乗じたものとする．昼間はメッシュjの災害リスクd_jを，施設利用者数Z_{ij}^aのすべての活動について総和をとったものと乗じる．

$$D(X,Z) = \sum_i d_i X_i + \sum_j \sum_a (d_j \sum_i Z_{ij}^a) \qquad (2)$$

維持管理費Eは，メッシュiを利用するために必要な単位面積当たりのインフラ整備費用b_iと，土地の開発の有無S_iを乗じる．

$$E(S) = \sum_i (b_i S_i) \qquad (3)$$

総交通時間Tは，メッシュij間の最短移動時間t_{ij}とメッシュjの利用者数Z_{ij}^aを乗じたものをi, j, aについて総和をとったものとする．

$$T(Z) = \sum_a \sum_i \sum_j (t_{ij} Z_{ij}^a) \qquad (4)$$

(3) 制約条件

制約条件として，以下式(5)～(10)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(5)．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(6)，キャパシティM^aを超えない(7)．活動aのトリップ生成の頻度をl^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(8)．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，それらにかかる面積の総和は開発可能

面積を超えない(9)．在宅の場合は，他のメッシュに移動しないものとする(10)．

$$\sum_i X_i = P \tag{5}$$

$$\sum_i Z_{ij}^a \geq N^a Y_j^a \tag{6}$$

$$\sum_i Z_{ij}^a \leq M^a Y_j^a \tag{7}$$

$$l^a X_i = \sum_j Z_{ij}^a \tag{8}$$

$$fX_i + \sum_a g^a Y_i^a \leq F_i S_i \tag{9}$$

$$Z_{ij}^{自宅} = 0 \quad (i \neq j) \tag{10}$$

3. 分析の枠組み

分析の枠組みを表-1 に示す．パターン A :「全内生化」では，2 に示す最適化問題で扱われるすべての制御変数S, X, Zを入れて解いた．施設，人口が配置される領域i, j（開発対象メッシュ）は，黒潮町の既存の開発エリアとした．また，昼間活動として，小・中・高等学校での学習，農業・漁業への従事，「郵便局・物流拠点」・医療機関・教育機関での労働，公務，自宅・市外での活動からなる 11 種類の活動a を考える．パターン B :「開発地域外生化」では，開発有無Sを外生変数とすることで維持管理費Eを定数とみなし，総津波リスクDと，総交通時間Tのみで最適化した．パターン C :「現状(2020)」は，現在の黒潮町の人口分布とする．

4. 結果と考察

パターン A，B，C の結果を各々図に示す．現状の黒潮町では，沿岸部の開発可能面積が広く既存施設も多い．パターン A の最適解では，津波リスク，維持管理費，総交通時間がいずれも最小化されるようなメッシュに人口が集中（赤色）するが，今回の場合，3 つのメッシュに集中した形となった．これらのメッシュは，メッシュ全体の津波リスクは比較的低いものの，活動施設への交通便もよく、900 人が移住できるほどの広いエリアと言える．一方，パターン B の最適解では，津波リスク，交通費用のみで最小化を行っており，維持管理費が考慮されていないため，パターン A よりも人口が分散する傾向にある．パターン C の現状の人口分布と比較すると，A，B は現在防災拠点として整備されているエリアとは異なるエリアに人が集中する結果となった．

各パターンについて人口分布の重心を見ると，現状(パターン C：図-3)の重心が最も海岸に近く，パターン B(図-2)の重心が最も海岸から遠いという結果になった．その理由として，パターン B では，維持管理費用を考慮しないため，より津波リスクの低い高台を中心に人口が分布したためと考えられる．逆に，維持管理費用を考慮したパターン A(図-1)では，開発可能面積の広い沿岸部に向けたベクトルが大きくなり，重心がやや海側による形となった．

参考文献

1) Okubo, K., Kim, J., and Okumura, M. : Sustainable land-use planning model for disaster-affected areas, Proceedings of the International Symposium on City Planning, p.10, 2013.

表-1 分析の枠組み

		パターンA	パターンB	パターンC
名称		全内生化	開発地域外生化	現状(2020)
制御変数	S：開発有無	内生変数	外生的に決定	外生的に決定
	X：人口	内生変数	内生変数	外生的に決定
	Z：移動人口	内生変数	内生変数	内生変数

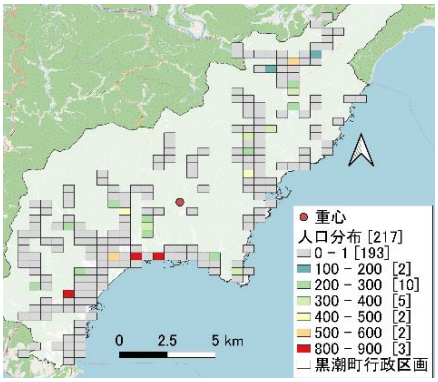

図-1 パターン A：全内生化

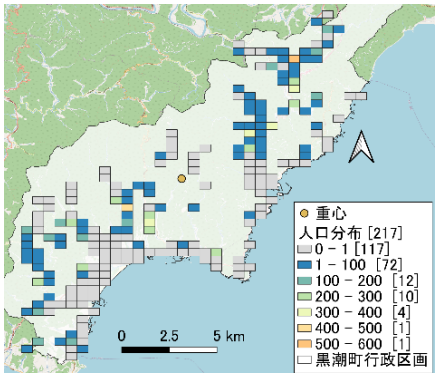

図-2 パターン B：開発地域外生化

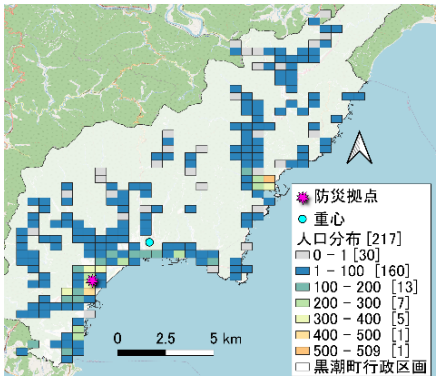

図-3 パターン C：現状（2020）