

## セルオートマトン法を用いた都市の誘導モデルに関する基礎研究

— セルオートマトンの複層化の提案とその有効性 —

正会員○ 豊田星二郎<sup>1)</sup> 友清 貴和<sup>2)</sup>  
松永 安光<sup>3)</sup> 本間 俊雄<sup>4)</sup>

## 1. はじめに

地球資源の枯渇問題に対応するため、節度と計画性を持った、持続可能な都市開発が必要とされている。その解決として、人口から正確な需要を割出し、それを参考に計画を行う手法は有効である。そのためには将来の人口分布・人口構造の時系列変化を市区町村単位で把握する必要がある。特に人口移動は、人口に影響を与える他の出生・死亡などの要因に比べ地域差が大きく、性・年齢構造、人口規模の変化に強い影響を与えており重要である。地理学・人口統計学ではこれらを、量的な統計データとして扱い人口変動の推計材料としている。しかしながら、出生や死亡に比べ人口移動は、統計が調査技術上困難であること、形態が多様で反復性があることに起因して、その性質は非常に複雑であり、全体を把握することは難しい。そこで本稿では、人口移動を複雑系<sup>注1)</sup>と位置付け、マクロな視点からの理論モデルに代わり、ミクロな視点からの生態学的モデルであるセルオートマトン (cellular automata:細胞状の自動機械、以下CA<sup>注2)</sup>)を用いて説明する。以上のような見地から、都市全体を把握するための人口移動を想定した複層化CAモデルの提案と、状態遷移ルール、それに含まれるパラメータの検討を行うことを目的とする。

## 2. セルオートマトン法とその複層化

ここで用いるCAは、系を構成する要素間の相互作用から、系全体の挙動を創発することが可能な解析法の一つで、機械の自己複製モデルを出発点に持つ。基本要素であるセル (細胞) が、格子状のフィールドで周囲の環境に適合するために、個々で状況を判断しながら状態遷移を繰り返し、結果として系全体を自己組織化している。CA法を用いると微分方程式を解くのと同等な結果が得られるだけでなく、その系の支配方程式が必ずしも必要ではないため、従来の微分方程式では難しい生き物や流体の規則的で複雑なパターンも再現できる事が分かっている。現在、物理・化学・生物・流体から交通・経済のシステムの解明などに適応されている。

CAは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、そしてルールをどのように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モデルに層という新しい

概念を取り入れる。このことでモデル間の相互作用だけでなく、モデル内・モデル間の層の相互作用を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。

## 3. 既往研究

CAの動学的モデルに着目して、土地利用変化や都市形態をシミュレートする研究が行われており、現在は地理情報システム (GIS) とのリンクが進められている。瀧澤らは土地利用パターンの形成を住居・業務・商業状態量によって決定するモデルを開発し、セル内・近傍内・都市全体という3つ相互作用範囲を用いている<sup>注9)</sup>。五十嵐は、人口・従業者という都市の活動量をセルの状態として定義した研究を行っている<sup>注10)</sup>。しかしながら、現状の再現に終始した研究が殆どである。それに対して本研究は、都市を改善することを視野に入れ人口分布の変動に焦点を当てている。また拡張性を高めるためにセルを複層化し、その層間相互作用を定義した論文はない。以上の点から本稿は一連の研究と異なる。

## 4. 研究の方法

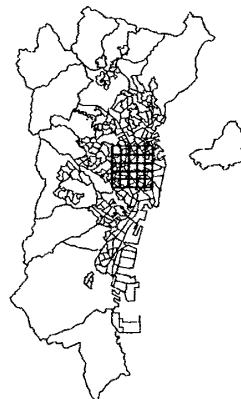


表1 25エリア一覧

| NO | 町名     |        |       | セル    |      |
|----|--------|--------|-------|-------|------|
| 1  | 東橋5丁目  | 東橋6丁目  | 東橋7丁目 | 0.70  |      |
| 2  | 東橋2丁目  |        |       | 0.60  |      |
| 3  | 東橋4丁目  | 東橋1丁目  |       | 0.52  |      |
| 4  | 東橋1丁目  | 東橋2丁目  | 東橋3丁目 | 0.58  |      |
| 5  | 東橋2丁目  | 東橋3丁目  |       | 0.54  |      |
| 6  | 田上1丁目  | 田上2丁目  |       | 0.44  |      |
| 7  | 東橋1丁目  | 東橋2丁目  |       | 0.67  |      |
| 8  | 東橋1丁目  |        |       | 0.68  |      |
| 9  | 東橋2丁目  |        |       | 0.55  |      |
| 10 | 下京田3丁目 | 下京田4丁目 |       | 0.51  |      |
| 11 | 田上3丁目  | 田上4丁目  |       | 0.54  |      |
| 12 | 田上1丁目  | 田上2丁目  |       | 0.23  |      |
| 13 | 上京田町   |        |       | 0.58  |      |
| 14 | 東橋1丁目  |        |       | 0.79  |      |
| 15 | 下京田1丁目 | 下京田2丁目 |       | 0.57  |      |
| 16 | 田上6丁目  | 東橋3丁目  |       | 0.82  |      |
| 17 | 東1丁目   | 東2丁目   |       | 0.42  |      |
| 18 | 中央町    | 上之原町   |       | 0.71  |      |
| 19 | 東橋町    |        |       | 0.52  |      |
| 20 | 東橋町    | 東橋町    |       | 0.46  |      |
| 21 | 東橋町    |        |       | 1.10  |      |
| 22 | 西田2丁目  | 西田3丁目  | 東橋1丁目 | 東橋2丁目 | 0.71 |
| 23 | 西田1丁目  | 東橋1丁目  | 東橋2丁目 | 西千石町  | 0.38 |
| 24 | 加治屋町   | 松之口町   | 山之内町  |       | 0.52 |
| 25 | 東橋町    | 松原町    | 千石町   | 東橋町   | 0.43 |

図1 鹿児島市における25エリアの位置

複層化CAモデルを用いて人口推計をするにあたり、鹿児島市の中心に位置する53の町を、格子状の25のセルにモデル化する。人口移動はこの25セル内でのみ行われるものとし、25のセル間の相互作用による人口分布・人口構造の変化を推計する。セルには、初期値として1975年の町別・5才間隔年齢別・性別の人口、出生率、死亡率、セルの面積、セル間の距離を与える。また、セル間・層間の相互作用を規定する状態遷移ルール<sup>注2,3,5)</sup>・パラメータを規定する。1975年から2000年までに相当する5サイクル (1サイクル=5年) をシミュレートし、自然・社会増減による25ブロックの人口分布・人口

1) 鹿児島大学大学院 2) 鹿児島大学教授・工博 3) 鹿児島大学教授 4) 鹿児島大学助教授・工博

構造の変動を観測する。その結果からルール及びそれに含まれるパラメータの種類・値・組合せの挙動特性を探る。シミュレート結果と過去の統計データと照らし合わせ、再現性が高いパラメータを抽出する。

5. 状態遷移ルール

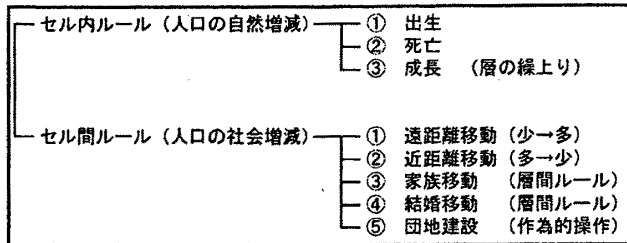


図2 遷移ルール一覧

今回提案する状態遷移ルールには、人口の自然増減にあたるセル内の層間に作用するルールと、社会増減にあたるセル間の層間に作用するルールがある<sup>図2</sup>。自然増減に関しては、既に人口推計学により確立されたコーホート要因法<sup>文1</sup>)を用い、本稿では社会増減、つまりセル間ルールに問題を絞る。

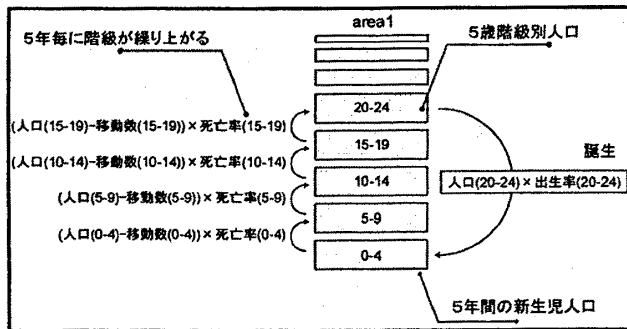


図3 セル内ルール

セルは5歳間隔の年齢別人口の状態量を持ち、それが層状に重なり人口ピラミッドを形成している。コーホート要因法のルールに従って、5年毎に一代更新し、各層は1つ上の層に繰り上がり次世代の各層の人口になる<sup>図3</sup>。

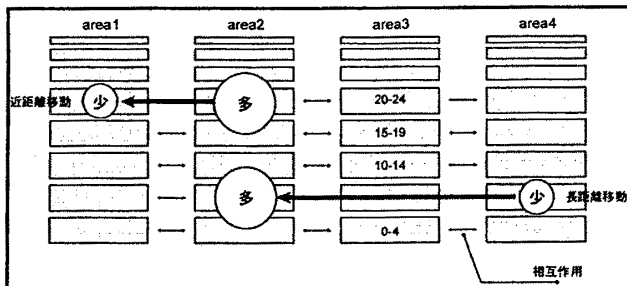
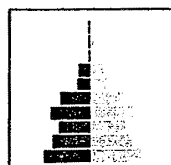


図5 セル間ルール

セルは自身の各層と、近接もしくは遠方のセルの各層を比べ、状態遷移ルールに従って、お互いの各層の人口を増減させる<sup>図5</sup>。

社会増減の当事者である移動者は、目的地選択行動

を複雑な条件と不完全な情報の元に行っている。その全てを把握し定式化することは非常に困難である。これらの条件に関わる主な物理的要因として、商業・会社・学校・住宅などが挙げられるが、これらを建設した事業者は、需要つまり人口密度を指標に建設地を選択していると考えられる。つまり移動者が指標にしている多数の条件の根底には、全て人口密度という指標が存在しており、移動者は事業者が行った「人口密度を指標に目的地を選択する」という過程を踏襲していると見なす事が出来る<sup>文2</sup>。

このような計量地理学の視点のもと、人口密度を指標とする状態遷移ルールを考察する。まず本稿独自の状態遷移ルールを6個用意し、ルールの発現強度を左右するパラメータを合計28個導入した。6個のルールの単独試行をパラメータを変え、755パターン用意し試行する。封鎖人口（パラメータパターン000）：鹿児島市の死亡・出生率を元に、セル1～25からの転入出がなく死亡と出生のみで人口が変化すると仮定したルール。

近接移動（パラメータパターン001 - 090、752 - 755）：

$$P_{i-n} = P_{i-n} - (P_{i-n})^\gamma + AP$$

各セルの各階級の人口

n : グループ内のセルの数 = 9

$$A = \left( \sum_{m=1}^n (P_m)^\gamma \right) / n$$

γ : 人口比パラメータ

A : 修正項

近接するセルにおいて、お互いの人口比のべき乗に比例して、密から疎へ人口が移動する。これを任意の範囲の年齢層に適用する。このルールは、移動者が不完全情報・限定条件の元に、安価な土地を求めて近距離移動をすることを想定している。

遠距離移動（パラメータパターン091 - 666）：

$$P_{i-a} = P_{i-a} + \sum_{m=a+1}^n (P_m / P_{i-a})^\gamma (d_{i-a,m})^\beta$$

$$P_{(a+1)-n} = P_{(a+1)-n} - \sum_{m=1}^a (P_{(a+1)-n} / P_m)^\gamma (d_{a+1-n,m})^\beta$$

P : 各セルの各階級の人口、n : セルの総数、a : 人口が流入するセルの数、γ : 人口比パラメータ、β : 距離パラメータ

全てのセルを人口が多い順に並び替えて1～nとし、1～aまでのセルにa+1～nからお互いの人口比、距離のべき乗に比例した人口が移動する。近接移動と同様に、任意の範囲のコーホートに適用する。このルールは、移動者が比較的広い視野で職を求めて人口密度の高い地域に移動することを想定している。

家族移動（パラメータパターン667 - 696）：

$$P_f = P_f + i_f M_i$$

$$P_c = P_c + i_c M_i$$

$$P_p = P_p + i_p M_i$$

P : 人口

i : 移動率

Mi : 5年間での男性の移動数

f : 妻、c : 子、p : 親

対象年齢層の男性の5年間に於ける移動数に比例して、その妻・子供・親にあたる年齢層が増減する。妻・子供・親にはそれぞれ移動率が設定でき、男性の全移動数に対する引越・転勤、単身赴任の割合を考慮することで、家族単位での移動を想定することができる。

結婚移動 (パラメータパターン 697 - 751) :

$$P_f = P_f + i_f M_i \quad P: \text{人口}, i: \text{移動率}, f: \text{妻} \quad (4)$$

$$M_i: \text{5年間の男性の移動数}$$

家族移動の適応範囲を限定したものである。付帯移動1と別の範囲のコホートを対象にすることを前提にしており、男女の偏りを是正することを目的としている。女性の転勤による移動数は男性の10分の1程度であるのにもかかわらず、地域によって男女の人口構成にそれ程差が出ない。これは転勤など、移動理由は男性にあるが、女性がそれに随伴する形で移動しているからと考えられる。特に男女が共に移動する結婚は住宅事情について県内移動の第2位の理由である。男性移動者に対する結婚移動者の割合を式の移動率を使用する。

行政事業 (団地建設) :

$$P_a = P_a + \sum_{m=1}^n i P_m H \quad P: \text{人口}$$

$$P_{1-n} = P_{1-n} + i P_{1-n} H \quad a: \text{事業が行われるセル}$$

$$H = 1 - (Y/y)^2 \quad n: \text{セルの総数}$$

$$i: \text{移動率}, H: \text{魅力}$$

$$y: \text{事業が行われる年数}$$

$$Y: \text{事業が始まってからの経過年数}$$

人口移動に強く影響を及ぼす要因の中には、人口密度で置換えが出来ない要因も存在する。その一つである大型団地の建設を想定したルールである。

### 6. シミュレートの結果

近接移動：移動を開始する年齢が低いほど、人口が流入するセルとその周辺では変化が顕著に現れた。しかし、それはシミュレートするサイクルが少ない場合であり、20サイクルほど実行させると結果に差はほとんど無くなった。全年齢で移動を行わせると、全セル

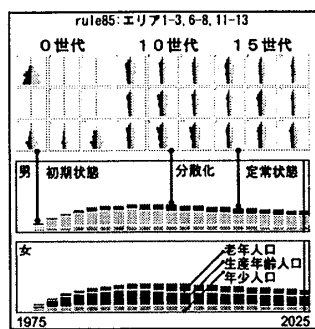


図6 パラメータパターン 85

がほとんど同じ人口構成へと平均化される。その後、総人口は安定し、人口構成は徐々に高齢化を続ける。人口比パラメータが高いほど、平均化の速度が大きい。0.1で10サイクル目、0.5で5サイクル目、1.0で3サイクル目に平均化される。以上までの結果は、男女のパラメータを同じにした場合であるが、異なる値を設定した場合は、

男女で左右対称であった人口ピラミッドが、男女で上下にずれる。これは出生率が単純に女性の人数から割出され、男女比が反映されていない結果であろう。

遠距離移動：移動年齢の幅を増やすと、人口の集中が促進される。さらに人口集中セルでは、加速度的に人口が増えるだけでなく、近隣のセルの人口を吸上げ、セル間の人口の差が拡大を続けた。出生率と死亡率のバランスにより、

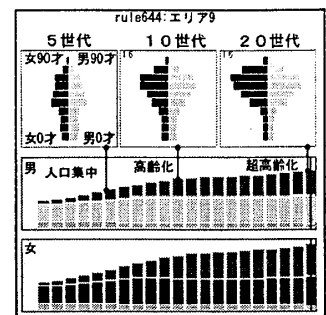


図7 パラメータパターン 644

時間の経過と共に人口減少が進行し、人口集中セルとその他の地域の差は一見少なくなっていくが、近接移動ルールのように平均化されることはない。人口比パラメータと距離パラメータを併用した場合、人口は少ないが人口集中セルから離れている場所に比べ、近接する場所から人口集中セルへの人口の流出が著しい。このルールでは、15 サイクル付近からの集中地区での急激な高齢化が、非常に特徴的である。

家族移動：このルールにより増加したセルと減少したセルは、共に櫛の歯が抜けたような状態になった。経年変化のグラフに注目すると、人口は周期的なピークを何度か迎えながら、穏やかに減少していく。この周期は概ね親の年齢設定と子の年齢設定の差に等しい。

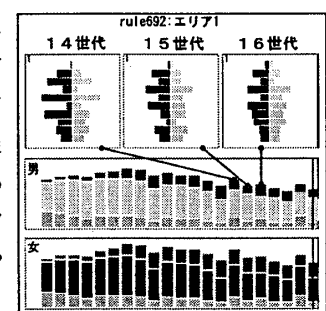


図8、ルール692

結婚移動：このルールは家族移動と同じく、人口を直接移動させるものではなく、男性の移動数に応じて他の年齢層を移動させるため、男性を移動させる他のルールと併用した際に顕著な特徴が発生する。単独で使用した場合、ルールを用いない自然増減のみのグラフとほぼ同じ結果が出た。

行政事業：現実に団地が建設されたセル11にのみ適用した。結果、急激に人口が上昇し、その後穏やかに減少した。遠距離移動のルールに見られるような急激な高齢化現象は発生せず、近接セルの人口構造を歪ませる事もなかった。

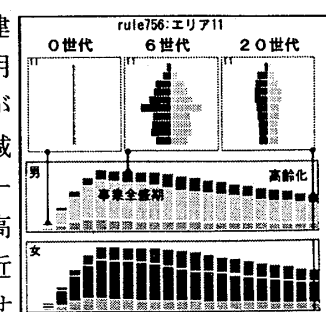


図9 パラメータパターン 756

複合ルール

以上の結果と、現実における統計による推定値により、パラメータを決定する<sup>注4)</sup>。下の図10、11の色の付いている所がそのシミュレーション結果である。黒枠の四角が2000年の実際の統計による値である。

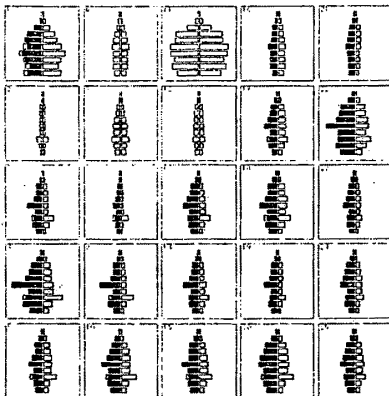


図10 封鎖人口シミュレーション結果

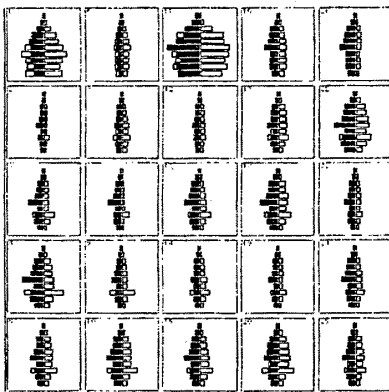
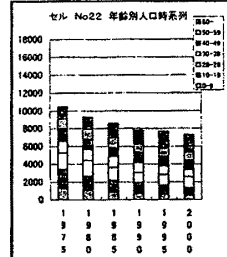
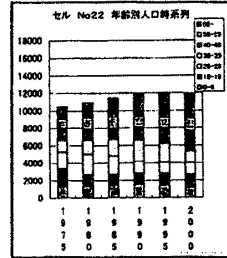


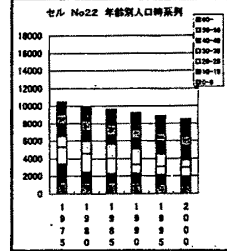
図11 最良シミュレーション結果



グラフ1 セル22、実際



グラフ2 セル22、封鎖人口



グラフ3 セル22、最良結果

7. 考察

全てのパラメータに推定最適値を入力した場合の結果は<sup>図11)</sup>、人口が移動しないと仮定した封鎖人口<sup>図10)</sup>に比べ、殆どのセルで現実の2000年の値に近い結果となっている。周辺のセルでは封鎖人口の方がより現実を再現している場合もあるが、このようなモデルでは周辺部の精度が一般的に下がるため、様々なモデルの範囲を用い、結果の相違を調べる必要がある。

8. 評価

以上の結果より、このモデルが比較的現実の人口移動を再現していると言える。セルの複層化により、より複雑なルールを容易に記述できるという有効性も確認できた。今後、このモデルの数を増やし、鹿児島市の全域を対象にした場合に、パラメータをどのように変更する必要があるのかを試行する必要がある。複数のルールを併用した場合、挙動が非常に複雑になり、その予測と結果の評価方法にまで考察が及ばなかったという問題点も残っている。

10. おわりに

本稿では人口移動の予測に留まったが、本研究が主

題にしている、セルオートマトンの複層化という概念を取り入れたモデルは、要素を増やしても、それらの相互作用を規定するのが比較的容易である。この点で、都市といった複雑で構成要因の多い対象の変化を追っていくには非常に有利である。

今後、本稿で行った人口移動モデルと相互に作用しあう商業・住宅などの要素を追加し、人口以外の指標でのルールの設定も必要である。最終的には、過疎化の抑止や商業地の活性化といった具体的な事象を再現可能な、「都市の誘導」モデルの構築を行う。

参考・引用文献

- 1) 石川晃、市町村人口推計マニュアル、古今書院、1993
- 2) 石川義孝、人口移動の計量地理学、古今書院、1994
- 3) 伊藤達也、生活の中の人口学、古今書院、1994
- 4) 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
- 5) 中嶋正之、複雑系の理論と応用、オーム社、1998
- 6) 葛原道久、格子気体法・格子ボルツマン法、コロナ社
- 7) R White, G Engelen, 「Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling」, Environment and Planning B: Planning and Design, vol.24, p235-246, 1997
- 8) K Clarke, L Gaydos, S Hoppen, 「Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area」, U.S. Geological Survey <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>
- 9) 瀧澤重志、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」、日本建築学会計画系論文集 NO.528 P.267 2000年2月
- 10) 五十嵐 誠、「セル・オートマトンを用いた人口・従業者分布予測モデルの開発」、豊橋技術科学大学建設工学系 大貝彰都市地域計画研究室 修士論文(注)

- 1) アメリカの Santa Fe 研究所の John L. Casti 博士による複雑系の定義
    - ① モデルを構成している要素の数は中程度。(少なすぎてもいけないし、多すぎてもいけない。)
    - ② 各要素は知性を有している。(情報にもとづく意思決定ができる。)
    - ③ 各要素は局所的な情報にもとづいて相互に作用する。(つまり、各要素は完全な情報を知って意思決定しているのではなく、限定された情報にもとづいてしか、意思決定ができない。)
 複雑系は、現象自体が理解されていないため数式で記述することが出来ないか、あるいは多くの現象が複合して記述しようとする微分方程式の数が膨大になり、解くことが出来ない。
  - 2) セルオートマトンの定義
    - ① 同じ大きさのセルが規則正しい2次元格子状に存在する。
    - ② セルは生と死(それ以上でもよい)の状態をとる。
    - ③ 各セルの状態はある時間ステップで更新されていく。
    - ④ あるセルの次の状態は極近い周囲(と自身)の状態によって決まる。
    - ⑤ 更新は全てのセルで同時に行われる。
  - 3) Conway の LifeGame のルール
 

あるセルの次の状態は、周囲の8個のセルのうち生きているセルが

|          |        |  |  |
|----------|--------|--|--|
| 1以下 (過疎) | →死ぬ    |  |  |
| 2 (良い)   | →変化しない |  |  |
| 3 (最適)   | →生まれる  |  |  |
| 4以上 (過密) | →死ぬ    |  |  |
- |              |          |              |        |
|--------------|----------|--------------|--------|
| 近接移動:        | 家族移動:    |              |        |
| n=9          | if=0.1人  |              |        |
| $\gamma=0.7$ | ip=0.1人  | 遠距離移動:       |        |
| 5~80歳        | ic=0.1人  | n=25         | 団地建設:  |
| 結婚移動:        | 夫=30~35歳 | a=1          | a=11   |
| if=0.2       | 妻=30~35歳 | $\gamma=0.8$ | n=25   |
| 夫=25~30歳     | 親=55~60歳 | $\beta=0.5$  | i=5.5% |
| 妻=20~25歳     | 子=10~15歳 | 20~45歳       | y=4年   |