

# CAを用いたミクロな宅地用途シミュレーションモデルの開発と適用 STUDY ON DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MICRO SIMULATION MODEL FOR LOT USAGE TRANSITION USING CA

沈 振 江\*, 川上光彦\*\*, 川村一平\*\*\*, 加藤千智\*\*\*\*

*Zhenjiang SHEN, Mitsuhiro KAWAKAMI, Ippei KAWAMURA  
and Kazutomo KATO*

In this paper, a simulation system using CA is suggested in order to visualize land use patterns in a built-up area after development. A land use simulation system using CA is usually developed in a regular grid net or a network, where the spatial relationship of the adjacent grids or network is easily dealt with. A new concept in this project is the exploration of how to deal with spatial micro simulation in land use patterns of plots in blocks while considering the influence of the road network. Irregular adjacent plots in blocks and relevant plots on the other side of the road network are the intended simulation targets. In this paper, a prototype simulator is discussed regarding how to simulate land use patterns after land readjustment projects. In order to examine the effects of the simulation system, we chose one study area in Kanazawa city. However, the simulation of households, energy expenditure and traffic volumes based on land use pattern is left as our further research, in which households, energy expenditure and traffic volumes can be calculated according to statistical indicators of the Ishikawa province and National Statistics office.

**Keywords:** CA, Land Readjustment Project, land use, usage transition

CA, 土地区画整理事業, 土地利用, 用途変遷

## 1. はじめに

近年, 都市計画事業の遂行などにおいてより一層の住民参加が求められてきている。そのため, 本研究では, 計画設計段階で将来市街地像を提示できる計画支援ツールの開発することを目的にしている。地区レベルの市街地において, 計画設計条件などによる宅地単位のミクロな市街地形成をシミュレーションし, 視覚化することができれば, 計画設計段階で都市の将来像をよりイメージしやすく理解することができる。土地区画整理事業の場合, 減歩や換地により宅地区画が整理されるが, 施行後における市街地像が計画設計段階で想定しにくく, 事業後における共通な市街地像イメージの提示が重要な課題である。将来市街地像には, 宅地用途, 建物形態, 街並み景観などの提示が必要であり, 持続可能な地域社会構築という観点から, 環境影響の状況を提示することも重要である。一般的には, 利用者が宅地用途や建物形態の基本方針を決めれば, 用途地域などの規制にもとづいて建築可能な空間形態がほぼ確定でき, それにもとづいて居住人口や車の所有数の推測も可能で, 街並み景観のイメージもある程度提示できる。このうち, 宅地用途の決定は, 市街地像を提示するための重要な前提と考えられる。

本研究では, 将来市街地像を提示するため, 用途地域や前面道路などの計画設計条件の影響によって事業後の宅地用途の変遷をシミュレーションすることが可能であれば, 敷地関連規制, 宅地の形状や面積によって建築可能な空間の推測が可能になり, 街並み景観をシミュレーションすることも可能と考えている。本稿では, 計画設

計条件の影響を中心に, 宅地用途シミュレーションのモデル構築を試みたい。

既存研究では, 川上ら<sup>1)</sup>によると, 土地区画整理後, 用途地域, 前面道路および角地の計画設計条件が宅地用途の形成要因であるとしている。また, マニルザマンら<sup>2)</sup>と沈ら<sup>3)</sup>は, 宅地の幾何的特性も用途の形成に影響があることを指摘している。一方, 計画支援システムの分野において, セルオートマトン(以下 CA)を用いた市街地形成シミュレーションシステムの開発が行われてきている。CAを用いる利点は, 単純なルールによって時間的推移による都市空間の成長, 空間パターンの変化を扱うことができることが挙げられる。これまで, アーバンスプロールのシミュレーションに関して, 多くの研究事例, 例えば, Fulong Wu<sup>4)</sup>, Claudia M., M. Batty 他<sup>5)</sup>が行なった研究が報告されており, Beneson と P. M. Torren<sup>6)</sup>が関連の研究事例を本の形でとりまとめている。これまで, 土地利用の変遷をメッシュ単位で一定ルールによりシミュレーションできるようにしてきたが, Ivan Bleich 他<sup>7)</sup>と Erickson 他<sup>8)</sup>が報告した非規則的ボロノイやポリゴンデータに対して CA を適用したような事例は少ない。渡辺ら<sup>9)</sup>と瀧澤ら<sup>10)</sup>は, CA を用いて都市をマクロ的に扱い, セル単位で都市拡大シミュレーションを行っている。渡辺らのモデルでは, セルの隣接関係を考慮した市街地拡大因子, すなわち開発促進, 開発抑制と土地適性といった要因が取り入れられており, 瀧澤らのモデルでは, 住居・商業・業務といった用途系の状態量を導入し, 捕食者・被食者の生態学モデルの考え方により, 用途間の需要

\* 金沢大学大学院自然科学研究科 准教授・博士(工学)

\*\* 金沢大学大学院自然科学研究科 教授・工博

\*\*\* 福井県 修士(工学)

\*\*\*\* 西松建設㈱ 修士(工学)

Assoc. Prof., Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University, Dr. Eng. Fukui Prefecture, M. Eng.

Nishimatsu Construction Co., Ltd., M. Eng.

循環や地域全体の影響も考慮している。これらの研究では、比較的簡単なルールで現実の都市の土地利用に類似した複雑なパターンを再現できているといえる。しかし、既存研究では、メッシュやグリッドの空間データを扱う場合が多く、実際の土地利用活動のミクロ的空間単位である宅地や街区などが殆ど研究対象とされていない。

本稿では、ミクロな土地利用の都市活動を再現するため、隣接宅地間の相互作用を、既存研究のCAの方法論を参考にして取り込み、計画設計段階で設定した用途地域、前面道路などの計画設計条件の影響、宅地の幾何的特性の影響などを取り入れ、宅地単位での宅地用途シミュレーションシステムを開発することを目的とする。なお、シミュレーションでは、利用者の意思も重要であるが、研究の初期段階であるので、利用者の意思などはまだ考慮していない。

## 2. 研究の方法

本研究では、CAを用いたマクロな都市拡大シミュレーションの既存研究の成果をミクロな市街地へと適用し、計画設計条件の影響を考慮するため、瀧澤らのモデルをベースにして計画設計条件パラメータを追加している。

マクロな都市拡大シミュレーションでは、土地利用が連続的に生じ、隣接セルが市街地化されていく。ミクロな場合、Erickson他は宅地と道路を、道路網、近傍宅地・街区の土地利用の影響を受けた一定のルールで成長させていくことを試みている。しかし、本稿では、事業後の整理された区画における宅地用途の形成が目的であり、ポリゴンである宅地の増殖と消滅がなく、事業地区内の宅地用途の変遷がシミュレーションの対象となる。

CAを用いてミクロな宅地用途の変遷をシミュレーションするため、宅地用途の分類を住居・商業・工業・未利用地といった用途系で行う。次に、宅地の用途系の形成には、各宅地が用途系の状態量を持つことにし、状態量の変化により、複数用途のうち1つの用途が現れるものとする。これらの方法はマクロレベルで行われた瀧澤らのモデルと類似しているため、瀧澤らモデルをベースにして構築することにした。なお、近傍宅地や近傍街区などの影響だけでなく、研究の目的に合わせて用途地域や道路網などの計画設計条件も宅地用途の形成要因としてシミュレーションモデルに導入する。さらに、実際の宅地の幾何的特性が宅地によって異なり、計画設計条件の影響を受ける程度が異なるので、シミュレーションでは、宅地の幾何的特性である面積や形状を考慮する必要もある。

このため、研究の方法として、瀧澤らのモデルを基に、これに計画設計条件による影響と宅地の幾何的特性を加えることで、シミュレーションを行う。シミュレーションモデルの検証には、仮想地区への適用によりモデルの挙動を分析し、さらにその有効性を実際の事例地区によって検証する。具体的には、仮想地区を用いてシミュレーションを行い、各種パラメータの変化に合わせて用途別宅地利用率の挙動を分析して、空間パターンの変動と合わせてモデルの有効性と安定性を検討する。実際の事例への適用について、金沢市の土地区画整理事業の施行地区を選定し、現実の宅地利用を再現するためのパラメータを設定し、CAの研究に良く用いられる浸透モデルのクラスター手法<sup>11)</sup>によってシミュレーション結果と現実との空間パターンの類似性を検証する。最後に現実と異なるシナリオを設定してシミュレーションを行い、シナリオの比較を通して計画設計

条件パラメータによる計画案の検証可能性を提示する。このようなモデルによって、住民への事業の説明や縦覧が必要となる事業の遂行のために、わかりやすい視覚的な資料として提示することができ、専門知識に詳しくない住民の参加を支援できると考えられる。

## 3. ミクロな宅地用途シミュレーションに用いるCAの基本概念

### (1) 宅地用途

シミュレーション用途は、細分すればより実際の市街地における宅地用途の変化に近づくが、本研究では、細分類を行うにはより複雑な条件を設定する必要があるため、用途系として住居、商業、工業、未利用地、公共の用途の5つに分類した。公共の用途に関しては公園、病院、学校などその後の変化が起こりにくいもので、都市計画決定され得るものでもあり、シミュレーションには組み込まないこととする。

### (2) 近傍宅地と多階層の隣接関係

街区内部において、図1のように当該宅地の隣接宅地を近傍宅地とする。ミクロな都市空間を扱うには、街区内部の近傍宅地だけに限定することは範囲が狭すぎる。このため、多階層な隣接関係として、宅地レベルから街区レベルまで市街地全体を扱える近傍概念が必要である。街区レベルについては、当該宅地が存在する街区と道路中心線を共有する街区を近傍街区としてその影響も取り入れることとした。本研究では、多階層の隣接関係を仮定して進めているが、本稿では、街区内の宅地及び街区レベルの隣接関係を扱うようにしている。

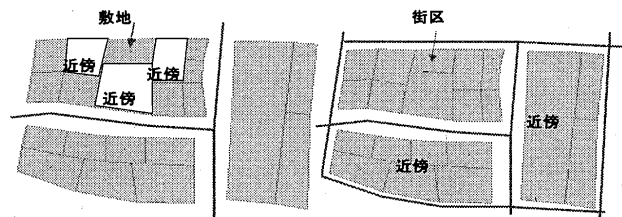


図1 多階層な近傍関係

### (3) 初期用途・初期状態量とシミュレーションステップ

CAを用いた手法では、隣接関係に基づいて宅地用途をシミュレーションするので、初期用途がないと遷移ルールを適用しても同じことの繰り返しとなる。本稿では、土地区画整理事業施行後の宅地用途の形成についてシミュレーションを想定しているため、初期用途は、全て未利用地とする。そして、宅地の所有者や利用者の意思を代表させるためには、乱数などを用いて用途別の初期状態量を与えるなどの考慮が必要である。具体的には、宅地用途が未利用地であったとしても、その宅地には、住居、商業、工業の状態量を有していると考え、0~1の一樣乱数を用いて、それを初期状態量とする。

土地区画整理事業後における市街地形成は長い期間を要する場合が多く、ここでは1年を4期とし、25年まで合計100回のシミュレーションステップを行うこととする。

### (4) 遷移ルール

1つの宅地は、用途別(住居・商業・工業)の状態量をそれぞれ持つ。状態量とは、それぞれの用途へのなりやすさを示す宅地が持つ潜在的なポテンシャルとして考えている。ある宅地内部の状態量の総和が大きいうことは、その宅地の土地利用が顕在化していることを意味し、また、ある用途の状態量が他の用途の状態量よりも

高ければ、その宅地はその用途が形成していると解釈できる。そこで、瀧澤らのモデルを参考にして遷移ルールを設定する。

#### a) 用途形成

宅地内部の状態量の総和が閾値  $X_{\max}$  より大きい場合には、その宅地は土地利用が顕在化していると考え、住居、商業、工業のいずれかの用途を持つものとする。その際、宅地内部の状態量のうち最も大きいものがその宅地の用途として表れるとする。

#### b) 未利用地化

宅地内部の状態量の総和が閾値  $X_{\min}$  より小さい場合には、その宅地は利用されなくなり、未利用地となる。

#### c) 現状維持

宅地内部の状態量の総和が閾値  $X_{\min}$  以上  $X_{\max}$  以下であるならば、その宅地用途は変化せず、前シミュレーションステップの宅地用途と同じものとなる。

### (5) 遷移ルールにおける計画設計条件と幾何的特性の影響

ミクロな市街地では、用途地域や前面道路などの計画設計条件と宅地の幾何的特性が宅地用途の形成に影響があることから、ミクロな宅地単位での用途の形成要因として新たに取り入れる必要がある。本稿では、宅地用途の遷移ルールとしては、近傍宅地、近傍街区だけではなく、計画設計条件と宅地の幾何的特性も考慮する。以上の基本的構想に基づいて、次の節では、瀧澤らのモデルを参考にしてシミュレーションモデルを構築する。

## 4. シミュレーションモデル式

シミュレーションモデルの式(1)は瀧澤らのモデル式を参考にして作成したものである。新しく取り入れたのは、用途地域や前面道路などの計画設計条件と宅地の幾何的特性による影響量である。

$$x_i^{(m)}(t+1) = \{x_i^{(m)}(t) + \Delta x_i^{(m)}(t) + \Delta x_b^{(m)}(t) + \text{Metab}_i^{(m)}(t) + \text{GloTransp}_i^{(m)}(t)\} \cdot \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_j^{(m)}\right)^q \quad (1)$$

$x_i^{(m)}(t)$ : 宅地  $i$  のステップ  $t$  における用途  $m$  の状態量

$m$ : 用途 ( $R$  = 住居、 $C$  = 商業、 $I$  = 工業)

$t$ : ステップ

$i$ : 対象宅地の番号

$b$ : 対象宅地の存在する街 区番号

$P_j^{(m)}$ : 用途  $m$  の計画設計条件 パラメータ

$q$ : 宅地の幾何的特性による計画設計条件補正係 数

$\text{Metab}_i^{(m)}(t)$ : 用途転換の循環状態量

$\text{GloTransp}_i^{(m)}(t)$ : 地区全体の影響状態量

式(1)はシミュレーションの  $t+1$  時点における、当該宅地  $i$  の用途  $m$  の状態量を計算する式である。  $t+1$  時点の状態量を、  $t$  時点の状態量に、宅地  $i$  に隣接する近傍宅地、近傍街区の影響量、宅地内部の状態循環、地区全体の影響量、用途地域や前面道路などの計画設計条件と宅地の幾何的特性による影響量を取り入れることによって表している。

式(2)、(3)は近傍宅地・街区の土地利用からの影響を受けて、状態量の増減を考慮するものである。近隣宅地の影響を計算する式(2)は瀧澤らのモデルを利用した。近傍宅地・街区の状態量の平均を求め、当該宅地、当該宅地の存在する街区の状態量との差を出すことにより、近傍の土地利用の影響を考慮した状態量を表すことができると仮定する。ここで、街区の状態量とは、街区に存在する宅地の状態量の平均であると定義している。

$$\Delta x_i^{(m)}(t) = G^{(m)} \cdot \left\{ \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} x_k^{(m)}(t) - x_i^{(m)}(t) \right\} \quad (2)$$

$k$ : 近傍宅地の番号

$G^{(m)}$ : 用途  $m$  の近傍宅地による変化 補正係数

$N_i$ : 宅地  $i$  の近傍宅地数

$$\Delta x_b^{(m)}(t) = G^{(m)} \cdot \left\{ \frac{1}{N_b} \sum_{l=1}^{N_b} x_l^{(m)}(t) - x_b^{(m)}(t) \right\} \quad (3)$$

$l$ : 近傍街区の番号

$G^{(m)}$ : 用途  $m$  の近傍街区による変化補正係数

$N_b$ : 街区  $b$  の近傍街区数

$$\text{Metab}_i^{(m)}(t) = \frac{D^{(m)} \cdot x_i^{(m)}(t) \cdot x_i^{(m+)}(t)}{1 + H \cdot x_i^{(m+)}(t)} - \frac{S^{(m)} \cdot x_i^{(m)}(t) \cdot x_i^{(m-)}(t)}{1 + H \cdot x_i^{(m-)}(t)} \quad (4)$$

$m+$ : 用途  $m$  の状態量を増やす用途

$m-$ : 用途  $m$  の状態量を減らす用途

$D^{(m)}$ : 状態量流入パラメータ

$S^{(m)}$ : 状態量流出パラメータ

$H$ : 状態量の増加速度抑制の調整パラメータ

式(4)は、瀧澤らのモデルを利用したものであるが、用途転換の傾向を宅地内部の状態循環<sup>注1)</sup>で表したものと異なる意味を持つ。状態循環は3つの状態量がお互いに影響しあうことで、用途転換の可能な傾向が表れると仮定する。用途転換の可能なパターンは多様であり、利用者の意図にも関わる。例えば、工業→住居→商業のような循環パターンの場合、工業から住居、住居から商業へ用途転換の傾向になり、住居の状態量の計算は、工業の状態量から流入し、商業の状態量へ流出するものになっている。パラメータ  $D^{(m)}$  と  $S^{(m)}$  は、用途転換の傾向をコントロールする役割を持っている。  $H$  は状態量の流入や流出量に抑制するために設けている。循環パターンが多くあるため、シミュレーションを簡略化するため、本稿では一つの循環パターンを用いることとした。

$$\text{GloTransp}_i^{(m)}(t) = \frac{GT^{(m)} \cdot x_i^{(m)}(t) \cdot \frac{X^{(m)}(t)}{N_{\text{all}}}}{1 + H \cdot \frac{X^{(m)}(t)}{N_{\text{all}}}} \quad (5)$$

$GT^{(m)}$ : 用途  $m$  の地区全体の調整パラメータ

$N_{\text{all}}$ : 画地総数

$X^{(m)}(t)$ : 時刻  $t$  における用途  $m$  の状態量の総和

$H$ : 状態量の増加速度抑制の調整パラメータ

式(5)は、瀧澤らのモデルを利用したもので、地区全体の影響を表す<sup>注2)</sup>。影響量は考慮している宅地内部の状態量に依存し、それと地区全体のその用途の状態量の平均値との積で表れることと仮定する。状態量の大きな宅地ほど多くの影響があることになるが、その増加速度は地区全体の当該用途の平均状態量が大きいほど制約を受ける。

式(6)では、新しい内容として、計画設計条件による影響として用途地域、前面道路及び角地非角地による影響をここで考慮する。シミュレーションを通じて、宅地用途の変遷を表現させるために、計画設計条件の影響を実数値で表すこととする。

まず、 $P_{iu}^{(m)}$  は、用途地域  $u$  における用途  $m$  の状態量を調整する役割をするものとして与える。そして、前面道路種別、角地非角地による影響を考慮する  $P_{2r}^{(m)}$ 、 $P_{3c}^{(m)}$  を与える。これら3つの計画設計条件  $P_j^{(m)}$  を各宅地の特性とする。

マニルザマンらは宅地用途の転換と宅地の幾何的特性との関連を分析し、宅地形状がどれだけ整っているのかを示す Compactness

Index (C. Index, 式 (7)) という宅地面積と周長を用いた指標<sup>注3)</sup>を提案している。この指標は宅地の形状を示す、宅地面積と周長を用いた無次元の指標である。cは完全な円の時に値が1となり、もっとも宅地形状が整っているとしている ( $0 < c < 1$ )。cの値が小さいということは、宅地形状が複雑であるということである。また、沈らの研究では、ある宅地の宅地形状が不整形で複雑な場合、宅地の利用が制限され、計画設計条件による影響が反映されにくいということ<sup>注4)</sup>を指摘している。

$$\sum_{j=1}^3 P_j^{(m)} = P_{1u}^{(m)} + P_{2r}^{(m)} + P_{3c}^{(m)} \quad (6)$$

$P_j^{(m)}$ : 用途mの計画設計条件パラメータ

j: 計画設計条件数 ( $1=1u, 2=2r, 3=3c$ )

$P_{1u}^{(m)}$ : 用途地域パラメータ

$P_{2r}^{(m)}$ : 前面道路パラメータ

$P_{3c}^{(m)}$ : 角地非角地パラメータ

u: 用途地域の種類

r: 前面道路の種類 ( $1=$  幹線道路,  $2=$  補助幹線道路,  $3=$  区画道路)

c: 角地の種類 ( $1=$  角地,  $2=$  非角地)

$$c = 2 \frac{\sqrt{a}}{p} \quad (7)$$

c: Compactness Index

p: 周長

a: 宅地面積

cの取り入れ方については、計画設計条件補正係数として  $q=c^2$  を計画設計条件パラメータ  $\sum_{j=1}^3 P_j^{(m)}$  に指数として用いることによつ

て、 $\left( \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 P_j^{(m)} \right)^q$  全体で計画設計条件による規制・誘導の影響の程度

を考慮した宅地の幾何的特性による影響量と考えることとする。

## 5. モデルの挙動分析

本節では、用途mの変化補正係数  $G^{(m)}$ 、状態量流入パラメータ  $D^{(m)}$ 、状態量流出パラメータ  $S^{(m)}$ 、状態量の増加速度抑制の調整パラメータ H、用途mの地区全体の調整パラメータ  $GT^{(m)}$ 、計画設計条件パラメータ  $P_j^{(m)}$ 、遷移ルールの閾値  $X_{max}$ 、 $X_{min}$  を変化させることにより、用途形成とその変遷に関してモデルの挙動を分析する。考察の対象は、シミュレーションにおける用途別宅地利用率である。

### (1) 仮想地区における初期状態量の設定とモデルの安定性

まず、宅地形状が規則な地区で行い、パラメータの挙動を分析する。そこで、 $c=0.89$  となる正方形の宅地が構成する単純なグリッドを元に作成した仮想的な地区 (図2) で行うこととする。道路網を無くせば、普通のグリッドの2次元CAモデルとして理解できる。また、各宅地の用途別の初期状態量は0~1の1様乱数を用いて与えた。さらに、パラメータを変化させた際に、モデルの挙動が明確に考察できるように、異なる用途系でも同じ値を用いて、ベースとするパラメータセット (表1) を設定する。それを元に、影響をみるパラメータのみを大小変化させ、それぞれ100回の初期乱数によるシミュレーションを行い、用途別宅地利用率の変動をみる。ベースとするパラメータセットを用いたシミュレーションは25年に相当する100ステップまで行い、結果を図3に示す。このようなステップの時間設定により、パラメータを用いて市街地形成のプロセスをコントロールする。パラメータを変化させたシミュレーションの挙

動分析は図4に示す。

モデルの安定性の検証には、ベースとするパラメータセットを用いて、1様分布の初期乱数によるシミュレーションを100回行い、宅地利用率の平均とその標準偏差を用いた誤差範囲を図3に示し、宅地利用率の不偏分散を用いて正規分布の母平均信頼区間を推定し、各ステップの平均はすべて有意水準0.05で有意が認められた。同じパラメータを用いたので、各ステップの異なる用途系の宅地利用率も重なるようにみえる。なお、住居・商業・工業の間には変動があり、標準偏差の最大値が8%まで上っているが、未利用地について、最初25ステップと最後の25ステップは殆ど変動がない。パラメータを変化させた場合も、同じように有意性が認められたので、より明確にパラメータの変化による宅地利用率の変動を表現するため、図4にはシミュレーションの平均と標準偏差を用いた誤差範囲ではなく、ひとつのシミュレーションの結果を示すようにした。

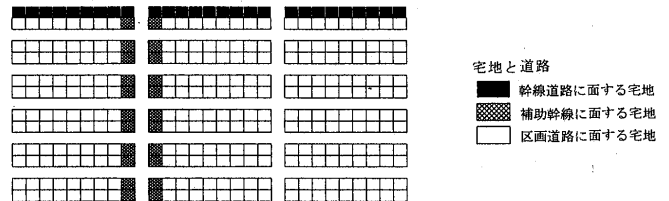


図2 挙動分析を行うための仮想地区

表1 挙動分析時にベースとしたパラメータセット

		R(住居)	C(商業)	I(工業)
用途地域	p1:準工業	1.0000	1.0000	1.0000
前面道路	p21:幹線道路	1.0000	1.0000	1.0000
	p22:補助幹線道路	1.0000	1.0000	1.0000
	p23:区画道路	1.0000	1.0000	1.0000
角地・非角地	p31:角地	1.0000	1.0000	1.0000
	p32:非角地	1.0000	1.0000	1.0000
Metab項	D:状態量流入パラメータ	0.0100	0.0100	0.0100
	S:状態量流出パラメータ	0.0100	0.0100	0.0100
GloTransp項	GT:地区全体の調整パラメータ	0.0500	0.0500	0.0500
H:状態量の増加速度抑制の調整パラメータ		1.0000		
G:近傍宅地・街区による変化補正係数		1.0000	1.0000	1.0000

閾値	X(min)	0.00
	X(max)	4.00

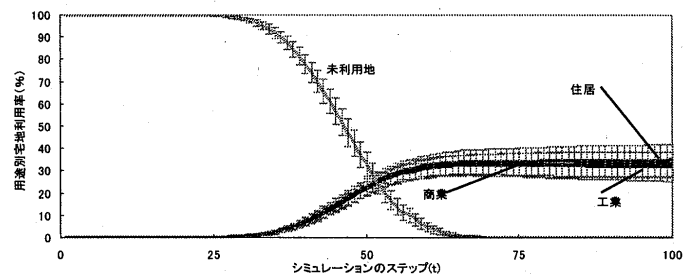


図3 シミュレーションの宅地利用率の平均と標準偏差を用いた誤差範囲

### (2) 計画設計条件パラメータと閾値の挙動

図4(1-a, 1-b)のように、住居の用途地域パラメータ  $P_{1u}^{(R)}$  を変化させた場合であるが、大きくすれば住居の宅地利用率が増加し、小さくすれば住居の宅地利用率が減少することが分かる。このように、用途mのパラメータを調整すれば、用途mの宅地利用率が増減するという傾向は、用途地域のパラメータ以外、他の計画設計条件パラメータ  $P_j^{(m)}$  (前面道路, 角地・非角地) についてもみられる。

遷移ルールの閾値  $X_{max}$  を変化させた場合 (図4の2-aと2-b) であるが、当然ではあるが閾値を大きくすれば用途の発生が遅くなり、小さくすれば用途の発生が早くなっていることが分かる。

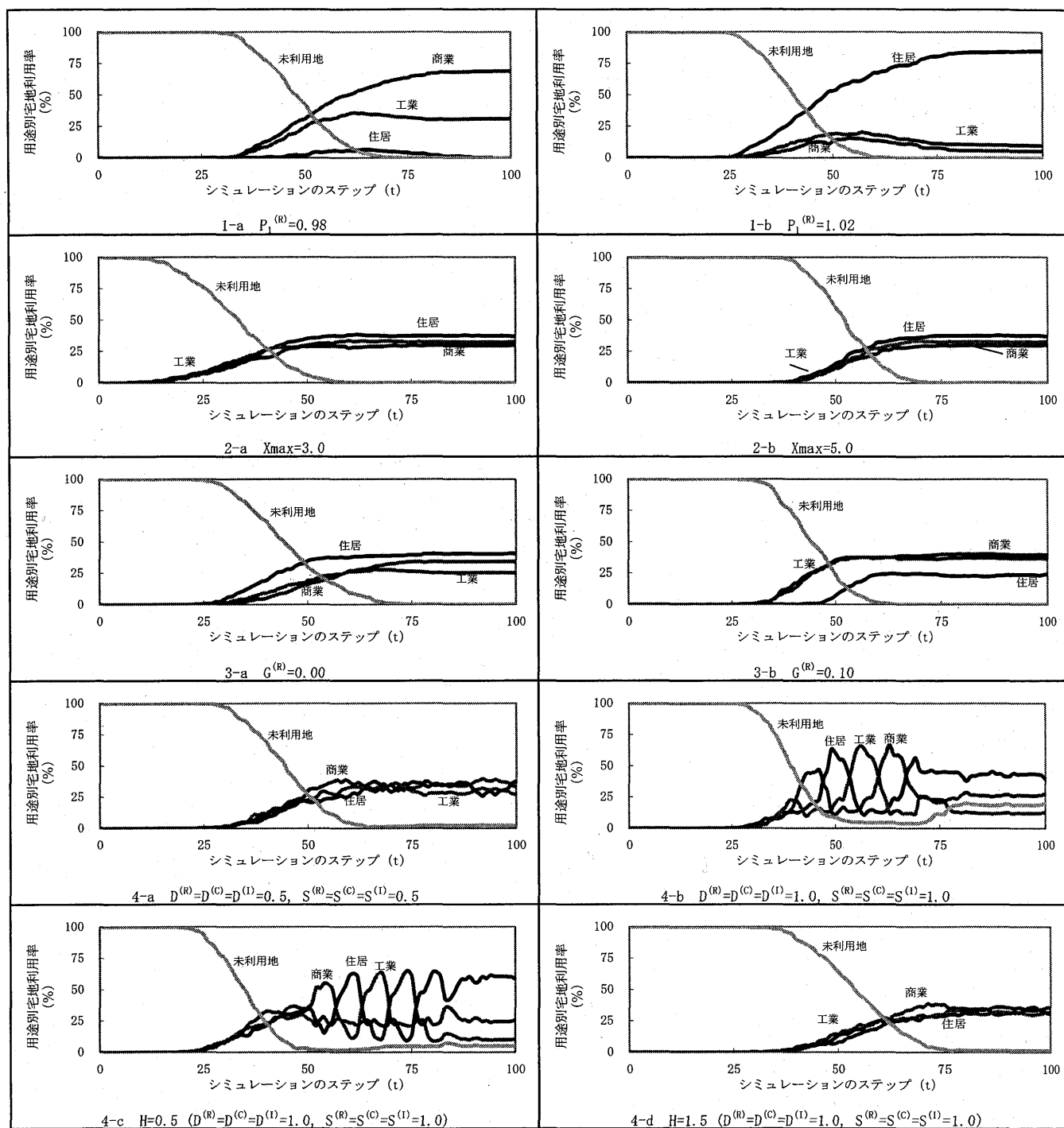


図4 シミュレーションにおけるパラメータによる用途別の宅地利用率の挙動

### (3) 近傍の影響について

CAの基本である近傍の影響は重要である。住居以外の変化補正係数  $G^{(m)}$  を1にし、図4(3-a, 3-b)のように、 $G^{(R)}$  を0から0.1に変化させたが、0の場合、近隣から影響がなく、 $G^{(R)}$  を0.1にした場合、近隣の影響で、住居の宅地数の減少が見られた。これは、式(4)によれば、住居の近傍状態量との差がプラスかマイナスの場合により影響が異なり、住居の状態量の増加も減少も起こりえるということである。

### (4) 宅地内部の状態循環と地区全体のパラメータの挙動

住居、商業、工業の状態量流入パラメータ  $D^{(m)}$ 、状態量流出パラメータ  $S^{(m)}$  をともに変化させた場合であるが、変化を大きくすれば

宅地用途の循環(図4の4-aと4-b)が表れる。しかし、単独で調整する場合、パラメータ  $D^{(m)}$  を大きくすれば、単に用途mの宅地利用率が増加するという傾向になる。また、パラメータ  $S^{(m)}$  については逆の傾向が見られる。状態量の増加抑制パラメータ  $H$  は、宅地内部の影響をコントロールでき、値が大きく設定されると、循環による用途mの宅地利用率の振動の幅が小さくなる(図4の4-cと4-d)。そして、 $H$  は地区全体への影響もあり、大きく設定すると、用途mの宅地状態量の増加が抑制される。用途mの地区全体の調整パラメータ  $GT^{(m)}$  については、大きく設定すれば、用途mの宅地利用率が増加する傾向がみられる。他に、シミュレーションのステップの増加につれ、近隣による状態量の変化が宅地内部による状態量の変化に

比べて大きくなるので、図 4(4-b, 4-c)のように用途転換の現象もなくなり、用途別の宅地利用率が安定する。用途転換を長くさせることが必要ならば、 $D^{(m)}$ や $S^{(m)}$ を大きく設定することで効果がある。

このように、シミュレーションの時間経過と共に、計画設計条件のパラメータ、宅地内部の状態循環や地区全体のパラメータは複雑な市街地成長のプロセスとの因果関係があることがわかった。補足として、図 2 の仮想地区の宅地は、道路網を無くせば、道路側の宅地がお互いに隣接していないが、CA の浸透モデルのセルとしてみることができる。さらに状態量についてみると、シミュレーションのステップの増加につれ宅地用途  $m$  の状態量が大きくなり、分散も大きくなり、居所の近隣同士の状態量は均等化の傾向がみられ、自己組織化の役割を果たし、宅地用途の空間パターンに影響を及ぼしている。多くの CA 関連研究で既に解明されているように、浸透確率が同じであれば、クラスターのパターンも類似する。すなわち、シミュレーションでは、特定用途の一定の宅地利用率が形成された場合、空間分布では当該用途のクラスターの大きさや数も類似する。ここでいうクラスターは、同じ用途で隣接し合う宅地の群であり、クラスターの大きさは一つのクラスターにある宅地数である。図 5 では、100 パターンの初期乱数によるシミュレーションの 100 ステップ目の結果を示しており、クラスター数が 1 の場合には、標準偏差が多少大きくみえるが、他は小さくなっている。シミュレーションの結果(図 3)として用途系別の宅地利用率がほぼ重なり、図 5 にも用途別のクラスターの大きさと数が類似することを確認できた。次節で非規則的宅地を対象にシミュレーションの結果と事例地区の空間分布との比較によってこの現象を検証することもできる。

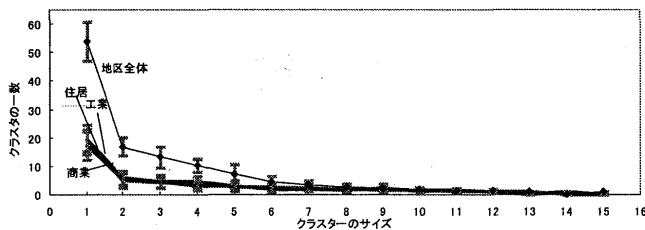


図 5 乱数によるシミュレーションの空間パターン

## 6. 事例によるモデルの検証

### (1) 事例地区の選定

モデル検証のために、土地区画整理事業施行後の宅地用途の形成に注目して金沢市の土地区画整理事業を対象に事例として取り上げ、事例地区の選定を行う。シミュレーションの可能性を検証するため、多くの用途を許容できる用途地域を検証の対象としたい。なお、道路網については、前面道路として幹線道路、補助幹線道路および区画道路があることを選定基準とする。

以上の選定基準により抽出作業を行った結果、松村第一地区(施行年度 1969~73)の一部であるが、主要地方道金沢・港線を含み、多用途の利用が可能である準工業地域がかけられている事例地区を対象とした。この地区は、松村第一地区でも最も用途の混在がみられる地区であり、図 6 に指定用途地域を示している。同地区の区画整理事業は、図 7 のように 1969 年から 1992 年の時点まで、表 3 に示す用途別宅地利用率で市街地が形成されている。

### (2) パラメータの設定とシミュレーション

準工業地域は、主に軽工業やサービス施設等が立地する地域であり、危険性・環境悪化が大きい工場のほかは、ほとんど建てられる。このため、他の用途地域に比べると、比較的に偏らないパラメータとなると考える。計画設計条件パラメータ  $P_j^{(m)}$  について、準工業地域の各用途のパラメータを 1 にする。幹線道路沿いには商業が立地しやすく、区画道路沿いには住居が立地しやすいということで、前面道路のパラメータを表 2 のように調整した。角地に商業が立地しやすく、非角地に他の用途が立地しやすいということで、角地のパラメータを表 2 のように調整した。まだ準工業地域なので、工業系のパラメータを住居よりやや高くした。

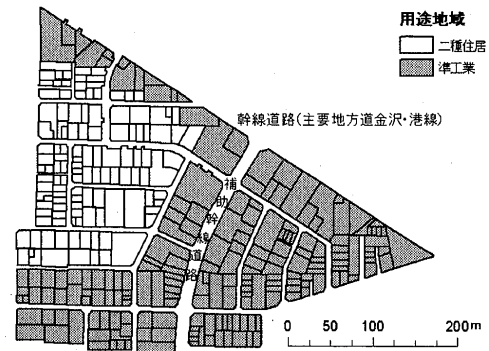


図 6 松村第一地区の宅地データ(準工業地域)

表 2 シミュレーション時のパラメータの値

用途地域	R(住居)	C(商業)	I(工業)
p1:準工業	1.0000	1.0000	1.0000
p21:幹線道路	0.9000	1.1000	1.0000
p22:補助幹線道路	0.9000	1.0000	1.1000
p23:区画道路	1.0400	0.9100	0.9500
p31:角地	0.9000	1.1010	0.9990
p32:非角地	1.0210	1.0000	0.9950
Metab項			
D:状態量流入パラメータ	0.0500	0.0500	0.0500
S:状態量流出パラメータ	0.0500	0.0500	0.0500
GloTrans項			
GT:地区全体の調整パラメータ	0.1000	0.1000	0.1000
H:状態量の増加速度抑制の調整パラメータ		10.0000	
G:近傍宅地・街区による変化補正係数	0.0500	4.0000	3.0000

閾値	X(min)	0.00
	X(max)	2.47

表 3 1992 年時点とシミュレーション結果の用途別宅地利用率

用途別の比率	住居	商業	工業	未利用地	空間パターン	幹線道路	補助幹線道路	区画道路
実際の宅地利用率(%)	44.7	43.6	3.7	8.0	実際の宅地数	25	27	136
シミュレーションの平均(%)	43.3	44.3	4.2	8.2	シミュレーションの平均的中率(%)	75.8	73.1	54.3
標準偏差(%)	2.8	2.8	1.4	1.8	標準偏差(%)	0.8	3.9	2.9

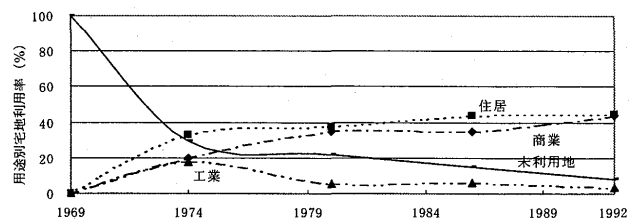


図 7 事例地区における宅地用途の形成

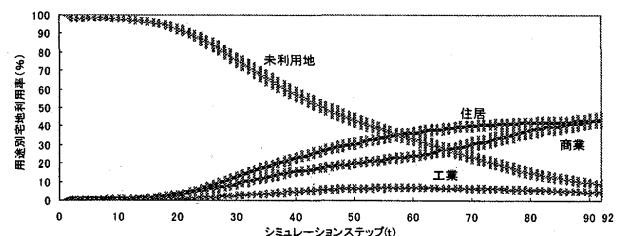


図 8 シミュレーションの宅地利用率の平均と標準偏差による誤差範囲

なお、図 7 に示す 23 年の宅地用途の形成を再現するため、計画設計条件以外のパラメータ(表 2)も調整した。まず、状態循環  $D^{(m)}$ ,  $S^{(m)}$  と  $H$

のパラメータについては、微妙な増減も用途循環の周期と振幅に大きく影響するが、事例地区では用途転換があまりみられないので、 $D^{(m)}$ 、 $S^{(m)}$ を小さく調整し、 $H$ を大きく調整した。次に、 $GT^{(m)}$ の微妙な増減も地区全体の用途 $m$ の状態量に大きく影響するので、宅地用途の形成プロセスに合わせて小さい値にして調整した。最後、計画設計条件のパラメータにより、商業と工業の状態量が大きい宅地が実態以上に多かったため、 $G^{(c)}$ 、 $G^{(i)}$ を大きくして状態量を減らす必要があった。

初期乱数によるシミュレーションでは、図8に示すように、事例地区における用途形成の23年に合わせて92ステップを行ったところで、1992年までの実際の宅地利用率の変化を比較すると、各用途の変遷傾向が非常に似ているといえる。表3より、100回シミュレーションの用途別宅地利用率の平均については、住居・商業・工業の差が殆どなく、ほぼ再現することが出来ている。なお、実際の宅地用途の場所を比較し、100回シミュレーション(表3と図9)では、幹線道路と補助幹線沿いの宅地用途の平均的中率は75%前後になり、区画道路沿いの的中率も半数以上になっているので、空間パターンの再現性も非常に高いといえる。なお、用途別宅地利用率的中率の標準偏差が4%以内なので、シミュレーションは非常に安定しているといえる。

しかし、事例では、宅地用途がもっと早い時期で発生し、宅地利用率が複雑な挙動を示すが、シミュレーションは、これを精度高くは再現できなかった。これは、今回のシミュレーションプロセスでは、状態循環のパラメータを固定して変化させないシステムを用いることから生じる問題で、今後、用途転換のパターンや状態循環のパラメータを事例地区の状況に合わせて変化させるシステムとすることにより、実際の宅地用途変遷プロセスにあわせてシミュレートすることも可能と考えられる。補足であるが、事例地区では、宅地形状に関する $c$ 値の2乗は0.35~0.78の範囲となっており、表2の計画設計条件パラメータ $P_j^{(m)}$ がもたらした状態量の変化は0.94~1.06倍の範囲となる。

表4 クラスターを用いた空間分布パターンの比較

クラスターの大きさ	住居	商業	工業	未利用地
類別	現実	シミュレーション	現実	シミュレーション
1	6	5	11	9
2	3	5	3	6
3	1	3	4	2
4~6	4	2	3	4
7~9	2	2	2	0
10~12	2	1	1	0
13以上	1	1	1	0
クラスター総数	19	19	25	24
宅地数	84	83	82	7
用途別宅地利用率(浸透率)	44.7	44.1	43.6	43.6

表5 シナリオ別の用途地域パラメータ

	住居	商業	工業
P11:準工業地域	1.0000	1.0000	1.0000
P12:第一種住居地域	1.0600	0.9800	0.9600
P18:近隣商業地域	1.0000	1.0500	1.0000

### (3) 空間分布パターンの検証

前面道路別によるシミュレーションの的中率を検証したが、より具体的に空間パターンを検証するため、100回シミュレーションからランダムに一回を抽出した。空間分布パターン(図9)についてみると、現実の宅地用途の分布と類似していると考えられる。シミュレーション結果と事例地区について、宅地用途の空間分布パター

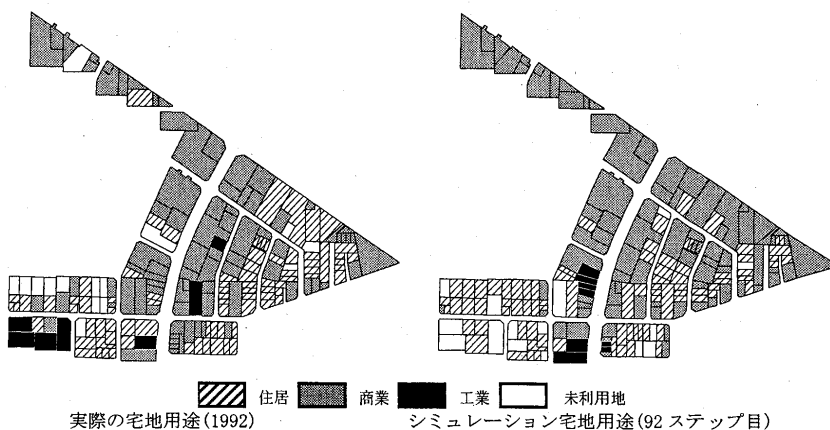


図9 空間分布の比較

ンの類似性を評価するために、CAの研究に良く用いられる浸透モデルのクラスターの方法によって、浸透確率すなわち用途別宅地利用率、同種類用途の塊すなわちクラスターから検証する。

用途別の宅地利用率を浸透確率として考えると、現実とシミュレーションでは、類似する宅地利用率があれば、類似する浸透確率があるので、類似するクラスターが形成されるはずである。表4より、シミュレーションの結果と現実と比べ、宅地数とクラスターの大きさやその度数分布の傾向はほぼ一致していることが分かる。このように、クラスターの大きさの度数分布を用いてシミュレーションの有効性も確認できた。

以上より、宅地利用率、空間分布などでは、現実とシミュレーション結果が類似しているという結果が得られた。このため、事例地区では、CAを用いたシミュレーションモデル式やパラメータの値は有効といえる。次の節では、図9の空間パターンに用いられた乱数を用いてシナリオ分析の可能性を検証したい。

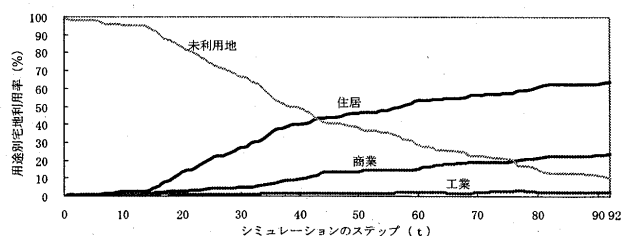


図10 第一種住居地域のシミュレーション結果

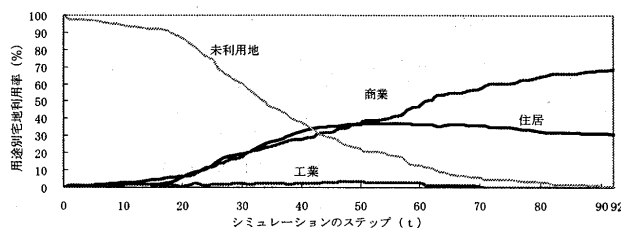


図11 近隣商業地域のシミュレーション結果

### 7. シナリオ分析の可能性—事例地区における用途地域の検証

本節では現実とは別のシナリオを設定し、シミュレーションを行う。すなわち、計画段階において、事例地区を別の用途地域で設計した場合の将来市街地像としての宅地利用率を検証してみたい。

このため、表5のように、前面道路や角地のパラメータを変更せず、用途地域だけを変更することで、別のシナリオとする。第一種住居地域のシナリオでは、これまでは危険性、環境悪化が大きい工



場のほかは、ほとんどが建てられる準工業地域であったものを、住居の環境を守るために第一種住居地域へと変更し、表5のように住居のパラメータの値を大きくする。近隣商業地域のシナリオでは、準工業地域を近隣商業地域とし、商業のパラメータの値を大きくする。シミュレーション結果を図10～12に示す。第一種住居地域のシナリオの場合、用途地域が準工業地域であったときよりも、住居の用途別宅地利用率が増加し、商業、工業の用途別宅地利用率が減少しているため、より住環境が守られている結果となっている。近隣商業地域のシナリオの場合、商業が大きく伸び、住居が半減し、事例地区では商業環境が形成されているという。なお、図12では、シナリオ別の空間パターンを示している。

なお、今回用いたパラメータは、事例地区においてのみ有効性を検証したため、今後多くの事例地区での学習を通して、統計的に有意なパラメータを確定できれば、計画設計段階で、異なるシナリオを設定し、将来市街地像としての用途別宅地利用率をシミュレーションで提示でき、参加型の計画検討などに役立てると考えられる。

## 8. 結論

本研究では、滝澤らのモデルを参考して、宅地および街区レベルの隣接関係を考慮したCAを用いたミクロなシミュレーションモデルを開発した。また、宅地用途の形成要因には宅地内部の状態循環、地区全体の影響、宅地および街区の隣接関係の考慮だけでなく、計画設計条件による影響と宅地の幾何的特性による影響も取り入れた。シミュレーションの検証に用いられる仮想地区と事例地区において、宅地の幾何的特性の制約を受けた計画設計条件の影響、すなわち用途地域、前面道路および角地非角地の影響はシミュレーションの結果である用途別宅地利用率の挙動により確認できた。なお、他の用途形成の各要因パラメータを変化させることで、ミクロな市街地における宅地用途シミュレーションにおいて、用途別宅地利用率の挙動を分析し、シミュレーションモデルの有効性を検証した。さらに初期乱数によるシミュレーションの安定性も統計的に検証した。

そして、土地区画整理事業施行後の土地利用に着目して事例地区を選定し、このシミュレーションモデルを適用した。その結果、用途別宅地利用率については現実の現象をほぼ再現することが出来ている。また、宅地用途別の空間分布パターンからみても、実際の再現性が高いことも分かった。さらに、事例地区の用途地域を準工業地域から第一種住居地域や近隣商業地域へと変更したシナリオでシミュレーションを行った。その結果、用途地域のパラメータを変更することにより、変更された用途地域に相応しいシミュレーション結果が提示されたと考えられる。しかし、複雑な宅地用途変遷プロセスにあわせて精度高くシミュレートすることは課題として残っている。

今後は、パラメータの設定について、多くの事例地区での学習を行い、さらに各用途地域のパラメータの値を統計的に検証すれば、土地区画整理事業などの計画段階で、市街地の将来像を宅地用途で提示することが可能となると考えられる。

今後の課題として、宅地所有者や利用者の意思や活動を反映させるため、CAをベースとしたマルチエージェントシステムによるシミュレーションの方法論を導入し、エージェントの意思によって初期状態量を与え、空間パターンとの関係を検証し、さらにシミュレーションした宅地用途、エージェントの特性、宅地の条件によって用途の細分類を行い、居住人口もしくは雇用人口を算出し、建物の形態を決定することで、地区レベルの景観シミュレーションの可能性も検討することがあげられる。さらにエージェントの宅地単位のエネルギー消費や車の利用などによって地区レベルの環境評価を試みたいと考えている。

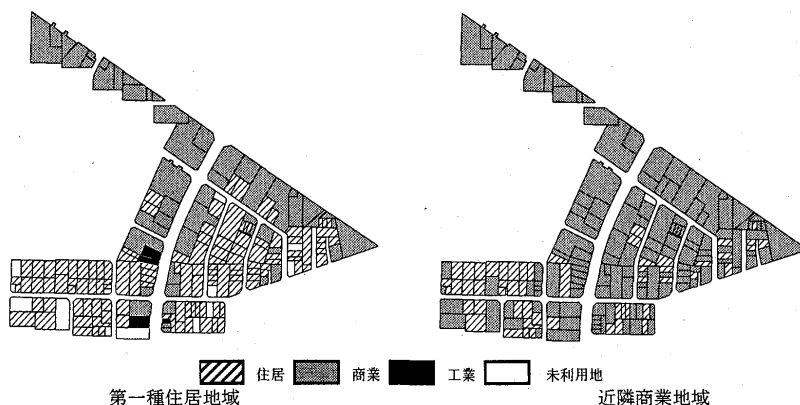


図12 シナリオの比較

シミュレーションの方法論を導入し、エージェントの意思によって初期状態量を与え、空間パターンとの関係を検証し、さらにシミュレーションした宅地用途、エージェントの特性、宅地の条件によって用途の細分類を行い、居住人口もしくは雇用人口を算出し、建物の形態を決定することで、地区レベルの景観シミュレーションの可能性も検討することがあげられる。さらにエージェントの宅地単位のエネルギー消費や車の利用などによって地区レベルの環境評価を試みたいと考えている。

謝辞：本研究は科学研究補助金基盤研究C(課題番号19560613)の補助を受けている。ここで記して感謝の意を表す。

### 注

- 注1) 滝澤らのモデルでは、経済循環という用語を用いて、セル内において土地利用の需給の変化を表している。それぞれの用途  $m$  に対する  $m$  から必要と  $m$  からの供給という経済循環があると考えられている。
- 注2) 滝澤らのモデルでは、グローバルな流入という用語を用いているが、本稿では、都市全体の影響を考慮できず、シミュレーションの対象地区の影響として地区全体の影響にした。
- 注3) 参考文献2)の84ページを参照する。
- 注4) 参考文献3)では、土地区画整理事業前後における街区画地の幾何的特性と用途地域の変容との因果関係を考察した。

### 参考文献

- 1) 川上光彦・木谷弘司・上出邦弘：土地区画整理事業施行区域における市街地の実態—金沢市における組合施行の事例報告—，都市計画学会学術研究論文集第33号，pp. 145-150, 1998.
- 2) K. M. マニルザマン・浅見泰司・岡部篤行：東京都世田谷区における画地の土地利用とその形状に関する研究，GIS—理論と応用 Vol. 2, No. 1, pp. 83-90, 1994.
- 3) 沈振江・石丸紀典：広島市段原地区における土地区画整理事業後の街区画地の幾何的特性からみた宅地用途の形成—コミュニティ住環境整備事業との合併施行による土地区画整理事業の事例的考察—，日本建築学会計画系論文集No. 536, pp. 191-198, 2000. 10.
- 4) Fulong Wu: A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region, Computers, Environment and Urban Systems, Volume 20, Issue 6, Pages 367-387, 1996.
- 5) Cláudia Maria de Almeida, M. Batty & others: Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation, Computers, Environment and Urban Systems, Volume 27, Issue 5, Pages 481-509, 2003.
- 6) Benenson, P.M. Torrens: Geosimulation Automata-based modeling of urban phenomena. Wiley, England, 2004.
- 7) Ivan Blečić, Arnaldo Cecchini, Paola Rizzi, Giuseppe A. Tronfio: Playing with Automata. An Innovative Perspective for Gaming Simulation (With CAGE - Cellular Automata General Environment), 5C-3, CUPUM'03, Sendai, Japan, May 2003.
- 8) Erickson, B. and T. Lloyd-Jones: Experiments with settlement aggregation models. Environment and planning B, 24(6), 903-928, 1997.
- 9) 渡辺公次郎・大貝彰・五十嵐誠：セルオートマトンを用いた市街地形態変化のモデル開発，日本建築学会計画系論文集，No. 533, pp. 105-112, 2000. 7.
- 10) 滝澤重志・河村廣・谷明勲：セルオートマトンとしての都市（その1）CAの応用性と土地利用パターンの形成，日本建築学会計画系論文集，No. 506, pp. 203-209, 1998. 4.
- 11) Makse, H.A., J.S. Andrade, M. Batty, S. Havlin, and H.E. Stanley: Modeling urban growth patterns with correlated percolation. Physical Review E 58(6):7054-7062, 1998.

(2007年2月9日原稿受理，2007年6月22日採用決定)