

平成 21 年 10 月 26 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18700239  
 研究課題名 (和文) フラクタルと自己相関による都市の空間解析とそれに基づく環境評価システムの構築  
 研究課題名 (英文) Spatial Analysis of Urban areas by Fractal and Spatial Autocorrelation and Evaluation System of Urban Environment Based on the Conception  
 研究代表者  
 客野 尚志 (KYAKUNO TAKASHI)  
 兵庫県立人と自然の博物館・主任研究員  
 研究者番号：80322725

研究成果の概要：本研究では日本の都市およびその周辺地域を対象に、フラクタルと空間的自己相関、エントロピーを用いた土地利用解析のシステムを開発し、それがどの程度都市の土地利用の質的な差異を表現しているのか検証した。解析に当たっては、GIS で前処理したデータを独自に開発した土地利用解析システムにて解析し、あらかじめ設定した任意の空間単位でエントロピーと空間的自己相関、フラクタルを算出できるようにした。土地利用は予めいくつかのグループに分類しておき、着目している土地利用か否かという観点から二値の土地利用分布図を作成して、それぞれの土地利用において各指標がどのような状態量を表現しているのか詳細に検証した。その結果、フラクタルに関しては土地利用の微細な変化に対して敏感に値が変化し、必ずしも日本の都市の土地利用を表現するには適切ではなかったが、空間的自己相関とエントロピーについては、都市の土地利用分布を適切に表現することが可能で、さらにこれらがそれぞれ別の状態量を示すことから、これらを組み合わせることにより、都市環境の質を定量的に表現する新しい指標として活用できる可能性があることが明らかにされた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	800,000	0	800,000
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	120,000	2,220,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：フラクタル

## 1. 研究開始当初の背景

成熟型社会の到来が指摘されるようになり、都市に求められる要件もこの数十年の間に大きく変化してきた。すなわち、それまでは経済や人口の成長を前提として、それらを適切に収容し、その上で防災性や人々の快適性、生活の効率性を高めていく都市計画が基

本的な理念とされることが多かった。しかし、近年では環境共生都市という新しい概念も生まれてきており、コンパクトシティの流れとあいまって、都市の環境に対する捉え方が大きく変わろうとしている。

従来の成長する人口や経済を適切に収容し、経済や生活の効率性、さらに防災性を高

めるという観点からは、都市の土地利用は混在しているよりもむしろ適切に分離されている方が望ましい。さもなくば、異なる機能やアクティビティが互いに干渉し、いわゆる効率性は低下すると思われるためである。このような視点からすれば、都市の環境や土地利用を評価する場合には、土地利用ごとの面積がわかればほぼ十分なことも多いといえる。しかし、先に述べたような新しい流れ、さらには生活の質ということから都市の環境や土地利用を見直すのであれば、土地利用の混在ということが新たな価値を持つ可能性がある。そういった意味では、都市空間をたんなる面積比率とは異なる視点で評価する枠組みや指標が今後ますます必要となると思われる。そして、その視点の一つが土地利用の混在度であろう。すなわち都市の環境に影響すると思われる土地利用の質を全体のボリュームだけでなく、それぞれの土地利用の空間的な散布状況まで含めて考える必要があると想定し、それらを客観的な数値として表現し、異なる地区間で比較して検証することにより、新しい都市の土地利用の評価手法を提示しようと試みたのである。そして、この混在度の指標として、都市空間における適用例は少ないものの、各種の二次元パターンの定量的表現に成功しているマルチフラクタル、さらにいくつかの成果が報告されている空間的自己相関と情報エントロピーに着目した。これらの数学的枠組みにもとづいた適切な評価指標を提案することにより、今後の環境共生都市やコンパクトシティの実現に資する新しい都市空間の方法論も提示できる可能性もあると考えた。

## 2. 研究の目的

このような背景を受けて、本研究ではフラクタル、空間的自己相関および情報エントロピーをもちいて、様々な様態を呈する都市空間の土地利用現状を定量的に表現し、これらの手法の土地利用評価指標としての可能性を探ることを目的として位置づけた。具体的には、人工衛星データと各種 GIS 情報から、土地利用分布図を作成し、それに対して先に述べた数学的手法に基づいた解析プログラムを適用することにより、様々な様態を呈する都市の部分がかどのように表現されるのかについて、様々なパターンの解析と結果の体系化により検証する。

## 3. 研究の方法

研究の大きな流れは次の通りである。

### ①人工衛星データおよび各種電子地図データを用いた土地利用分布図の作成

国土地理院発行の細密数値情報 1996 を利用し、広域の土地利用分布を抽出した。設定した土地利用区分は低層住宅地、中高層住宅

地、工業用地、商業業務用地、道路、その他で、オリジナルデータの空間解像度は 10m である。緑地の抽出については、人工衛星のデータを利用した。緑地の抽出過程に細密数値情報を用いず、衛星データを使用した理由は、細密数値情報において緑とされている部分は、法律上公園とされている部分を含むのであるが、実際には緑地がないことも多いためである。たとえば、細密数値情報上で、公園、緑地とされている場所でも、実際には野球のグラウンドや、ペープメントが敷き詰められた広場、テニスコートなど緑地ではない部分も相当に含まれているからである。また、農地とされている部分についても、裸地などを含んでいることも少なくなく、純粋に植物が生育している領域を抽出する必要があったためである。緑地の抽出に用いた衛星データとして、ASTER

GDS(0309190151410310021005)を使用した。人工衛星データを日本の標準的な空間座標系の一つである平面直角座標系に再配置することにより、空間解像度は 17.75m になり、この解像度に先の細密数値情報のデータから得られた土地利用データの解像度を合致させた。また、衛星データからの緑地の抽出過程は次の手続きによりおこなった。

- ・人工衛星の可視領域のデータと近赤外線領域のデータに対して最尤法を実施し、緑被エリアを抽出し、緑地として定義した。これにあたっては、山地や森林領域を教師エリアと設定して解析を行った。
- ・次に、緑地でない判定されたエリアから雲の部分除去した。衛星データの全バンドが高い値を示したものを雲として判定した。そして、雲と判定された部分のうち細密数値情報上で緑地とされている部分については、これを緑地として定義しなおして、最尤法で緑地として判定された部分に組み入れた。使用した衛星データは比較的晴天時のものであり、基本的に雲がかかっているのは山の部分であり、このような手続きが適切と判断した。

### ②二次元データからマルチフラクタル、空間的自己相関、エントロピーを算出するプログラムを作成

プログラミング言語を使用して、マルチフラクタルと空間的自己相関、エントロピーを算出するプログラムを作成した。空間的自己相関は、通常的相关係数を二次元に拡張したものであり、1 で高い相関、0 が無相関、-1 が逆相関を示すものである。また、近隣のセルを考慮する方法についてはいくつかバリエーションがあるが、ここでは対象セルの上下左右のものだけに着目し、斜めの位置のものは考慮しなかった。なお、具体的には次の計算式によってしめされる。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

$i, j$  : セルの番号(この研究では $1 \leq i, j \leq 256$ ),  
 $x_i$  : セル  $i$  の値(着目している土地利用に該当するなら1、そうでないなら0),  $\bar{x}$  :  $x_i$  の平均値,  $n$  : タイル中のセルの総数 (この研究では $n=256$ ),  $w_{ij}$  : 重み係数(この研究では $i$ と $j$ が互いに隣接している場合に1とし、そうでない場合0となる).

また、エントロピーは空間的な分散を示す数学的な指標であり、各々のクラスのセルが等確率で互いに隣接する場合に最大値を示し、ただ一つのクラスのセルによってしめられている場合に0となり、次の式によって示される。

$$E = - \sum_i \sum_j p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

$i, j$  : それぞれの土地利用クラスの通し番号(着目している土地利用の場合1となり、そうでない場合は0となる),  $p_i$  :  $i$ 番目の土地利用クラスがしめる確率,  $q_{ij}$  : 土地利用クラス $i$ が土地利用クラス $j$ に隣接している確率である ( $\sum_j w_{ij} = 1$  each  $i$ ).

これらの2つの指標にもとづいて様々な土地分布のパターンを数値で示したものが図1

である。例えば、チェックパターンは、空間的自己相関では -1 である一方、エントロピーは1である。いくつかの典型的な例の値も図中に表示している。

### ③近畿圏の都市部を中心に解析領域を設定し、さらに領域の中から特徴的な4つの地域を抽出。

全解析領域から、近畿の都市部を中心にした領域として図2に示した領域を抽出した。これは先のピクセルで考えると、3120ピクセル×1680ピクセルに相当する。この領域をさらに16ピクセル×16ピクセルのタイルで覆い、そのタイルを解析ユニットとして設定した。このタイルによって先の領域は縦105タイル、横195タイルで覆われた。さらに、もしタイルに国土院の細密数値情報にて、“地区外”に該当するセルが含まれる場合にはこのタイルを解析対象から除外した。その結果として、15,023タイルが解析タイルとして残された。

さらに、4つの異なるタイプの地区をこの解析領域から抽出した。それぞれ、ニュータウン地区、中心業務地区、都市のフリンジ地区、臨海混合地区である。ニュータウン地区としては千里ニュータウン、中心業務地区としては大阪市の中心地区、都市のフリンジ地区としては阪神間地区、臨海混合地区として

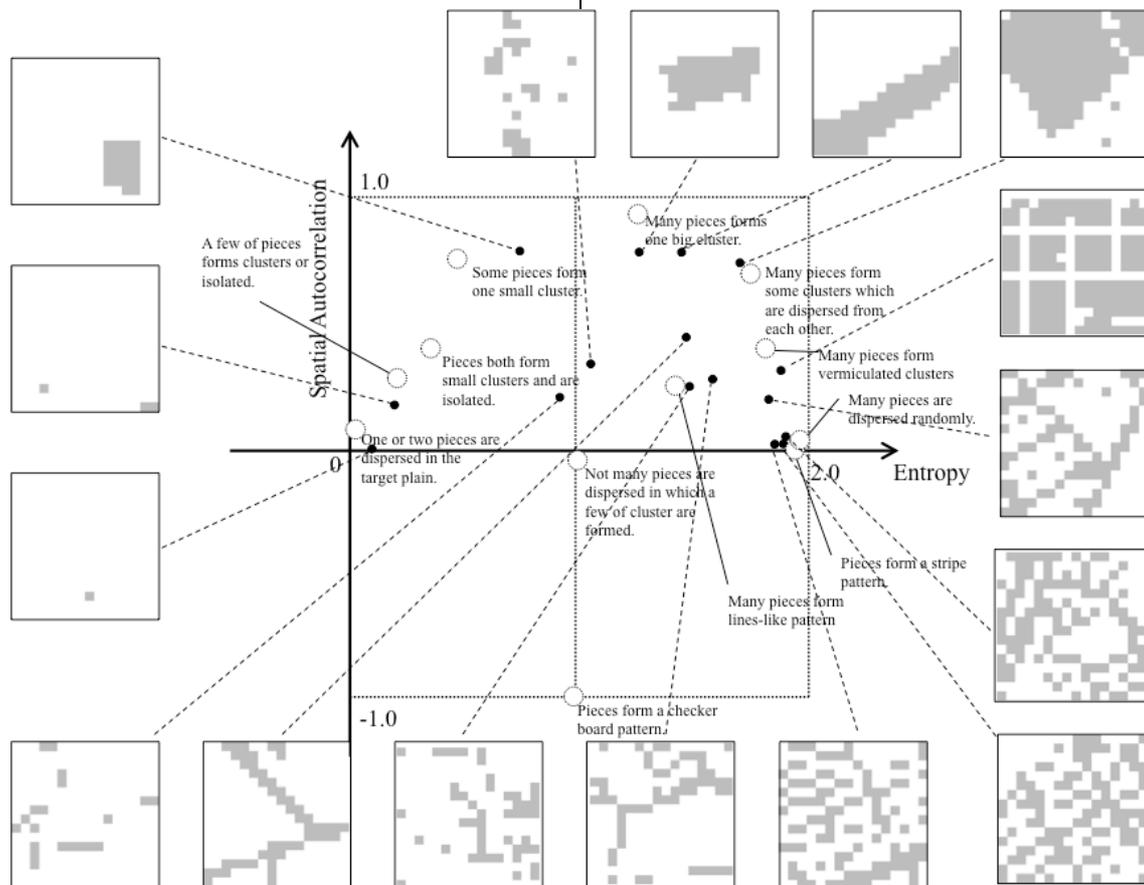


図1 : 空間的自己相関とエントロピーによる各種平面パターンの表現

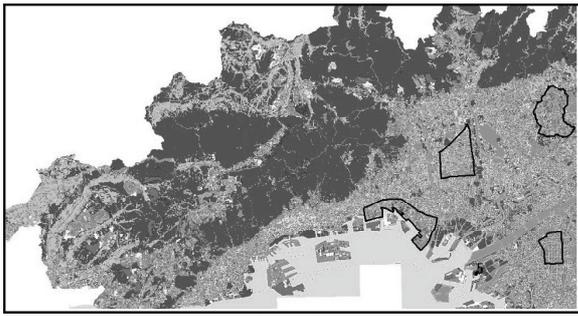


図2 解析対象エリア

黒線で囲まれた地区が、異なる性質を持つ4つの地区として設定した地区である。右上がニュータウン地区、右下が中心業務地区、左上が都市のフリンジ地区、左下が臨海混合地区である。図中の白い領域は、細密数値情報で“地区外”とされた場所である。

は、阪神間の臨海地区を選択した。詳細は図に示す通りである(図2)。

④上記のプログラムとGISの基本的解析機能を利用して、各タイルにおけるマルチフラクタル次元、エントロピー、空間的自己相関を算出。

各々の土地利用において、面積とマルチフラクタル次元、空間的自己相関とエントロピーを計算した。解析にあつては地図上の各セルについて、これが着目している土地利用に該当している場合に1として、そうでない場合は0として、着目する土地利用ごとに異なる土地利用分布図を作成して、解析を進めた。この実施にあつては先に作成したプログラムとGISの基本解析機能を使用した。

#### 4. 研究成果

①マルチフラクタルの土地利用指標としての可能性

マルチフラクタル次元は、今回対象とした地域において土地利用分布を表現するにあたっては必ずしも有効とはいえない結果がえられた。その理由は、値がわずかなセルの配置の違いに過度に敏感に反応するためである。今回の研究にあつては方法の章において述べたように、着目する土地利用クラスを替えてゆきながら、地図の各セルを該当する土地利用か否かという二値データによって表現した地図を作成し、それを解析に利用したというのもその理由の一つであると思われるが、連続値でないものにこのような手法を用いるのは困難とも考えられ、今後データを変更したり、手法等を精査することにより、本質的な原因をさぐってゆきたい。その一方で、エントロピーと空間的自己相関については望ましい結果を得ることができたので以下で紹介する。

②空間的自己相関とエントロピーの土地利用評価指標としての可能性

これらの指標については、図2で示したように、様々な平面パターンを定量的に表現するに際して有効なことが示された。実際にこれを今回の対象領域に当てはめてみたところ、良好な結果が得られ、これらの指標の可能性を指摘することができた。詳細については下記に示す通りである。

#### ○結果と考察

##### <全体的な傾向>

都市的な土地利用がしめる割合が20%を超過するタイルを都市的タイルとすると、これに該当するものが7,107タイルであった。それぞれのタイルにおいて、土地利用区分ごとにエントロピーと空間的自己相関を求め、

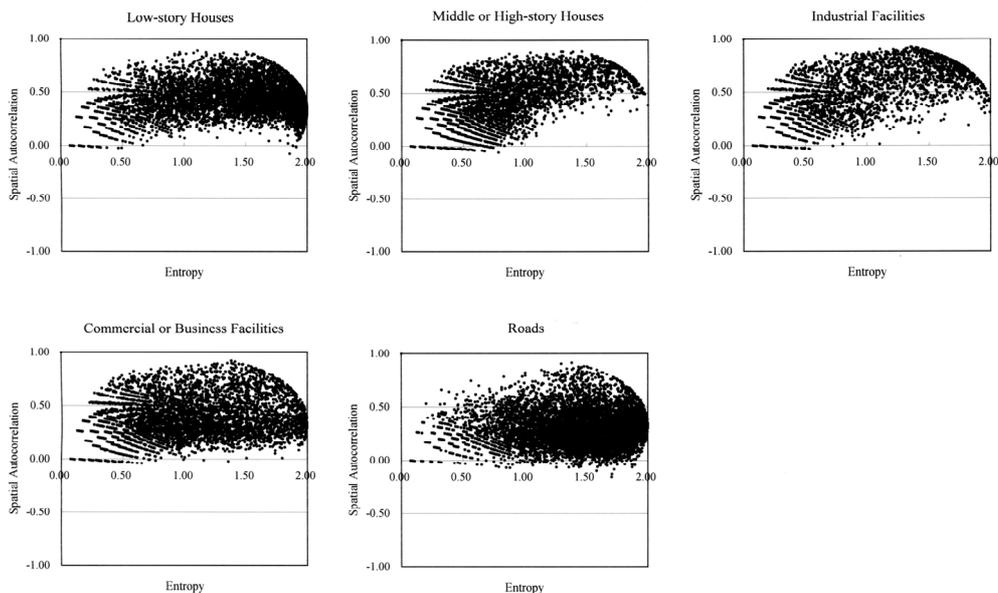


図3 各タイルにおける各々の土地利用の空間的自己相関とエントロピー

その値をこれらの二つの指標で張ったXY空間上に布置したものが、図3である。これは都市の土地利用ごとの分布特性図といえる。

図上、低層住宅地はグラフ中広く分布しているが、特に平面上の右サイドに集中していることがわかる。この場所は、図1に示した代表的なパターンが示す数値を参照すると、ランダムな分布を示すものであることがわかる。このことから、低層住宅地は、規則的な配置を含めた様々な分布パターンをとるものの、ランダムな分布パターンをとる傾向があるといえる。一方、中高層住宅地はパターンのバリエーションが、低層住宅地と比べると乏しく、ランダムに分布するパターンや層状をなすパターンは殆どなくクラスターを形成する傾向が強いことがわかる。工業用

地については、中高層住宅地と類似したパターンをとる傾向にあるといえる。商業業務施設については、低層住宅地と同様に、様々なパターンがあることがわかる。しかし、グラフ上で特定の領域に集中していないことからわかるように、これは特に特徴的なパターンを形成せず、ランダムに分布することあれば、層状を形成したり、クラスターを形成したりすることもあることがわかる。道路についても同様に様々なパターンがあることが確認される。しかし、グラフ上、右手中段に点が集中していることからわかるように、道路は層状パターンを形成することが多い。

**<地区ごとの土地利用の特徴>**

図4-1、図5-1、図6-1、図7-1は4つの異なる地区の土地利用図を示したもので、図

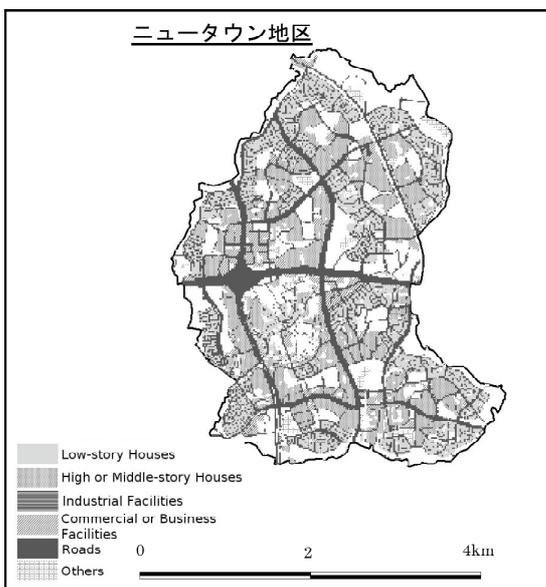


図4-1 ニュータウン地区の土地利用図

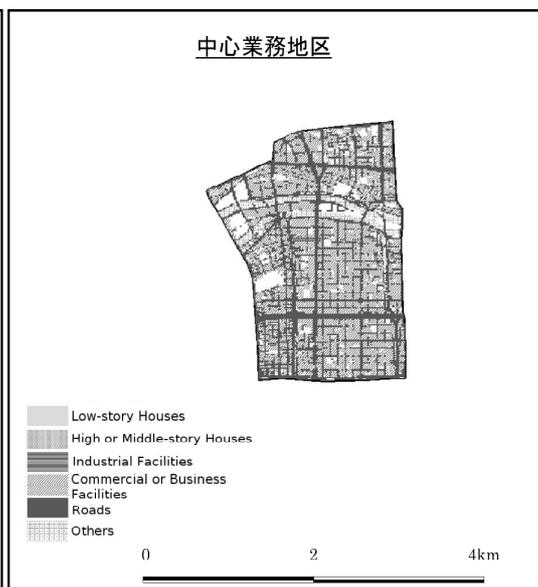


図5-1 中心業務地区の土地利用図

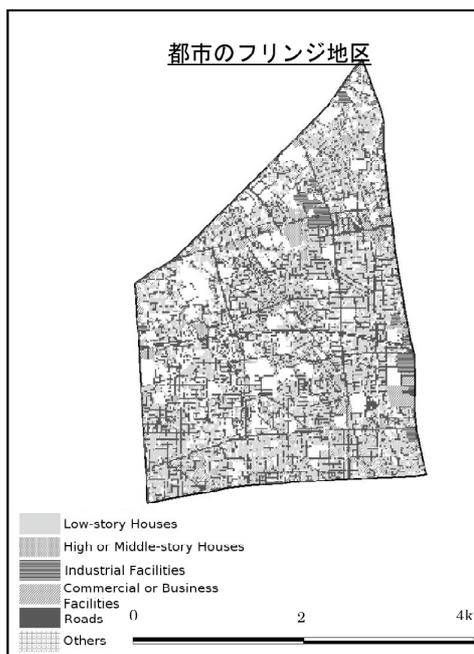


図6-1 アーバンフリンジ地区の土地利用図



図7-1 臨海混合地区の土地利用図

4-2、図 5-2、図 6-2、図 7-2 はそれぞれの領域における各タイトルの空間的自己相関とエントロピーの示す値を図上にて示したものである。それぞれの地区で5%以上の割合を占める各土地利用クラスのみがグラフ上に示されている。先に述べたように、この二つの指標は二次元の土地利用分布の状況を適切に表現する上で有効であった。実際に、異なる特徴をもつ地区ごとに各土地利用の状況は異なる傾向を示している。ニュータウン地区においては、低層住宅地が虫食い状のクラスターを形成するか、小規模なクラスターを形成しているのに対して、中高層住宅地は大規模なクラスターを形成する傾向にあることが図 1 との比較からも明らかである。道路は線形をはじめ様々なパターンを形成している。興味深いのは緑地の分布傾向である。緑地は低層住宅地と同様の分布パターンを形成しているのである。つまり、これは時には虫食い状のクラスターを形成し、時には大きなクラスターを形成している。この理由は明確で、ニュータウンにおいては、緑地が住宅地内、街路樹、各種公園内とさまざまな形態で存在し、そのためその平面的な分布パターンにおいても様々なバリエーションが存在しうるためである。その一方で、中高層住宅地は明らかにクラスターを形成する傾向にある。これはニュータウンにおいては、高層集合住宅は他のタイプの土地利用とは分離され、あらかじめ定められた場所のみ計

画されているためである。また、図 4-2 のグラフの中段左手あたりに中高層住宅を示すポイントがいくつか見られる。これは中高層住宅がいくつかのタイトルにおいては単独に存在していることを示している。その一方で、孤立し単独で存在している低層住宅は存在しないことがわかる。すなわち計画されたニュータウンではこのような形態では低層住宅地は存在しないことを示している。低層住宅地の虫食い状のクラスターは、低層住宅地を貫く細街路が存在するために引き起こされている。道路はグラフの中で様々な値を示している。一つの特徴は、グラフ中右手の点が示すように道路はいくつかのクラスターを形成するが、これは相当に幅員の大きな道路が存在していることを示している。各々の土地利用タイプは、ニュータウンではクラスターを形成する傾向にあるが、道路をのぞいた各土地利用のタイプははっきりと他の土地利用のクラスから区別することができる。

中心業務地区においては、商業業務施設が虫食い状のクラスターを形成する傾向にあることが、図 5-2 と土地利用図からよみとることができる。商業業務施設は通常、道路によって寸断されるまでは、建物は連なって建築されており、その結果大きなクラスターを形成する傾向にある。道路は商業業務施設と類似した分布パターンを示す傾向にあり、虫食い状のクラスターを形成するといえる。ニュータウンとは異なり、幅員が狭小で連なっ

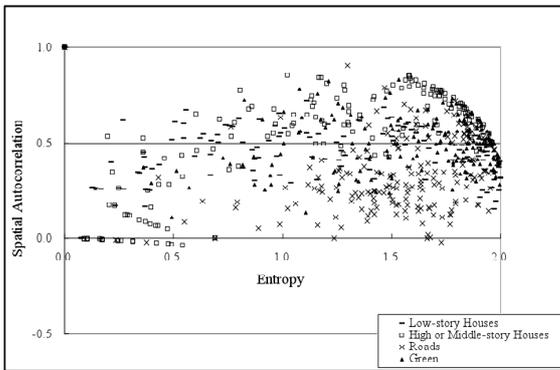


図 4-2 ニュータウン地区における各土地利用ごとの空間的自己相関とエントロピー

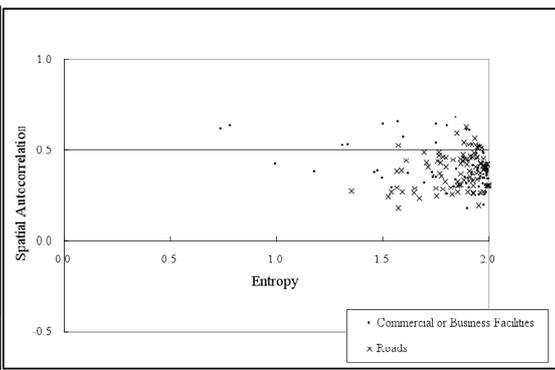


図 5-2 中心業務地区における各土地利用ごとの空間的自己相関とエントロピー

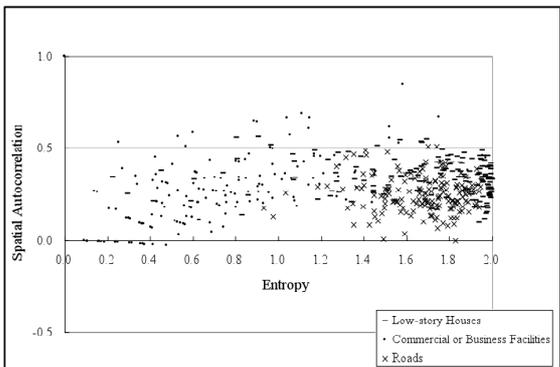


図 6-2 都市のフリンジ地区における各土地利用ごとの空間的自己相関とエントロピー

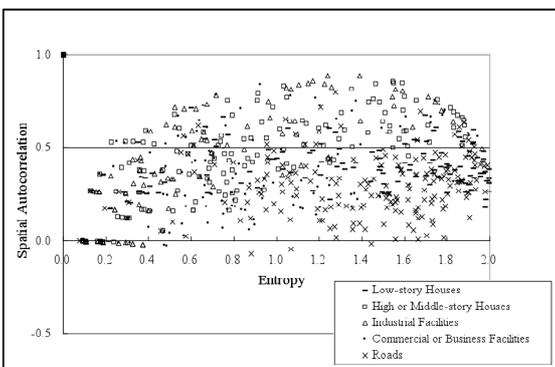


図 7-2 臨海混合地区における各土地利用ごとの空間的自己相関とエントロピー

た道路、すなわちグラフ上で $x=1.8$ から $2.0$ で $y=0$ 付近のポイントは見られない。このことはこれらの二つの土地利用クラスは、ミクロな視点では、多くのクラスターを形成しており、そしてこれらのクラスターがマクロな視点で混在していることを示している。そしてこの地区においては、道路は通常の住宅地域よりも幅員となる傾向にあり、道路の面積が占める割合もそれゆえに高くなる。要約すると中心業務地区では、二つの主たる土地利用のクラスのみがあり、これらがミクロな視点では純化されているが、マクロな視点では混在していると結論づけることができる。

都市のフリンジ地区では、図 6-2 で示されているように低層住宅地を示すポイントが図中広く分散しており、このことから様々な分布パターンを低層住宅地が示していると考えられる。すなわち、虫食い状のクラスターを形成することもあるし、直線状となることもある。また孤立して存在していることもある。この地区は、典型的な日本の都市郊外部の様相を呈しており、一部の地区は慎重に計画された開発が進められた地区があり、その一方で殆どの部分はトータルな計画のないままスプロールに飲み込まれるように開発がすすんだ部分である。元の土地利用や開発が行われた時期は異なっており、このことにより一貫しない土地利用パターンが発生したと考えられる。この傾向は、道路において最も顕著に現れている。概して幅員の狭く連なった道路が他のタイプの土地利用を圧倒している。かつての農村地域の道路パターンが現在においても、なお残されていると考えられる。また、商業業務施設がクラスターを形成せずに、線状のパターンを形成している。これは一つ一つの敷地の規模が概して小さく、道路幅員が狭溢であるためである。そのために、建築基準法により大規模な建物をこの地区に建設することは困難となり、それゆえに必然的に商業業務施設は道路に沿って建設され、線状を形成すると思われる。臨海混合部においては、都市のフリンジ地区と同様に各々の土地利用が様々な分布パターンを示し、特に低層住宅地と商業業務施設が多様なパターンを形成している。これらは線状であったり、クラスターを形成したり、単独で存在していたりしている。一方で、中高層住宅地は大きなクラスターを形成するか、小さなクラスターを形成するかのいずれかであり、この傾向は工業用地と類似している。そのサイズは敷地のサイズに依存している。また、道路も様々なパターンを示しており、狭溢なものが連続していることもあれば、広幅員のものもある。広幅員の道路の交差点は一種のクラスターと見なすことも可能であり、これを示す点が分布図の中にもよみとることができる。

#### <総括>

これらの二つの指標を使用することにより、興味深い結論を得ることができる。これらの二つの指標により張られた平面は様々な土地利用の混在状況を表現している。例えば、大きなクラスターと虫食いの巨大クラスターは空間的自己相関を参照することにより互いに区別することができる。これら二つの指標を用いることにより、ニュータウンの低層住宅地と中高層住宅地の土地利用パターンの違いをよく表現することが可能となる。なぜなら一つのクラスター状の状態と、多数のクラスターを形成している状態を、空間的自己相関を参照することによりうまく区別することができるからである。その一方で、エントロピーに着目することにより、虫食いクラスター状の分布は、小クラスターや線状パターンをうまく区別することができる。中心業務地区と都市のフリンジ地区の道路パターンの違いはエントロピーを用いることによりよく表現することが可能である。ニュータウンにおいては、低層住宅地は虫食いクラスターを形成する傾向にあるが、臨海混合部においてはときに孤立したり、小さなクラスターを形成していることが明らかにされたが、この差異を表現するにあたっては、エントロピーが重要な役割を果たしている。

結論として、都市の土地利用を理解するために、エントロピーと空間的自己相関の両方を適用することはどちらか片方のみを使用することと比べて、より効果的といえる。これらの両方の指標を使用することは、都市の土地利用の形態学の分野において新しい方法論となり得るといえる。エントロピーは多様性と複雑さに狙いを定めており、空間的自己相関は局所的な空間的な相似性に焦点をあてたものである。両者を使用することにより、多様性と類似性に基づいて都市の土地利用の状況を把握することが可能となる。

この研究にはいくつかの解決すべき問題点も残されている。まず、互いに異なる状況を呈する土地利用パターンが両指標において極めて類似する数字を示すことがあることである。この研究ではピクセルサイズの制限から、基本的な解析のための最小セルサイズを $17.75\text{m}$ とし、解析のためのタイルを $16$ ピクセル $\times 16$ ピクセルと設定したが、本研究の結果はこれらの基本的な属性を変更することにより、変化することもありえる。また、隣接するグリッドを考慮する方法によっても結果は変わりうる。この研究では、コンピューターの計算時間を短縮するねらいから、斜めのセルについては、隣接とみなしていなかったが、これを考慮すると結果もかわる可能性がある。さらに、座標系としてもユークリッド座標系を使用した。六角形や三角形に基づいた座標系で土地利用を分割する方法もあり、それによって結果も変わると考えられる。いずれにせよ、この研究は都市の土

土地利用パターンを定量的に表現する研究の第一歩であり、本研究の方法論によりいくつかのパターンがうまく表現できた事実をふまえて、これらの問題に関する議論を深めて様々な指標の可能性について探る必要があるといえる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Takashi KYAKUNO, Quantitative Representation of Distribution and Mixture of Urban Land Use Through Spatial Autocorrelation and Information Entropy, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 7(2), 427-434, 2008, 査読有り

〔学会発表〕(計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

客野 尚志 (KYAKUNO TAKASHI)

兵庫県立人と自然の博物館・自然・環境マネジメント研究部・主任研究員

研究者番号：80322725