

高解像度衛星データの利用を前提とした 建物の密集度に関する分析手法の開発

熊谷 樹一郎

正会員 博(工) 摂南大学講師 工学部土木工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

既存の市街地において建物が密集しており、かつ、前面道路の幅員が十分広くない地域については防災面や施設整備の面、住環境の面などから建てづまりの問題を解消する必要がある。この問題に対しては広い範囲から注目すべき地域を選定していくことが大切となるが、建物の密集度を広域的に比較・分析するには地理情報の整備に多大な時間と労力が必要なものもあり、有効な対処法が確立されていなかった。そこで、本研究では広域性といった特徴のある高解像度衛星データを取り上げ、観測された建物の情報の利用に着目した上で建物の密集状態を自動的に定量化する分析手法を開発した。開発手法の適用から、隣り合う建物間の距離の違いによって建物の密集パターンを領域単位で類型化できることが示唆された。

Key Words : building density, entropy, high-resolution satellite data

1. はじめに

既存の市街地には住宅などの建物の密集している箇所が多く見受けられる。なかでも、隣接する道路の幅員に十分な広さがない地域については、火災時の延焼を防止する機能が損なわれていることや消防活動を妨げる要因となることから、防災面対策が必要になる^{1), 2)}。また、このような地域では都市施設や住環境の面でも問題が生じやすいことが指摘されている^{3), 4)}。

以上のような問題に対して、それぞれの市区町村では担当者が現地視察を繰り返し、建物間の距離が著しく短く、かつ、不良木造家屋などの多い地域を把握している。その結果、地域・地区制限を厳しく設定することによって建ぺい率や容積率といった敷地面積に対する指標や前面道路の幅員を決定し、建てづまりの状態を改善していくことになる¹⁾。つまり、建物の密集している地域を特定するには、まず隣接する建物との距離を把握することが必要となる。領域内での建物の占める面積が比較的小さい状態であっても、建物の配置に偏りがあり、隣接する距離の著しく短い箇所が多ければ、防災の面から見ても望ましい状態とは言えない。

その一方で、今後の地区整備などを推し進めていくには、広い範囲から地域ごとの特徴を比較した上で計画実施箇所などを検討していく姿勢が大切にな

ってくる。例えば、計画的に整備された既存の市街地を核として、防災上の対策が必要な非計画的市街地を囲い込むように計画実施地域を誘導するといった具体的な方策が指摘されている⁴⁾。地域単位での整備をより効果的なものとするためには広域からの視点を忘れてはならないが、実際には現地調査などを広い範囲で実施していくには労力が多く、特に、個々の建物の配置を考慮した上で建物群の密集している状態を客観的に比較・分析できる手法はこれまでほとんど見られなかった。建物が密集した状態を定量的に、広域にわたって検出することのできる手法の開発が望まれている。

一方、既往の研究によると、航空機を用いた空中ステレオ映像(航空写真)では得られない広域性、同時性、瞬時性といった特徴を持つ衛星マルチスペクトルデータ(以降、衛星データという)が土地分級や土地被覆分類といった地表面形態の分類に利用され、多くの効果を上げている^{5), 6)}。しかも、最近では空間分解能が1 m前後の高解像度衛星データが一般配布されるようになり、都市内のさまざまな現象解明に適用される機運が見られるようになってきた⁷⁾。建物に関する研究としても、ステレオペアのデータから得られる高さ情報に着目した上で、建物の自動抽出を試みるアプローチが進められている^{8), 9)}。衛星データの多様化と高分解能化は急速に進展していく傾向にあり、新しい利用分野の開拓が模索されている。

本研究は、広い範囲を対象として建物の密集した状況を定量的に把握する手法を開発することを最終目的に、高解像度衛星データの導入を試みたものである。具体的には衛星データの画像特徴を背景に、エントロピーの考え方を取り入れて密集する建物の配置状況を表すことによって、従来は時間と労力を要していた現地調査法¹⁰⁾の大幅な効率化に寄与しようとするものである。土地区画整理事業や市街地再開発事業などの候補地選定の際の意志決定にとって貴重な支援情報となることが期待されている。

2. 本研究の特徴と範囲

(1) 建物の密集度

本研究では、ある領域内における建物群の配置の状態を「建物の密集度」と呼ぶ。建物の密集度は施設の整備や防災対策、不良住宅の改良など、既成市街地の再開発の問題を論ずる際の重要なキーワードになっている。

建物の密集度に関連する指標としては建ぺい率などがあり、地理情報として整備されたものの利用から用途地域指定の効果などを詳細に分析できることが明らかになっている¹¹⁾。しかし、複数の市区町村を含むような広範囲での比較になるとデータ量が膨大になるとともに、比較に耐えうる品質のデータを準備しなければならず、地理情報の整備に多大な労力が必要となる。さらに、建物の密集度を考えていくには敷地面積と建築面積との比較に加えて道路の幅員ごとの総延長距離も取り入れる必要があり、問題はより複雑になる。

一方、建物の密集度を考えていく上でまず第一に注目すべき点は、実際に建物間の距離がどの程度あるか、といった点である。ある2つの地域において同じ建築面積の建物群があっても、個々の建物間の距離が著しく短い箇所が多く、偏りがあるケースでは建てづまりによるさまざまな影響が生じてくる。本研究では、建物の密集度について、まず広い範囲から注目すべき地域を抽出するといったアプローチをとることとし、建物の密集度を隣り合う建物間の距離から計算・評価することとした。

(2) 建物の密集度の定量化と高解像度衛星データの導入

「建物の密集度」を建物間の距離から評価する場合、定量的に分析していくには地域内の建物の一つ一つに対して隣接する建物との最短距離や最長距離、平均距離といった値を計測する方法が考えられる。

しかし、実際問題として複数の市町村を含むような広い範囲で個々の距離を計測していくには多大な労力と時間がかかるため、現実的ではない。

そこで本研究では、まず対象とするデータとして高解像度衛星データを前提とした。高解像度衛星データは従来までの衛星データと比較して高い空間分解能で観測されており、建物の輪郭に至るまでの詳細な情報が広い範囲で均質に観測されている。さらに、高解像度衛星データから抽出された隣り合う建物間の水平距離を対象として、建物の密集度を自動的に計算する分析手法を開発する。敷地内でのスペースや道路幅員を含めた上で建物の密集度を定量化することになり、広域での地域間の比較に寄与できるものである。

(3) 本研究の範囲

本研究は、前述したように、高解像度衛星データの網羅する広い範囲の都市内の建物の配置状態（面的な広がり）を対象としたものであり、建物自体の階数や高さに関する情報は対象としていない。建物の構造、延べ床面積などを対象とした詳細な分析・評価については、本研究で開発提案する分析手法の適用によって広い領域から抽出・選択された地域ごとに行われるものと考え、本研究の対象外とした。

3. 分析手法の開発

(1) 対象データの特徴

本研究で対象とするデータは、衛星データなどで使われているラスタ型データのデータである。対象データは画素といった単位で構成されており、2.5千分の1地形図の建物部分のみが抽出されたもののように、建物と認識された画素とそれ以外と認識された画素といった2つの情報に分類されているものとする。

本来、高解像度衛星データから得られた建物の情報を検討の対象とすべきであるが、ステレオペアのデータがまだ公開されていないことなどから、本研究では上記のようなシミュレーションデータを準備した。

なお、本研究では高解像度衛星データの利用を前提としているため、一画素あたりの地上での実際の大きさを空間分解能と呼ぶこととする。したがって、建物間の水平距離が空間分解能を下回ると、データ上では隣り合う複数の建物が連続した一つの建物として表現される。衛星データを用いる場合の一つの限界である。

(2) エントロピーの導入

エントロピーとは、熱力学や統計力学、情報工学などで用いられてきた考え方であり、無秩序さや不確定さを表す物理量である¹²⁾。応用例も多く、土地利用予測モデルで予測されたゾーン別の用途面積を周辺の分布に一致させる計算法に導入されるケースや画像処理の分野でテクスチャ特徴量の計算などに取り入れられているものなどが見られる^{13) - 15)}。

本研究では、建物の配置を表す指標として、このエントロピーの考え方を導入し、建物の密集度の定量的な分析を行うことを試みた。

(3) 建物を対象としたエントロピーの計算

衛星データのように画素単位で表現された建物の分布データに対してエントロピーを計算していく。本研究では建物の配置を取り上げ、画像上に見られる建物配置のパターンを対象とする。したがって、ここで用いるエントロピーは画像上に表れたパターンを定量化する役割をなす。これをパターンのエントロピーと呼び、詳細に見れば異なった類似の形が多数あるが、巨視的には同じような形である場合のパターンのばらつく度合を定量化する際に用いられる¹⁶⁾。本研究では、後述するようにデータの空間分解能ごとの検討を進めるが、これは建物の密集タイプごとのパターンが空間分解能の変化に伴ってどのように表れるか、といった点について調査・検討するものである。ここでは、情報のエントロピーがミクロ系1個あたりのエントロピーと等価であることを利用した二値化画像上での計算式^{16), 17)}を応用している。具体的には、エントロピー (Entropy: E) をスターリングの公式から次のように計算することとした。

$$E = (1/N) \cdot \log \{N! / (N_1! \cdot N_2! \cdot \dots \cdot N_k!)\} \\ = - \sum_j f_j \log f_j \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

ただし、 j は建物として認識された画素が連なることで独立に形成する面(画素群)の識別番号を示し、 N_j はその面を構成する画素数、 $N = N_1 + N_2 + \dots + N_k$ 、 $f_j = N_j / N$ である。

例えば、ある2つの領域に建物と認識された画素が同じ数だけある場合、一つ一つの面を構成する画素数が多いケースでは、全体での独立した面の数は減少し、エントロピーの値は小さくなる。一つの面を構成する画素数が小さいケースでは面の数が多くなり、エントロピーの値は大きくなる。建物の密集度について見ると、密集する度合いが高くなれば建物間の水平距離が短くなることから、データ上では

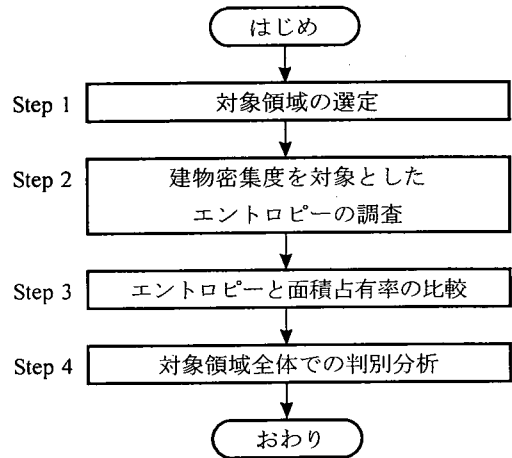


図-1 本研究の流れ

少ない画素数で独立した面を形成することが難しくなり、エントロピーの値にも変化の現れることが期待できる。

一般に、ある状態を放置すればエントロピーの値は最大値の状態へ移行し、平衡状態になるとうとする。最大化までの方向性を調査するためにエントロピーを使用することが多いが、本研究では、画像上に表れた建物配置のパターンを定量化する手段としてエントロピーを用いる。空間分解能の違いによって画像上に表れた影響を吟味し、建物の密集タイプごとの類型化が可能であるか否かについて検討していく。空間分解能ごとの建物配置のパターンを定量化し、密集タイプごとに独立した情報が維持される範囲を明確にできれば、扱うデータ量の縮減化に寄与できる可能性があり、より広い範囲での分析の可能性が示される。

4. 研究の流れ

本研究の流れは図-1のとおりである。

(1) 対象領域の選定 (Step 1)

対象領域として、大阪府寝屋川市周辺地域(約4 km × 4 km)を選定した。領域内では高度経済成長期に人口が7~8倍程度に膨れ上がっており、急激に都市化の進んだ地域である。同時に、工業地帯の進出も活発であったことから、建物の種類や密集状態についてもさまざまなものが混在している。住宅地一つをとっても周辺道路の幅員が4 m未満からなる密集した住宅地やニュータウン的な開発によって



図-2 エントロピーの挙動調査に基準とした領域(上段)と空間分解能 1 m 相当のデータ(下段)

整備された住宅地などが分布している状況にある。

(2) 建物密集度に対するエントロピーの調査(Step 2)

建物の密集度を対象とした場合に、種々の条件の下で式(1)で定義したエントロピーの値がどのような挙動を示すのか、といった点について明らかにしておく必要がある。そこで、本研究では現地調査と都市計画図・航空写真の判読から図-2に示すような4つの代表的な建物密集タイプの地域を基準領域として選定し、得られたデータを対象に①空間分解能の違い、②エントロピーの計算条件、③建物の輪郭線による影響、といった項目について計算されるエントロピーの値を比較・検討した。なお、図-2のニュータウン型の一般住宅地(Residential Area (New town type), 以降, RAN)とは、計画的に整備・再整備された住宅地区になる。一般住宅地(Residential Area, 以降, RA)は、一戸建て住宅が分布している地区である。また、中高層住宅地(Middle-high Resident's Area, 以降, MRA)はいわゆる団地やマンションの等の建ち並ぶ地域である。工業地(Industrial Area, 以降, IA)は内陸に建設された工業団地を示す。それぞれの領域の大きさは、再開発事業の一般的な規模などを勘案して200 m × 200 mとしている。

a) 空間分解能の違い

エントロピーの計算は、衛星データの空間分解能を示す指標の一つである画素単位で実施される。画素の地上での大きさが変化すると、データ上での建物同士の間隔の現れ方が変わってくる。したがって、

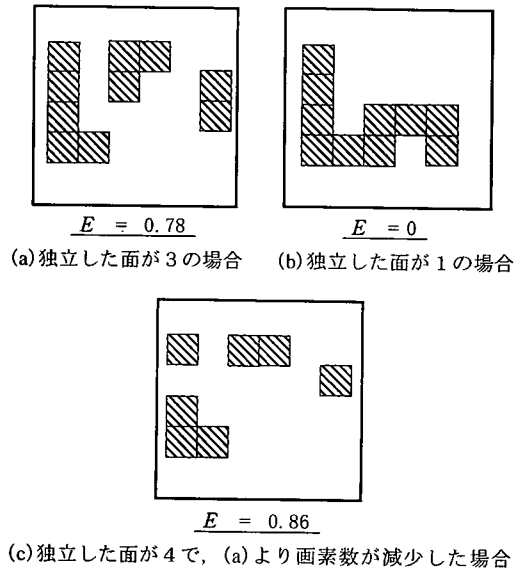
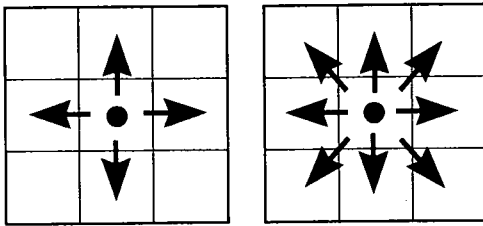


図-3 エントロピーの計算例

建物として識別された画素が独立の面を形成する条件が異なってくることから、エントロピーの値も変化することが予想される。例えば、図-3の(a)と(b)のように同じ分解能で、かつ、建物を表す画素数が等しい場合であっても独立した面の数が増えるとエントロピーの値は大きくなる。(c)は式(1)の全体の画素数 N が減少した例であるが、独立した面数が増えているためにエントロピーは増大していることがわかる。

また、広域での分析においてデータの空間分解能



ケース A: 4方向

ケース B: 8方向

図-4 エントロピーの計算条件

が高いとデータ量が膨大となり、多大なコンピュータ資源が必要とされる面がある。実際の分析で最も適した空間分解能はどの程度であるか、といった点を明らかにできれば、少ないデータ量での提案手法の効率的な適用が可能となる。

そこで、本研究では高解像度衛星クラスの空間分解能 1 m と、従来より広く利用されてきた SPOT/HRV データの空間分解能 10 m に着目した。二つの空間分解能の間に適した空間分解能が見つければ、高解像度衛星データなどの利用に一つの指針を示すことになる。実際には空間分解能 1 m のデータを基に 1m ~ 10 m の間を 1 m ピッチとした空間分解能に相当する10ケースのデータを整備した上で、建物の密集度に対する感度について検討することとした。

空間分解能 1 m のデータを基準とした場合、その他の空間分解能のデータを作成するには原点の取り方に複数のケースが発生する。原点の取り方によっては個々の建物について画素単位での現れ方が異なってくる。その一方で、本研究では複数の建物の集まり方(建物の密集度)を対象としている。そこで、ここでは複数の建物の集まり全体を一つの群として扱うこととし、空間分解能ごとの比較のために図-2の対象地域の中心点を群の中心点(共通の原点)として固定した。さらに、設定した中心原点から空間分解能ごとに最も100 m に近くなる画素数だけ東西南北方向に対象とする枠を広げた上で領域を確定した。したがって、中心からの距離と比較すると、大きいケースで +2 m (空間分解能 6 m の場合)、小さいケース -4 m (空間分解能 8 m の場合)といった領域サイズの差がある。

低分解能データへの処理としては、連続した画像濃度曲面を持つデータを対象とした場合に得られるMTFに着目し、画素値のフーリエ変換から任意のサンプリング間隔で内挿する方法なども提案されている¹⁸⁾。本研究では衛星データから得られた建物の抽出画像といった二次生成情報を有効に、かつ、効率よく利用することを前提としており、画像濃度曲面からの分析が難しい「建物の有り・無し」とい

った二値のデータを対象としている。そこで、空間分解能 1 m のデータを基準として 2 m から 10 m の空間分解能相当のデータをシミュレーション用のデータとして作成し、建物の密集タイプに関する分析において最も適した空間分解能を調査することによって、分析の効率化やコンピュータ資源の縮減が可能であるか否かについて検討した。

建物の有無の判断基準としては次のように考えた。通常、一画素の観測はその範囲内の情報を積分して得られ、一つの数値として表現される。建物の有・無を表す二値化画像を考えると、どちらかの情報が一画素の支配要因となる。そこで、画素を支配する基準をその範囲の50%を越えた側とした。つまり、一画素の範囲内において図-2で建物と認識された領域が50%以上存在する場合に建物があるものとする、といった標準的で最も基本的な考え方で内挿した。

また、本研究で提案する分析手法は衛星データのような画素で構成されたラスタ型データを対象としたものであるが、GIS (Geographical Information System) で利用されること多いベクター型のデータについてもラスタ型に変換することで適用可能となる。ベクター・ラスタ変換における空間分解能の設定に対しても、本検討の結果が寄与できることになる。

b) エントロピーの計算条件

エントロピーの計算には、「建物として識別されている画素が独立に形成する面」と判定される範囲を明確にすることが必要である。つまり、近隣画素に建物と識別された画素があるかないか、といった点を判定する処理が実施される。本研究のようなラスタ型データを用いる場合、近隣画素の検索に斜め方向も考慮するか否かといった問題が生じる。画素中心からの距離を考えると、上下左右と斜め方向とは区別して検討する必要がある¹⁹⁾。この問題には、画素の実際の大きさ(空間分解能)の問題も関連してくるため、本研究では近隣画素条件として図-4に示すようなケースを設定した。ケース A では上下左右の4方向で検索し、建物と識別された画素があるか否かを判定し、隣接していれば同一面を構成する画素群とする。同様にケース B では判定の対象とする画素を斜め方向も考慮した8方向で検索していくことになる。

c) 建物の輪郭線による影響

本研究で使用するデータは格子状に配列された画素で構成されている。格子の方向に対して斜め方向に建てられた建物の輪郭線はデータ上では階段状に表現される。つまり、空間分解能が荒くなるに連れて建物の輪郭線は大きく変化すると想定される。図

空間分解能が□から□に変化した場合

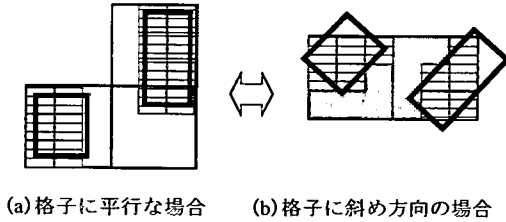


図-5 建物の輪郭線と空間分解能

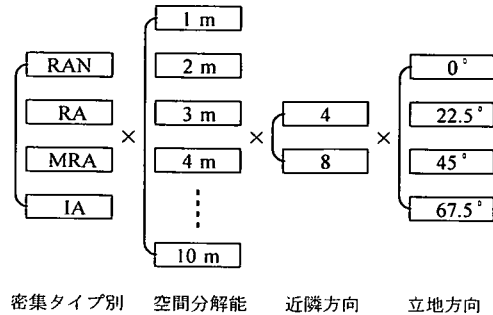


図-6 検討ケース

ー5に例を挙げる。(a)のように画素の形成する格子に平行な場合には空間分解能が粗くなっても斜め方向のみで隣接している。その一方で、建物の向きが変わると(b)のように横長の同一建物として識別される。すなわち、建物間の水平距離は輪郭線との距離で判断されるため、空間分解能ごとにデータ上に現れる輪郭線の影響を検討しておく必要がある。そこで、本研究では選定したそれぞれの建物のデータを対象に、16方位の方向に回転させることから仮想的にさまざまな方向で建てられた建物群を作りだし、エントロピーの値に現れる影響を検討した。ただし、90°および180°回転させたデータについては、画素の配列する格子の方向に一致するため建物輪郭線の現れ方が等しくなることに注目し、実際の検討では0°、22.5°、45°および67.5°の4ケースを検討している。

本研究で実施した検討ケースをまとめると図-6のようになる。一つの建物密集タイプにつき80とおりのデータが得られることになる。

(3) エントロピーと面積占有率の比較(Step 3)

建物密集度との関連性が高い他の指標としては、領域内における建物の占める面積を表した面積占有率(Areal ratio: A)が挙げられる。ある領域内に建物が一様に密集して建てられていれば面積占有率は高くなる。その一方で、面積占有率がある程度低くなれば、図-7に示したように建物の配置にもさま

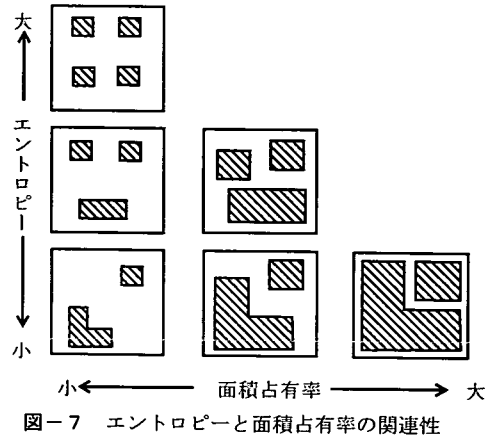


図-7 エントロピーと面積占有率の関連性

ざまなパターンが生じる余地ができ、エントロピーの値も変動することが推測される。同様に、同じような建物配置のパターンであっても面積占有率が異なると建物の密集タイプが変わってくる可能性もある。そこで、エントロピーと面積占有率の関連性を分析し、建物の密集タイプを広い範囲から類型化する際に有効であるか否かについて検討した。本研究で対象とするデータを用いた場合に面積占有率は次のように計算される。

$$A = (N / NA) \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

ここで、 NA は領域全体の画素数、 N は建物として認識された総画素数である。

本研究では、式(1)および式(2)で表された二つの計算をウィンドウ処理に適用し、対象領域全体にわたってエントロピーと面積占有率を計算する。さらに、得られた結果を基に面積占有率とエントロピーを2軸とした散布図を作成し、二つの指標の相関関係について検討する。

(4) 対象領域全体での判別分析(Step 4)

広い範囲から建物の密集度を比較していくには、まず建物密集タイプごとに類型化された出力結果から領域全体での全容を把握し、注目すべき箇所を絞り込んでいくといった手順が効率的である。そこで、本研究では領域全体から求められた面積占有率とエントロピーの値を対象に判別分析を実施し、建物密集タイプごとのグループ化を試みる。具体的には、Step 2 で用いた基準領域内での2変量の平均値、分散、共分散といった統計量を基に、対象領域全体を建物密集タイプごとに類型化していく。

判別分析については、尤度関数などの確率密度関数を使用することも考えられる。基準となるデータ

について基準クラスごとに分布状態を吟味し、確率密度関数を利用する手順も考えられるが、処理が煩雑であるとともに、利用条件に設定する基準クラスの問題や選定した基準データの問題までが関係してくる。そこで、本研究では検討の第一段階として基準データの平均値と分布の広がり を考慮したマハラノビスの距離を判別の基準として採用した。マハラノビスの距離 (D) は次のように計算される。

$$D^2 = X' B X \quad (3)$$

ここで、 X はエントロピーと面積占有率の平均値からの差分ベクトル、 B はエントロピーと面積占有率の分散共分散行列、 t は転置を表す。

また、得られた結果に対する判別精度については、判別分析に使用する基準領域の選定方法や判別するクラス (建物密集タイプ) の設定方法などの問題が複雑に影響してくる。さらに、判別精度そのものの定義も議論されている面もあることから、本研究では検討の範囲に含めず、今後の課題とした。

5. 検討結果

(1) エントロピーの挙動調査の結果

図-8 に諸条件の下での建物の密集度に対するエントロピーの挙動を示す。縦軸をエントロピー、横軸を空間分解能としたものであり、全ての建物密集タイプでのエントロピーの計算結果を近隣画素条件別にまとめている。

ここで、ある空間分解能でエントロピーの値がばらついているケースを考える。図-5 で表したように、建物の方向が変化することによってデータ上に表された建物輪郭線が階段状に表現される。空間分解能によっては複数の建物が同一のものと認識され、式(1)の k と N_i から N_k までの構成が変化し、結果としてエントロピーの値が変化する。つまり、建物の密集度は不変であるものの、その方向性によってパターンが異なると認識されることになり、建物の密集度を定量化する上であまり適していないことになる。そこで、分析に適した空間分解能を、階段状で表された建物輪郭線の影響が小さく、建物密集タイプがエントロピーの値によって互いに分離できているか否か、といった面から検討する。図-8 では、建物の輪郭線によるエントロピーの値の変化幅を同一空間分解能でのデータの分散として表す。具体的には、データの回転角ごとに計算されたエントロピーの値から各空間分解能での平均値を求めた

上でプロットするとともに、データの散らばりを標準偏差 $\times 2$ の幅として記号「 \pm 」で表している。

ここでは、得られた分析結果をエントロピーの計算条件 (近隣画素条件) ごとに整理する。

a) 近隣画素条件：4方向

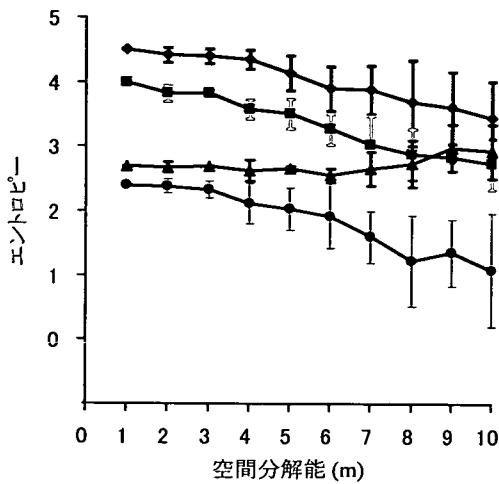
図-8 (a) を見ると、MRA を除いて全ての建物密集タイプで空間分解能が大きくなるに連れて徐々にエントロピーの値が小さくなるとともに、データのばらつきが大きくなっていることがわかる。この傾向がどのような現象に起因しているかを確認するために、RA の空間分解能 1 m と空間分解能 2 m の建物データ (ともに回転角 0°) を示した (図-9)。

空間分解能が大きくなると、図中の丸で囲った場所のように隣り合う建物との水平距離が短い箇所では画素が重なる傾向にある。つまり、空間分解能が高かったケースでは建物ごとに独立した画素群と認識されたものが融合したようになり、同一面を構成する画素群として判定されることになる。したがって、式(1)に示したエントロピーの計算式では k の値が減少することになり、エントロピーの値は小さくなっていく。一般にエントロピーの計算式では対象となる画素数 N が減少するとエントロピーの値も小さくなる。本研究で応用した式(1)では一画素あたりの値を求めており、空間分解能の条件が変化したときにエントロピーの値が変化するということは、独立した画素群の個数 k が減少することを示す。建物間の距離がその空間分解能近辺であれば、空間分解能の上昇とともに図-9 のような独立面の融合が進む。したがって、エントロピーの減少する場合には建物間の距離がその空間分解能近辺といった箇所が領域内に多く存在することを示していることがわかる。

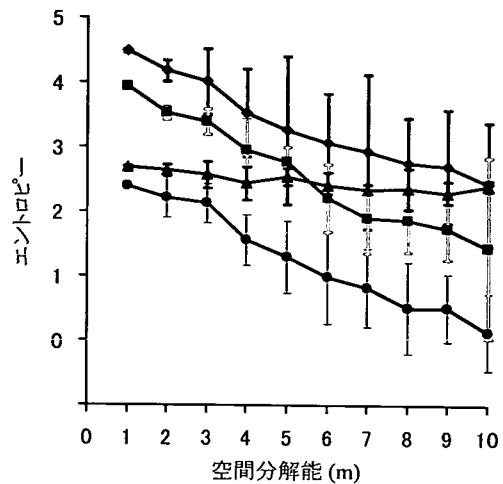
以上の点から図-8 (a) を見ると、RAN, MRA および IA については空間分解能 1 m ~ 3 m まではほとんど変化がない。これは、建物間の距離に偏りが無いことを示してしており、配置の規則性のあらわれた結果と解釈できる。一方で、RA については他の3つの密集タイプと比較すると 1 m ~ 2 m でのエントロピーの変化量がやや大きい。これは、建物間の距離が 1 m ~ 2 m 程度の箇所が他のものと比較して多くあることを示唆したものである。

b) 近隣画素条件：8方向

図-8 (b) に近隣画素条件が8方向の結果を示す。近隣画素条件が8方向になると「隣り合う」とされる画素が多くなるため、同一の建物として判定されるケースも多くなり、結果としてエントロピーの値は低くなることが推測される。しかし、図-8 (b) では空間分解能 1 m に関して、エントロピーの値



(a) 近隣画素条件: 4方向



(b) 近隣画素条件: 8方向

※"◆", "■", "▲"および"●"は建物の密集タイプ RAN, RA, MRA および IA を示す。

図-8 空間分解能の変化に伴ったエントロピーの変化とばらつき



(a) 空間分解能: 1 m



(b) 空間分解能: 2 m

図-9 空間分解能の比較 (RA を一例として)

はいずれの密集タイプにおいても近隣画素条件4方向とほぼ変わらない値を示している。一方、グラフの傾きは MRA を除いて空間分解能の増加ともに大きくなっている。つまり、近隣画素条件が8方向の場合については、空間分解能の変化に伴うエントロピーのレンジが大きくなることを示しており、情報量も多くなることが期待できる。その一方で、建物の密集タイプごとのエントロピーの値が重複するようであれば地域間での比較に際して不都合であることから、それぞれの条件での相互比較が必要となる。

c) 総合評価

まず、図-8 (a) の近隣画素条件が4方向の場合では、空間分解能 1 m から 7 m まではエントロピーの平均値が密集タイプごとに独立していることがわかる。次に標準偏差を見ると、空間分解能 1 m から 6 m までで建物密集タイプごとの重複がほと

んど見られない。なお、図-8 で用いたエラーバーは平均値からの土標準偏差×2の幅を示しており、一般にデータの約95%が含まれる範囲と言われている。100%を含む範囲で分離度を検討することも考えられるが、異常値などが含まれている可能性を考慮し、本研究では土標準偏差×2の幅で検討している。

平均値の変化と併せて考えると、空間分解能 1 m から 6 m の範囲で密集タイプ間の分離度が維持されていることがわかる。つまり、本研究で用いたデータについては近隣画素条件4方向では空間分解能が 6 m 程度になるまでデータ量を縮小できることを示しており、広域的なデータ処理の効率化に対する一つの指針が示されたことになる。

一方、図-8 (b) の近隣画素8方向の結果を見ると、全体としてのエントロピーのレンジは大きいものの、空間分解能 3 m から標準偏差の重なりが大

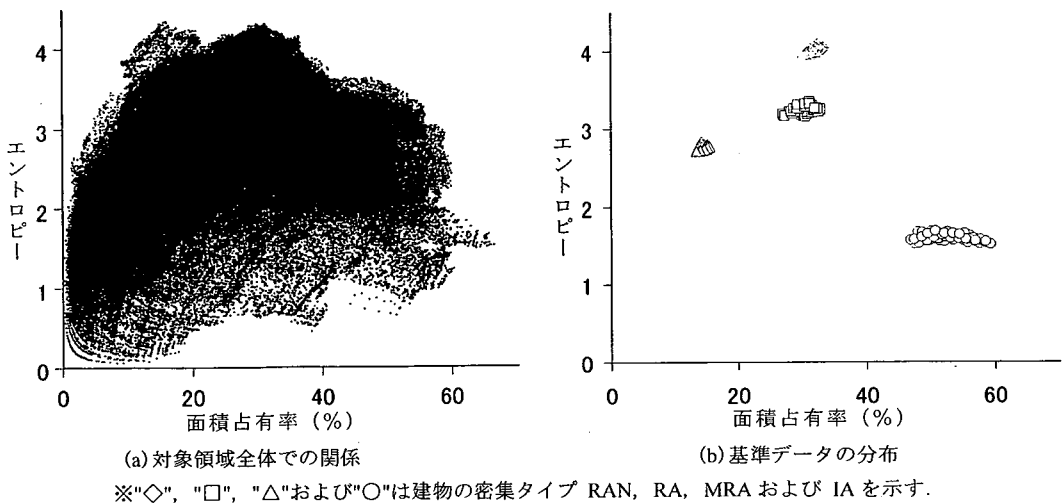


図-10 面積占有率とエントロピーの関係

きくなり、密集タイプごとの分離度は低くなる傾向にある。したがって、近隣画素4方向のほうが提案手法の処理条件に適していることが示唆されたことになる。

(2) エントロピーと面積占有率の関係

図-10に、近隣画素4方向の条件でウィンドウ処理を通じて得られた面積占有率とエントロピーの分布を示す。グラフ上では横軸に面積占有率、縦軸にエントロピーを割り当てている。なお、ウィンドウ処理の際のウィンドウサイズは基準領域とほぼ同じ大きさの198 m×198 m (33画素×33画素)とした。

なお、ウィンドウサイズについては、その取り方に応じてエントロピーと面積占有率の値が変化する可能性もある。極端に小さいサイズであれば、ウィンドウ内に含まれる建物の占める面積が大きくなり、エントロピーの値は小さくなる。また、極端に大きくなれば、ウィンドウ内に建物の建っていない地域が含まれることになり、面積占有率の示す意味が変わってくる。ウィンドウサイズの問題は対象とする都市の形態にも依存することから、本研究の範囲に含めず、今後の課題としたい。

図-10(a)では、プロットされたデータが全体として台形のような形状で分布していることがわかる。面積占有率とエントロピーの相関係数は0.477であった。それぞれの値を同時に考慮することによって建物の密集度に関する有効な情報を得ることが期待できる。

図-10(b)には本研究で選定した基準領域内での2変量の値を抽出し、それぞれの密集タイプごとに強調してプロットしたものを示している。図-7

に示したように、面積占有率を用いれば建物の密集タイプをある程度分離できる。その一方で、図-10(b)の面積占有率だけを見るとRANとRAとの分離が難しいが、エントロピーを考慮することによってはじめて分離が可能となることが示唆されている。RANとRAは建てづまりの問題を広域から比較・分析する上で独立して抽出されるべき項目であることから、エントロピーの有用性が示されたことになる。

また、全体としてみると、面積占有率をエントロピーと併用することによって、建物密集タイプごとの分離度が高くなっていることもわかる。そこで、本研究ではこの2つの計算値が建物密集タイプを説明づけている有効な指標と判断し、対象領域全体の建物密集タイプごとの判別分析に適用した。

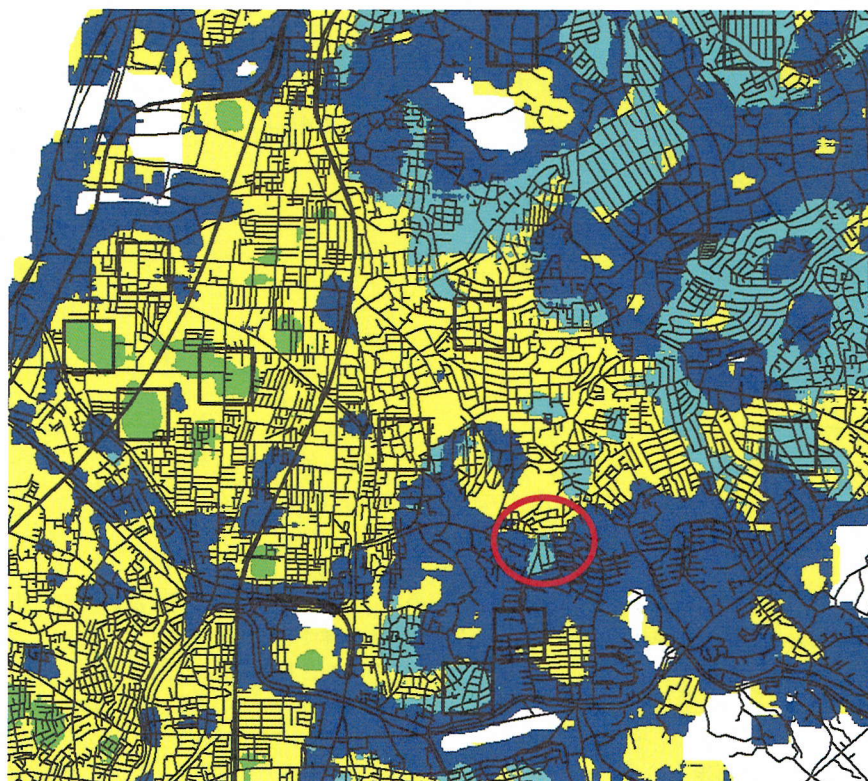
(3) 判別分析結果

図-10の空間上で判別分析を実施した結果を図-11に示す。図中では比較のために道路の中心線を重ね合わせて表示している。主要国道や鉄道については図中に太く強調して表した。

a) 判別結果の画像化

対象領域全体では、領域の西部を南北に通る鉄道や主要道路の周辺にRAやIAが広く分布しており、それより東部に移るにつれてRANやMRAが分布する傾向が現れている。道路の中心線との関係を見ると、RAの分布している場所に複雑に入り組んだ道路網や、行き止まり箇所が多く見られる傾向にある。また、RANとして判別された地域については道路網が格子状となっている傾向にあり、計画的な開発地域を抽出していることが推測できる。

ここで、注目する必要があるのはRAとRAN、



※太線は主要道（国道）および鉄道を示す。

図-1 1 対象領域全体における判別分析結果

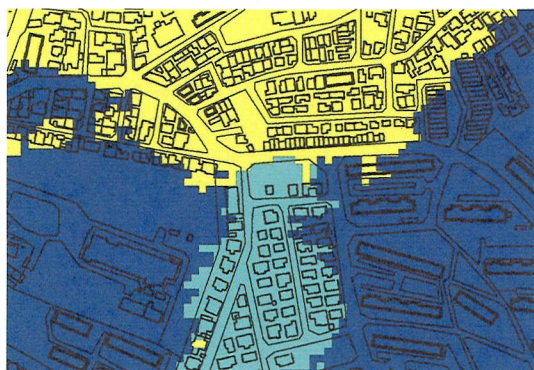


図-1 2 判別結果の拡大図

あるいは RA と MRA の境界部分に当てはまる地域である。図-1 2 には、図-1 1 で赤丸で示した地域の拡大図を示し、街区と建物図を重ね合わせて表示した。建物間に十分な間隔のある地域と密集している地域がそれぞれ RAN と RA に分類されていることがわかる。RA と判別された黄色の地域には道路から直接アクセスできないような配置の建物群が位置しており、建物の密集度も高い。前面道路の幅員もそれほど広いとは言えない。一方で、RAN と

凡例

- : RAN タイプ
- : RA タイプ
- : MRA タイプ
- : IA タイプ
- : 建物無し

表-1 判別効率マトリックス

	RAN	RA	MRA	IA
RAN	99.1	0.1	0.0	0.0
RA	0.1	99.9	0.0	28.5
MRA	0.8	0.0	100.0	0.6
IA	0.0	0.0	0.0	70.9

単位(%)

表-2 評価用領域

クラス	該当率
RAN	87.2
RA	93.7
MRA	96.5
IA	63.6

単位(%)

して判別された水色の地域では、建物間に十分な距離があり、秩序立った配置であることが確認できる。

以上のような道路の中心線、道路幅員などは建物密集度との関連性が深いデータである。したがって、本研究で得られた結果と併せて利用することで、さらに多くの有用な情報を抽出することが期待できる。この点については今後の課題とし、別途検討を進めることとする。

b) 基準データの分析

次に、本研究で実施した判別結果について考察を加える。表-1 は基準データとして選定した場所について、どの程度自らのクラスに判別されたかを示した判別効率マトリックスである。列ごとに、設定した基準クラスに判別された割合と他のクラスに判別された割合が整理してある。本研究で設定した基

準データでは IA の30%弱が RA として誤判別されている傾向がわかる。その一方で、RA と RAN では0.1%程度の誤判別となっている。

c) 評価用領域を用いた分析

本研究では、前述の基準データの検討に加えて、領域全体での判別結果についても分析した。ここでは、判別分析の前にあらかじめ代表的な建物密集タイプにある箇所を基準クラスごとに図-11の口のように評価用領域として対象領域全体から偏りなく選定し、領域内がすべて設定した基準クラスに判別されれば、該当率が100%になるとして判別結果を検討した。表-2に結果を示す。全体として表-1の基準データの場合よりも該当率がやや低いものの、RAN, RA および MRA については85%以上の結果が得られている。一方、IA の該当率は基準データの場合と同様に約60%程度とそれほど高くない傾向にある。

判別精度の問題は、基準クラスの設定方法や基準データの選定基準によって大きく左右される。図-10で示したように、対象領域全体ではエントロピーと面積占有率の値が広く分布していたことに対して、本研究で選定した基準データについては局所的にまとまった分布となっていた。つまり、基準データの分布していない空間が広くあることから、新たな基準クラスが設定できる可能性や、基準データの選定方法に検討の余地があることを示唆した結果と解釈できる。その一方で、この分布の傾向は本研究で対象とした寝屋川市周辺で確認できたものであり、その他の地域で適用した場合に同じ結果になるとは限らない。したがって、判別精度を入念に検討するには、密集市街地を広域分析する評価者の選定した基準クラスと基準データを基にした上で、エントロピー・面積占有率の2軸での分布状態を確認し、判別分析可能な範囲を整理していく必要がある。以上のような検討を繰り返すことで、評価者の設定した基準が分析結果に反映されることになり、手法の実用化へとつながっていくものと考えている。本研究は手法の開発を目的としていることから、判別精度の向上に関する上述の検討については範囲に含めず、今後の課題としたい。

6. 結論

本研究の結論は次の4点にまとめられる。

①建物の密集度を広い範囲から分析する場合には隣り合う建物間の水平距離を用いることが効率的であることに着目し、エントロピーの概念を導入し

た建物密集度の分析手法を新たに提案した。提案手法は高解像度衛星データから得られた二次生成情報を有効に利用できるものであり、地域間での比較の難しかった建物の密集度を領域単位で定量化できる。

- ②開発した手法に、1 m から 10 m まで空間分解能に相当する建物のデータを適用したところ、エントロピーの計算条件が4方向の場合、空間分解能 6 m まで建物密集タイプごとの分離性が維持されるといった結果が得られた。このことは、データ量を圧縮した上で提案手法を適用できることを示しており、高解像度衛星データを扱う利用者にとってコンピュータ資源の節約、処理効率の向上といったメリットをもたらす。
- ③ウィンドウ処理を通じて、提案手法を広範囲なデータに適用し、エントロピーと面積占有率との関連性を調査した。エントロピーと面積占有率のグラフでは、それぞれが建物の密集度に関して貴重な情報を有していることが示された。さらに、建物密集タイプごとに関連性を比較した結果、建物の密集度を比較する上でそれぞれが有用な情報を有していることが確認された。
- ④面積占有率とエントロピーを用いて、対象領域全体を判別分析した。その結果、建てづまりの発生している可能性の高い地域を抽出できることが示された。対象領域全体としても、建物の密集タイプごとに類型化できることが示唆された。以上の結果は、評価者にとって計画の方針を議論する際の支援情報となりうるであろう。

参考文献

- 1) 三村浩史：地域共生の都市計画，学芸出版社，p. 167，1997.
- 2) 日笠 端：都市計画，共立出版，p. 349，1993.
- 3) 佐藤圭二，杉野尚夫：都市計画総論，鹿島出版会，p. 258，1994.
- 4) 日笠 端：市街化の計画的制御，共立出版，p. 259，1998.
- 5) 小島尚人，大林成行，武藤恵美子：土地被覆時系列分析における衛星マルチスペクトルデータを用いた場合の分析方法，土木学会論文集，No. 516/VI-27，pp. 217-226，1995.
- 6) 熊谷樹一郎，小川 進，齋藤元也：衛星データを適用した都市周辺の変遷に関する分析の試み，環境情報科学論文集，No. 13，pp. 109-114，1999.
- 7) 土木情報システム委員会：衛星データの実利用特別小委員会研究報告書，(社)土木学会，p. 111，1998.
- 8) 史 中超，柴崎亮介：ウェーブレット変換による画

- 像分割とステレオマッチングを利用した航空写真からの建物の自動検出の試み, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 34, No. 5, pp. 36-44, 1995.
- 9) 史 中超, 柴崎亮介: 高さ情報を利用した航空写真からの建物の自動抽出手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 36, No. 2, pp. 36-44, 1997.
- 10) 中村英夫: 新体系土木工学50 国土調査, 技報堂出版, p. 416, 1984.
- 11) Tae-Kyung Beak, 樗木 武: GISデータを用いた中高層階住居専用地区指定のための地区選定とその評価手法の開発に関する研究—東京都文京区をケーススタディとして—, 都市計画, Vol. 48, No. 1, pp. 47-56, 1999.
- 12) 瀧 保夫: 情報論 I—情報伝送の理論—, 岩波全書, p. 243, 1978.
- 13) 木下久昭, 青山吉隆, 大谷 博, 芝原靖典: エントロピー法による土地利用予測モデルに関する研究, 昭和55年度日本都市計画学会学術研究発表会, pp. 103-108, 1980.
- 14) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, p. 775, 1998.
- 15) Shigeyuki Obayashi, Hirohito Kojima and Chang-Jo F. Chung: Feature Enhancement of Satellite Multispectral Data Applying Genetic Algorithms, *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, Vol. 18, No. 4, pp. 16-29, 1998.
- 16) 高木隆司: 形の数理, 朝倉書店, p. 171, 1995.
- 17) Turcotte, D. L.: *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, p. 300, 1997.
- 18) 児島利治, 賀 馨: リモートセンシング画像の空間分解能と土地被覆分類精度の関係—4種の画像と低分解能アルゴリズムを用いて—, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 16, No. 5, pp. 23-37, 1996.
- 19) 熊谷樹一郎, 小川 進, 斎藤元也: Landsat/TM データを対象とした土地被覆分布状況の分析方法, 写真測量学会平成11年度秋季学術講演会, pp. 5-8, 1999.

(2001. 3. 23 受付)

DEVELOPMENT OF AN ANALYSIS METHOD ON THE BUILDING DENSITY ASSUMING THE UTILIZATION OF HIGH-RESOLUTION SATELLITE DATA

Kiichiro KUMAGAI

There are various forms for the density of buildings in the cities. The density of buildings should be analyzed with the qualitative distribution of buildings for regional comparison. The objective of this study is to develop the analysis method on the building density assuming the utilization of high-resolution satellite data. The analysis with the calculation of entropy was applied for 320 building-map data considered the distribution types of buildings; the spatial resolution of the data, the requirements of entropy calculation, and the locational directions of buildings. It was suggested that the categorization of the building-distribution types might be possible with the calculated entropy and areal ratio of buildings.