

セル・オートマトン法を用いた地方都市活性化モデルの評価

正会員○福永知哉¹⁾ 同 豊田星二郎²⁾同 松永安光³⁾
同 友清貴和⁴⁾ 同 本間俊雄⁵⁾

1 はじめに

2010年をピークに日本の人口は減少に向かう。それと同時に、地方都市の人口移動による衰退は大きな問題を抱え、今後の都市計画にとって大きな転換期に差し掛かっている。このような時期にこれまでの経験的な都市計画から脱却した方法の開発が要求されている。開発する上で重要となるのは人口と都市要素との関係である。この2つは自己・相互間で影響を与えながら変化しており、その研究は人口推計学・計量地理学・地域施設計画など多岐にわたる。

著者らは上述の背景より人口の多面的な変動を予測するモデルが必要であると考え、都市誘導モデルの基礎研究として、セルオートマトン (cellular automata、以下CA)とコーホート要因法を複合した、地方都市活性化モデルの提案を行ってきた^{1),2)}。提案モデルの有効性を確認するため、鹿児島市を取り上げ人口移動のシミュレートを実施した。結果としての実際の人口変動に近い値を再現することができた。しかし、2000年度の統計データと解析結果との比較で終わり、時系列での再現性は考慮されていなかった。また比較においても適合度を示す評価方法が曖昧であった。

本研究では適合度の評価方法を明確にし、時系列での評価を可能にするために近傍規則を改良することで提案した地方都市活性化モデルの再現性を再確認することを目的とする。

2 CAモデルの複層化

CAは複雑系の解析法ひとつでその定義の拡張性が特徴であり、セルの単位として何をモデル化し、どのようにルールを設定するかが重要である。またCAは相互作用を基本に組み立てるモデルであるため、他の要素を追加し、それらの相互作用を定義することで、モデルを拡張することが可能である。この拡張性に着目して、CAに層という新しい概念を取り入れる。(図1)

このことでモデル間の相互作用だけでなく、セル内・セル間の相互作用を多様に定義することが可能になり、他の要素を導入する際の利便性と再現性を向上させることができる。

本研究では複層CAにコーホート要因法を複合したモデルを用い地方都市の代表として鹿児島市の人口移動の予測を行う。1ステップを5年として1975年から2000年までの5ステップ25年間の人口変動シミュレートを行う。解析結果の有効性を確認するために、数値的な指標を用いて再現性が時系列で確認できる評価方法を設定し、解析結果と実際の人口と比較する。全ての試行結果の再現性を評価し、数値的判断より適合度のよいパラメータパターンを抽出する。このパターン適用することで近未来の人口を予測し、都市活性化に応用することができる。

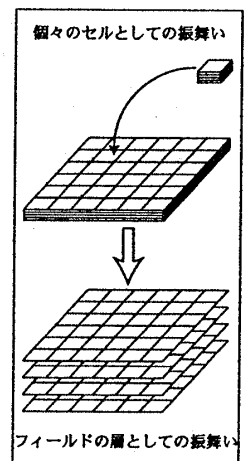
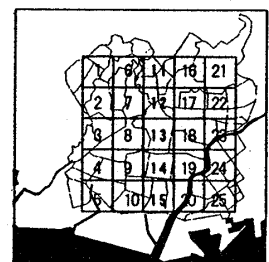


図1: 複層化CAのモデル

3 解析モデル

3-1 フィールド 図2の鹿児島市の中心に位置する53の町、人口約11万の地域を格子状の25(5×5)のセルにモデル化する。セルの大きさは630×630mである。これは鹿児島市中心街の平均的な町が1~3つ入る大きさであり、どの町においても複数のセルに分割されることはない。なお、ここでは計算を単純化するためにモデルにおける内外



NO	町名	人口
1	1	0.00
2	2	0.00
3	3	0.00
4	4	0.00
5	5	0.00
6	6	0.00
7	7	0.00
8	8	0.00
9	9	0.00
10	10	0.00
11	11	0.00
12	12	0.00
13	13	0.00
14	14	0.00
15	15	0.00
16	16	0.00
17	17	0.00
18	18	0.00
19	19	0.00
20	20	0.00
21	21	0.00
22	22	0.00
23	23	0.00
24	24	0.00
25	25	0.00

図2: モデル対象地区

An optimized cellular automata model for activation of local city development

FUKUNAGA Tomoya, TOYODA Seijiro, MATSUNAGA Yasumitsu, TOMOKIYO Takakazu, HONMA Toshio

人口移動は均衡しているものとする。

3-2 セル セルは人口ピラミッドと同じ5歳間隔年齢別・男女人口別 20 × 2 の層状の人口を持つセル間とセル内で状態遷移規則を設ける。

3-3 状態遷移規則^{1), 2)} 人口は、出生と転入によって増加し、死亡と転出によって減少する。従って、人口増加は次のように表現できる。

$$\begin{aligned} \text{人口増加} &= (\text{出生} - \text{死亡}) + (\text{転入} - \text{転出}) \\ &= \text{自然増加} + \text{社会増加} \end{aligned} \quad (1)$$

これを人口学方程式という。状態遷移ルールではこの自然増加と社会増加を切り離して考え、前者を自律規則、後者をフィールド内の近傍規則として取り扱う。

自律規則

各セル内での死亡と出生による人口変化及び成長による層の移動を規定するルールを与える。ここではコーホト要因法に準じるモデルとするが、純移動計算は扱わない。

近傍規則

計量地理学の視点の基、人口密度を指標とする5つの状態遷移ルールを定義する。それぞれのルールは発現強度を左右するパラメータを持っている。

1 近接移動

移動者が不完全な情報・限定された条件の下に安価な土地(人口が集中していない地区)を求めて近距離移動することを想定している。 γ は目的地選択に対する移動者の地価の安さへの意識の程度を表現している。

$$P_{i(\alpha)}^{t+1} = P_{i(\alpha)}^t + \sum_{j \in \phi} \left\{ \left(\frac{P_{j(\alpha)}^t}{P_{i(\alpha)}^t} \right)^\gamma - \left(\frac{P_{i(\alpha)}^t}{P_{j(\alpha)}^t} \right)^\gamma \right\} \cdot P_{j(\alpha)}^t \quad (j \in \phi) \quad (2)$$

γ : 人口比パラメータ ϕ : N個の隣接セル

2 長距離移動

移動者が広い視野で、なるべく移動距離を少なくしつつ、人口密度の高い地域に移動することを想定している。 δ は移動者の労働条件への意識、 β は移動距離への忌避の程度を表す。

$$P_{i(\alpha)}^{t+1} = P_{i(\alpha)}^t + \sum_{j \in \omega} \left(\frac{P_{j(\alpha)}^t}{P_{i(\alpha)}^t} \right)^\delta d_{ij}^\beta \quad (j \in \phi, \beta \leq 0) \quad (3)$$

$$P_{i(\alpha)}^{t+1} = P_{i(\alpha)}^t - \sum_{j \in \omega} \left(\frac{P_{j(\alpha)}^t}{P_{i(\alpha)}^t} \right)^\delta d_{ij}^\beta \quad (j \in \phi, \beta \leq 0) \quad (4)$$

δ : 人口比パラメータ β : N個の隣接セル
 d_{ij} : ijセル間距離 ω : 人口が流入するセルの集合

3 家族移動

世帯主の移動に対してその家族が引っ越し・転勤などで随伴する形で移動することを想定している。

$$P_{i(\alpha)}^{t+1} = P_{i(\alpha)}^t + \alpha_{\mu} M_{i(\alpha)}^t \quad (k \neq m) \quad (5)$$

α_{μ} : 移動パラメータ $M_{i(\alpha)}^t$: 男性の移動数

4 結婚移動

結婚により男性に伴い配偶者が随伴して移動することを想定している。本質的に家族移動と同じルールである。

5 行政事業

本稿の最終目的である、都市の誘導モデルを視野に入れた問題である。人口に左右されない、魅力という関数を用いている。

$$P_{i(\alpha)}^{t+1} = P_{i(\alpha)}^t + \rho H \sum_{j \in \mu} P_{j(\alpha)}^t \quad (6)$$

$$P_{i(\alpha)}^{t+1} = (1 - \rho H) P_{i(\alpha)}^t \quad (j \in \phi) \quad (7)$$

$$H = 1 - \left(\frac{Y}{\bar{Y}} \right)^2 \quad (8)$$

ρ : 集中パラメータ H : 魅力係数 μ : 人口流入するセルの集合、 Y : 魅力期間 Y : 時間経過

4 評価方法

解析結果は地図上に人口分布が与えられ、各地域の人口分布は男女別に5歳間隔の層状にあり、それが時系列で提示される。試行結果の再現性を示すための評価方法として解析結果による人口と実データを用い、試行結果に評価値という独自の指標を与えて、ステップごとに比較を行った。最も再現性の高いパラメータの組合せ(以後パラメータパターンとする)を抽出し、評価の基準にする。

1 セルの評価

解析結果 25セルの人口分布を1ステップごとに各セルの評価を行う。その評価方法は次式で与えられる。

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{40} \left\{ \sum_{n=1}^{20} (P_m - P_m')^2 + \sum_{n=1}^{20} (P_f - P_f')^2 \right\}} / T_n \quad (9)$$

P_m : 男-統計データ P_f : 女-統計データ
 P_m' : 男-解析結果 P_f' : 女-解析結果
 T_n : 層の平均人口 (25セルの総人口/25/40)

2 ペナルティ

セルの評価において評価値が小さいほど再現性の高いパラメータパターンである。ある層において解析結果と統計データとが極端にずれていると判断できる場合がある。このときにはセルの評価値にペナルティを与える層の評価を行う必要がある。このペナルティ付加はセルの男女40層における解析結果、統計データの差とそのセルにおける層の平均人口との比がある値を超えた場合に実行する。ペナルティ付加判断

$$\lambda_k = \sqrt{(S - S')^2} / (C_n / 40) \quad (10)$$

S : 層の実データ S' : 解析結果の層人口
 C_n : iセル内の実際値

は次式で与える。

3 パラメータパターンの評価

ペナルティ付加を行った 25 セルの評価値の和をそのパラメータパターンの評価値とする。各ステップにおいてこの評価値は得られ、時系列で見てその総和が最も小さい値を維持しているものが評価の良いパターンである。

$$\delta = \sum_{n=25}^{25} \sigma_k \quad \sigma_k: \text{セルの評価値} \quad (11)$$

5 解析結果

5-1 単独試行

近傍規則の組合せとそのパラメータを変え、人口変動の計算を試行する前に新しい自律規則と1つの近傍規則を用いた単独試行を実施する。この試行でパラメータの存在可能な範囲を絞り込み、その傾向を把握する。家族移動と結婚移動に関しては男性の移動に対して他の年齢層が随伴移動し、単独では人口移動が行われないため、近接移動、家族移動、行政事業と連動させて試行する。単独試行により得られたパラメータの範囲を表1に示す。これを基に近傍規則を複数組み合わせさせた複合試行を行う。

表1：パラメータの範囲

近接移動	開始年齢	終結年齢	人口比パラメータ
	男：10	男：70	γ 0.5-0.7
	女：10	女：70	γ 0.5-0.7
遠距離移	開始年齢	終結年齢	セル
	男：10	男：65	1
	女：10	女：65	1
家族移動	年齢	年齢	移動パラメータ
	夫：30	子：10	α 0.1-0.3
		親：55	α 0.1-0.3
		妻：30	α 0.1-0.3
結婚移動	年齢	年齢	移動パラメータ
	男：30	女：25	α 0.1-0.3
行政事業	セル	期間	集中パラメータ
	6	1985 2000	ρ 0.5-1.5

5-2 複合試行

ペナルティの付加は $\lambda > 2$ とし、これを満たす層数 $\times 0.01$ のペナルティを加える。表1のパラメータ範囲より348パターンの複合試行を実施した。それぞれのルールが持つ特徴が引き続き観測されたことからルールの独立性を確認した。例として5ステップ後の解析結果を5つ取り上げ、2000年での評価値と、時系

列での評価値の平均、そのパラメータパターンの内容を表2に示す。ルールの挙動性と評価値による再現性を確認するためにCase01, 04, 05の人口ピラミッドと評価値の時系列変化を表6に示す。人口ピラミッドの黒枠は2000年の統計データを表し、変動グラフの破線は評価値の基準として複合試行全348パターンのステップごとの平均値を表している。今回提案した評価方法の結果、最も再現性の高かったCase02を得ることができた。このパラメータを用いて近未来の人口変動を予測した人口ピラミッドを図4に示す。表7は同じくCase02を用いて20ステップ間のセル1における人口構成の変動結果を示している。

6 考察

複合試行の結果、得られた人口ピラミッドは視覚的にはほとんど同じに見えるため、評価値による判断で再現を確認する。まず、Case01, 05の比較から、Case01のルールは全て集中化を促すルールであり、行政事業が適用される6セル以外の人口の存在しなかったセルに人口が流入しない。このため実際に無人セルへ人口が流入しはじめる1990年以降から評価値は平均値と比べて高くなっている。これより近接移動の必要性が確認できる。Case04, 05を比較より、わずかであるがCase05の評価値が全体的に低い値を示している。これより人口以外の指標を用いて提案した行政事業ルールの挙動性を確認することができた。Case02は2000年の評価値が最も低く、その平均値も最も低かった。このことから長距離移動は今回の狭い範囲での規則設定は判断できない。評価値の時系列変化を見ると、どのパターンにも1990年が高くなっているのが共通して言える。この要因としては、無人セルに1980年代から徐々に人口が増え始め、5年ごとに評価しているため時差があったものと考えられる。またセル4の人口ピラミッドで極度のずれが確認できるが、このセルには20代の学生が多く存在し、常にこの層の移動が行われているためであると考えられる。

7 おわりに

今回提案したモデルは、近接移動の1975年から1990年までの無人セルへの人口流入を制限し、行政事業の適用開始期間を自由に設定できるように改良し

表2: 評価値とパラメータパターンの内容

2000年 評価値	時系列 平均値	近接移動	長距離移動	家族移動	行政事業
Case01: 19.23	170.7	■	■	■	■
Case02: 16.35	16.02	■	□	■	■
Case03: 16.48	16.07	■	■	□	■
Case04: 16.64	16.24	■	■	■	□
Case05: 16.47	16.08	■	■	■	■

近接移動	男:10-70 女:10-70 $\gamma:0.5$
長距離移動	男:15-60 女:15-60 セル:1-1 $\delta:1.0 \beta:0.5$
家族移動	夫:30 妻:30 親:55 子:10 $\alpha:0.2$
行政事業	セル:6 期間:1985-2000 $\rho:0.5$

■ルール:on □ルール:off

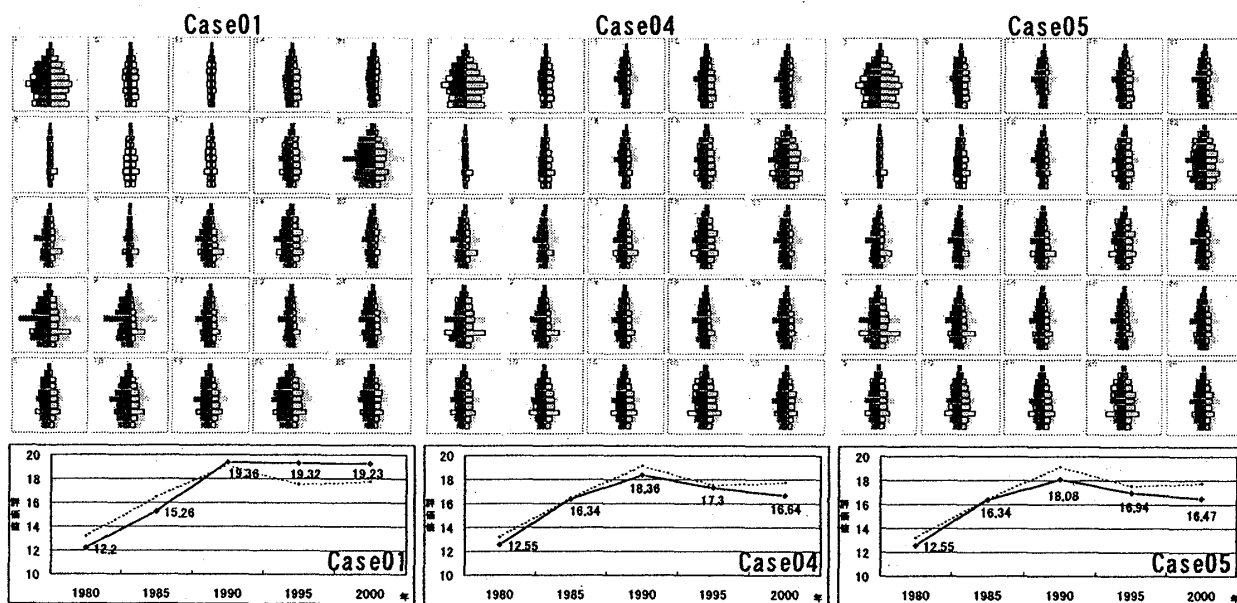


図3: 人口ピラミッドと評価値の変化

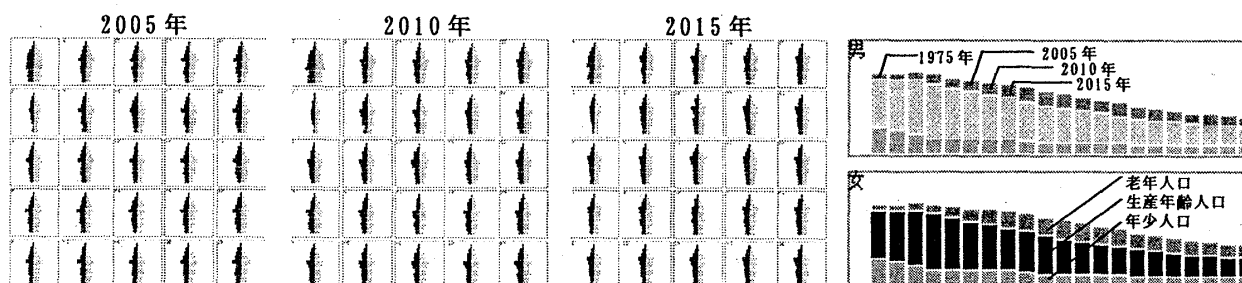


図4: Case02を用いた近未来の人口変動

図5: セル1の人口変化

た。これより鹿児島市の住宅事情・転勤・進学・就職や結婚に伴う人口移動を再現できた。なお、地理的条件の異なる他の地方都市においてもこのモデルのを適用し、人口変動を再現することで都市の傾向を確認しなければならない。最終的には25セルの外部からの人口流入や流出を考え、過疎化の阻止や商業地の活性化などといった具体的な事象を再現可能なモデルの構築を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 豊田星二郎, 松永安光, 友清貴和, 本間俊雄: セルオートマトン法を応用した都市の誘導モデルに関する基礎研究. 日本建築学会九州支部研究報告第40号2, 313-316, 2001
- 2) 松永安光, 友清貴和, 本間俊雄, 福永知哉, 豊田星二郎: セルオートマトン法を用いた地方都市活性化(その1, 2), 日本建築学会大会, 2001
- 3) 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋: セルオートマトン法 森北出版1998
- 4) 石川晃: 市町村人口推計マニュアル 古今書院 1993
- 5) 石川義孝: 人口移動の計量地理学 古今書院 1994
- 6) 加藤達也: 生活の中の人口学 古今書院 1994
- 7) 龍澤重志, 河村廣, 谷明勲: 適応的マルチエージェントシステムによる都市の土地利用パターンの形成. 日本建築学会計画論文集 第528号, 267-275, 2000

1) 鹿児島大学理工学研究科・大学院生
 2) フリー・修士(工)
 3) 鹿児島大学工学部建築学科・教授
 4) 鹿児島大学工学部建築学科・教授・工博
 5) 鹿児島大学工学部建築学科・助教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture Architectural Eng., Kagoshima Univ. Free
 Prof., Dept. of Architecture Architectural Eng., Kagoshima Univ., M. Arch
 Prof., Dept. of Architecture Architectural Eng., Kagoshima Univ., Dr. Eng.
 Assoc. Prof., Dept. of Architecture Architectural Eng., Kagoshima Univ., Dr. Eng.