

衛星リモートセンシングデータを用いた 土地被覆時系列分析の精度向上

小島尚人¹・大林成行²・櫻井純子³

¹正会員 工博 東京理科大学講師 理工学部土木工学科 (〒278 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (同上)

³学生員 東京理科大学理工学部土木工科大学院 (同上)

本研究は、筆者らが開発した土地被覆時系列分析モデルの分析機能を拡張（道路網フラクタル次元の導入）するとともに、マイクロ波映像レーダデータ（SARデータ）を併用してモデルの分析精度を向上させたものである。観測年月の異なる光学センサデータとSARデータから土地被覆分類図を作成した上で、市街地へ変化した領域のフラクタル次元を計算し、道路網のフラクタル次元との相関を分析した。これら2種類のフラクタル次元の間には高い相関が認められ、「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型」といった市街地形成パターンを今まで以上に高い精度で類型化できることを示した。さらに、SARデータを併用した場合には市街地形成パターンの分離性が向上することを示し、市街地の形成・成長形態の分析精度を高めるとともに、SARデータそのものの有効性を立証している。

Key Words: remote sensing, fractal, multi-temporal analysis, land cover change, residential form and growth, road network

1. はじめに

衛星マルチスペクトルデータ（以下、衛星データ）の利用分野は多岐にわたり、センサの種類が多様化するとともに、観測されるデータの複合利用方法に関する研究が多くなってきている^{1)・2)}。筆者らも衛星データの周期性、広域性、同時性といった特徴を活かし、土地被覆の時系列分析の支援を目的とした分析手法、いわゆるTAFモデル(multi-Temporal Analysis model with the Fractal using satellite multi-spectral data)を開発し、その有用性を示した³⁾。

これまでの本研究では、観測時期の異なる衛星データから複数の土地被覆分類図を作成した上で、市街地へ変化したと判定される画素(変化画素)を抽出した「差画像」を視覚表示するとともに、変化画素の面的分布形態がフラクタル性を有することを示した。さらに、変化画素領域に対して計算されるフラクタル次元を介して「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型」といった市街地形成パターンが類型化できることを示した。フラクタル次元と差画像とを相互に参照することによって、将来にわたる市街地の変遷を推定できる可能性を見出し、提案手法の実用性、発展性について述べた。TAFモデルの開発過程では、光学センサデータ(MSS; Multispectral Scanner, MESSR;

Multispectral Electric Self Scanning Radiometer)を使用したが、複数の衛星データを入手する際には、画質の判定に多くの時間を要すること、特に雲や大気の影響にともなう画質の劣化がTAFモデルの評価精度に影響を及ぼす。

このような問題に対して、最近では昼夜全天候型のマイクロ波映像レーダデータ(SAR data; Synthetic aperture Radar data)の活用に期待が寄せられている。しかし、現状では光学センサデータとは性質を異にするSARデータの特性を比較することが研究の主眼となり、利用実績の多い光学センサデータに対するSARデータそのものの適用意義については意外にも言及されることが少ない。そこで、本研究ではTAFモデルの分析機能を拡張するとともに(道路網フラクタル次元の導入)、土地被覆時系列分析におけるSARデータの併用・代替利用の可能性について検討する。道路網フラクタル次元とSARデータの導入といった2つの視点から、市街地の形成形態の分析精度を高めるとともに、SARデータそのものの有効性を示す。

2. 従来までの研究と本研究の特徴

(1) SARデータの活用に関する研究の現状

SARデータを利用しようとする研究が多くなって

きている理由は、SARが昼夜全天候型センサとして、雲や大気の影響を受けずデータが収集できるといった点にある。しかし、SARデータ特有のスペックルノイズ除去方法の研究や⁹⁾、ジオメトリックおよびラジオメトリック補正手法の研究等⁹⁾、SARデータの前処理・補正方法に関わる要素技術の開発が主たる課題となっている。

データの活用面で代表的な土地被覆分類の問題一つをとって見ても、トレーニングデータの設定方法や分類精度の評価方法の問題等、今なお多くの議論が交わされている^{6)・7)}。SARデータを適用した土地被覆分類の問題に至っては、土地被覆が複雑なわが国においては、マイクロ波の後方散乱状態の分析が難しく、植生や農地等のように地表面の状態が事前に把握しやすい対象に絞って分類精度を検討することが多い^{8)・9)}。光学センサデータを利用する場合にもまして、SARデータを用いた土地被覆分類の問題は研究途上にある。

以上のような問題背景のもとに、本研究ではSARデータの適用分野を見い出すべく、市街地の形成・成長過程の分析に範囲を絞り、TAFモデルへのSARデータの適用性について検討する。

(2) 本研究の特徴

土地被覆変化検出の難しさと採用する土地被覆分類手法の問題等を含めて、TAFモデルの開発過程と取り扱う範囲については、参考文献(3)において詳述したので割愛するが、本研究では今までの筆者らの研究で残された課題に対して取り組む³⁾。具体的には次の2つの視点からTAFモデルの拡張と市街地の形成・成長形態の分析精度の向上を図る。

①道路網フラクタル次元の導入

TAFモデルは、観測時期の異なる衛星データから複数の土地被覆分類図を作成した上で、市街地へ変化したと判定される領域のフラクタル次元(以下、市街地FR次元)を計算し、市街地の形成・成長過程を分析するものである。本研究では、さらに道路網のフラクタル次元(以下、道路網FR次元)を導入し、市街地FR次元と道路網FR次元の相関の有無を分析する。

検討結果は4章で詳述するが、これら2つのフラクタル次元の間には高い相関が認められ、「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型」といった市街地形成パターンを今まで以上に高精度に類型化できることを示している。本研究の第1点目の特色となる。

道路網FR次元を用いて、都市の街路形態を分析する研究も見られるが¹⁰⁾、道路網FR次元と衛星データから得られる時系列情報としての市街地FR次元の2つの指標を介して「道路整備状況と市街地の形成・成長過程の分析」を支援しようとする着想は、今まで

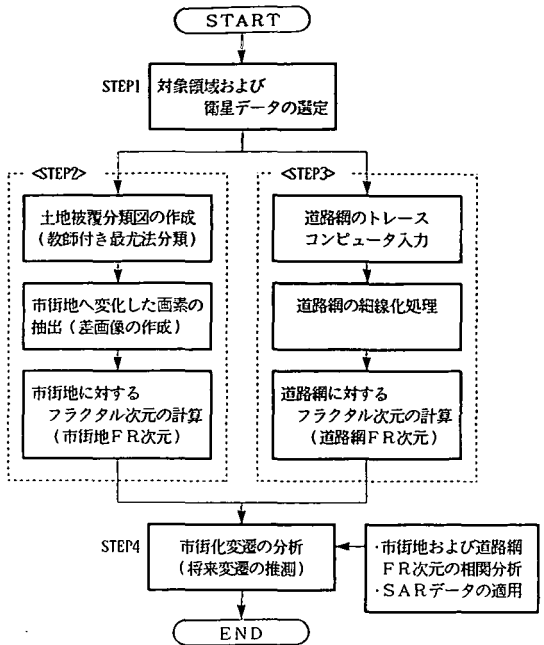


図-1 土地被覆時系列分析モデルの処理の流れ

けない研究の特徴となる。

②SARデータの導入

TAFモデルの開発過程においては、光学センサデータのみを使用していたが³⁾、本研究では、さらにSARデータを導入し、得られる効果を明らかにする。検討結果は5章で述べるが、SARデータを併用した場合には、前述した道路網FR次元と市街地FR次元を介して、市街地形成パターンの分離性が向上することが確認されている。市街地の形成・成長形態の分析精度を高め、SARデータそのものの有効性を立証している点において、本研究の2点目の特徴がある。

衛星リモートセンシングとGIS (Geographic Information Systems) を利用した空間データの分析モデリング機能に関する研究開発は、世界的にも多くの研究者が注目している¹¹⁾。さらにフラクタルを導入した本研究のアプローチは、これら3つの技術を応用する萌芽的研究として意義あるものと考えている。

3. 研究の構成

本研究で拡張したTAFモデルの全体構成を図-1に示す。STEP2が従来までのTAFモデルの構成であり、STEP3とSTEP4が本研究で新たに追加する内容となる。

表-1 選定した衛星データ

対象領域	SARデータ	光学センサデータ		
	観測年月日	観測年月日	センサ名	
東北自動車道	1993. 4. 8	白石地区	1979. 5. 2	MSS
		福島地区	1991. 4. 22	MSS
		郡山地区	1991. 4. 19	MESSR
		黒磯地区		
常磐自動車道	1993. 1. 9	水戸地区	1980. 12. 17	MSS
			1985. 12. 17	MSS
			1991. 12. 13	MESSR
常磐自動車道	1993. 4. 8	土浦地区	1980. 12. 17	MSS
		柏地区	1985. 12. 17	MSS
		三郷地区	1991. 1. 7	MESSR

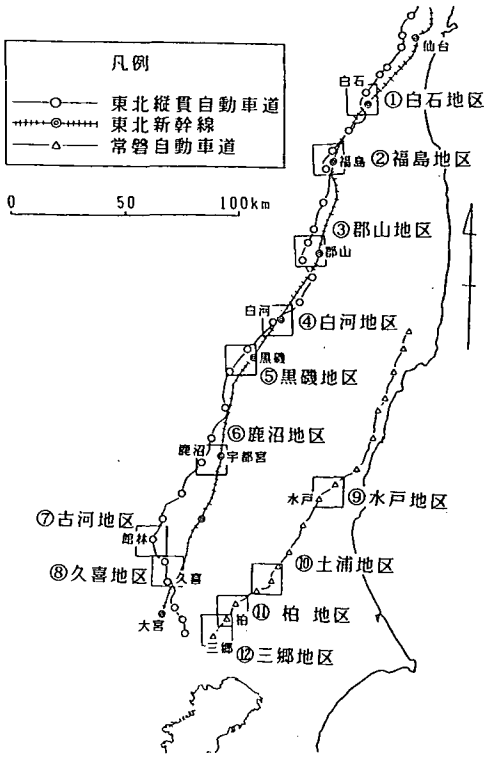


図-2 分析対象領域(12エリア)

(1) STEP 1 : 対象領域および衛星データの選定

a) 対象領域

多極分散型の都市の計画とその形成が目指される中、基幹交通網の整備に伴い、今後市街化の進展が予想される東北地方に着目した。なかでも供用開始後長い年月を経ており、しかも周辺環境の変化が著しい東北自動車道および東北新幹線沿線に着目し、インターチェンジと鉄道駅の隣接している「白石、福島、郡山、白河、黒磯、鹿沼、古河、久喜」の8地区を選定した。この8地区は今までの筆者らの研究対象領域である³⁾。

さらに、本研究ではTAFモデルの分析精度の信頼性を裏付ける上で、常磐自動車道の主要インターチェンジ周辺の4地区(水戸地区、土浦地区、柏地区、三郷地区)を選定・追加した。合計12地区が分析対象となる。図-2にこれらの地区の位置を示した。いずれも開発と保全のバランスを考慮した土地利用の展開が求められている地域である。

b) 衛星データの選定

光学センサデータとして、過去20数年間を対象にMSSデータおよびMESSRデータの中から雲やノイズ等の影響のない良質なものを検索した。さらに、わが国が打ち上げた地球観測衛星JERS-1から観測されたSARデータを加え、最終的に表-1のよう

な衛星データを用意した。画素サイズはすべて、MESSRデータの1画素50mに合わせるように、以下のような処理を施した。

まず、地形図からGCP(Ground Control Point)を選定後、MESSRデータに対して、アフィン変換による幾何補正(再配列処理)を施し、50m/ピクセルに内挿した。MSSデータについては、幾何補正前の公称地上分解能が80mであることから、幾何補正後のMESSRデータに合わせるようにアフィン変換を施し、50m/ピクセルに内挿した。SARデータについては(約18m/ピクセル)を上記MSS、MESSRデータの画素サイズに合わせるようにイメージ間でアフィン変換を行い、50m/ピクセルに外挿補間した。

SARデータの利用に際しては、レイオーバ、フォアショートニング、影領域の影響が問題となる。レイオーバが発生する条件は、JERS-1のSARの場合「斜面の前面傾斜角 $\beta > \text{SARのオフナディア角}\alpha$ (35度)」であり、隣接ピクセル間でレイオーバが発生する標高差は約13m以上となる。本研究では市街地が分析対象であり、山岳部は対象外である。1/25,000地形図をもとに、市街地領域において、これだけの標高差は生じていないことを確認している。したがって、本研究の対象領域に限っては、DTM(Digital Terrain Model)を用いた精密幾何補正処理⁵⁾は施していない。

DTMを用いた精密幾何補正処理を施す場合、SARデータの画素サイズ(約18m)に合わせた精度の高いDTMを整備することが不可欠となる。幾何補正精度は、整備されるDTMそのものの精度にも左右され、補正前のSAR画像上から正確にGCPを選定する作業にもかなりの時間と労力を要する。また、本研究対象のように、12エリアすべてに対して精度の高いDTMを整備することは、データ利用者の立場から見た場合、実用性の点からも問題となる。今後、SA

Rデータの利用・普及を図っていく上で、DTMを介した精密幾何補正処理に関する取り扱いについて、議論していく必要があると言える（精密幾何補正済のSARデータの配布等）。

(2) STEP 2：市街地FR次元の計算

表-1に示した衛星データに対して、教師付き最尤法を用いて土地被覆分類図を作成する。最も新しい時期の土地被覆分類図上で市街地に分類された画素を基準として、分類結果が変化しない画素を「安定画素」、様々に変化する画素を「変化画素」として抽出する。この変化画素は「市街地の広がり状況・複雑さ」を内包した時系列情報と見なすことができ、この変化画素の面的分布形態に対してボックスカウンティング法を用いて市街地FR次元を計算する³⁾（4章(1)～(2)）。

(3) STEP 3：道路網FR次元の計算

地形図(1/50,000)から主要道路網をトレースし、スキャナで読み取って2値化、細線化処理を施す。この道路網に対して、STEP 2と同様に道路網FR次元を計算する（4章(3)）。

市街地および道路網FR次元の計算に際しては、面的な分布形状がフラクタル性を有するか否かといった点が問題となるが、TAFモデルでは、大津が提案した直線度Iを用いてフラクタルプロット図上の点列の直線性を評価し¹²⁾、フラクタル性の成り立つ空間スケール範囲を決定した上でFR次元を計算する。

(4) STEP 4：市街化変遷の分析(5章)

12の分析対象地区が、都市計画関連の研究分野において古くから検討されている代表的な市街地の形成パターンである「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型」のいずれに属するかについて整理する。

市街地FR次元と道路網FR次元で構成される相関図を考え、この相関図上において、市街地形成パターンが今まで以上に高い精度で類型化できることを示す。この点がTAFモデルの機能拡張の内容となる。さらに、SARデータを用いた場合には、相関図上での市街地形成パターンの分離性が向上し、市街化変遷の分析精度を高められることを示す。

4. 市街地変遷領域と道路網フラクタル次元

(1) 土地被覆分類図の作成

a) 分類精度の評価指標

土地被覆分類精度評価の問題は、一般にトレーニングデータの精度と画像全体にわたる分類精度に分けて

論じられている。しかし、トレーニングデータの精度が高くとも、必ずしも画像全体にわたる分類精度は高くないこともあり、分類精度の評価方法そのものについて未だ議論されている部分が多い⁶⁾。そこで、本研究では一般に利用されているトレーニングデータに対する評価指標として「①区分精度、②誤分類率」の2つを採用した。

①区分精度 (Division Accuracy)

$$P_i = M_i / N_i \quad (1)$$

②誤分類率 (Error Ratio)

$$F_i = \sum_j (M_{ij} + M_{ji}) / N_i \quad (2)$$

ここに、 i : トレーニングクラス

M_i : トレーニングクラス i 自身に分類されたピクセル数

M_{ij} : トレーニングクラス i の中で、クラス j に分類されたピクセル数
(Omission errors)

M_{ji} : トレーニングクラス j の中で、クラス i に分類されたピクセル数
(Commission errors)

N_i : トレーニングクラス i のピクセル数

なお、TAFモデルにおけるトレーニングデータの設定の考え方については、参考文献(3)に詳述したので本文では割愛する。

b) 分類精度

本研究で分析対象とした「市街地」について、区分精度と誤分類率を整理した結果を表-2に示す。

区分精度は低いものでも70%以上を示し、誤分類率も30%以下であり特に大きな値を示すものもない。光学センサおよびSARデータともに市街地に関する限り、トレーニングデータに対する分類精度は高いものと判断できる。特に、SARデータは、市街地とその他の土地被覆項目の識別に有効であるとの研究報告とも整合がとれるものであり⁹⁾、TAFモデルにおいてSARデータの代替利用の可能性が示唆される。

なお、画像全体にわたる分類精度の評価に際しては、評価用の基準データに対するPCC (Probability of Correct Classification) が用られるが⁷⁾、時系列分析を行う場合には、トレーニングデータ設定の問題と同様に、過去にさかのぼって評価用の基準データを作成することは現実問題として不可能である。本研究では、差画像上の変化画素に対するフラクタル次元によって市街地の形成パターンが類型化できることを示すことを第1の目的とすることから、PCCによる画像全体にわたる分類精度評価の問題については今後の課題とする。

表-2 評価対象地区別の区分精度と誤分類率

対象領域	観測時期	センサ名	区分精度 (%)	誤分類率 (%)	対象領域	観測時期	センサ名	区分精度 (%)	誤分類率 (%)	
東北自動車道	①白石地区	1979/ 5/21	MSS	91.1	28.4	⑦古河地区	1972/11/26	MSS	83.9	26.7
		1981/ 4/22	MSS	92.4	27.1		1980/12/17	MSS	70.9	20.9
		1991/ 4/19	MESSR	88.2	22.2		1991/ 1/ 7	MESSR	82.6	22.6
		1993/ 4/ 8	SAR	76.2	10.0		1992/11/28	SAR	75.5	21.7
	②福島地区	1979/ 5/21	MSS	92.8	16.3	⑧久喜地区	1972/11/26	MSS	89.3	17.3
		1981/ 4/22	MSS	79.4	25.4		1980/12/17	MSS	79.4	12.7
		1991/ 4/19	MESSR	78.5	29.0		1991/ 1/ 7	MESSR	83.1	16.4
		1993/ 4/ 8	SAR	77.8	13.5		1992/11/28	SAR	74.4	14.5
	③郡山地区	1979/ 5/21	MSS	95.9	21.6	⑨水戸地区	1980/12/17	MSS	88.0	28.7
		1981/ 4/22	MSS	80.3	25.5		1985/12/17	MSS	87.4	17.6
		1991/ 4/19	MESSR	90.5	28.2		1991/12/13	MESSR	90.1	28.4
		1993/ 4/ 8	SAR	74.5	12.1		1993/ 1/ 9	SAR	76.5	29.0
	④白河地区	1979/ 5/21	MSS	90.6	20.9	⑩土浦地区	1980/12/17	MSS	75.0	25.8
		1981/ 4/22	MSS	83.8	19.6		1985/12/17	MSS	79.4	11.4
		1991/ 4/19	MESSR	78.7	15.2		1991/ 1/ 7	MESSR	83.3	5.1
		1993/ 4/ 8	SAR	72.2	27.8		1993/ 4/ 8	SAR	75.5	26.3
	⑤黒磯地区	1979/ 5/21	MSS	96.1	6.3	⑪柏地区	1980/12/17	MSS	81.0	25.8
		1980/ 4/22	MSS	92.7	28.3		1985/12/17	MSS	80.0	27.8
		1991/ 4/19	MESSR	86.1	24.9		1991/ 1/ 7	MESSR	86.2	20.6
		1993/ 4/ 8	SAR	78.5	26.8		1993/ 4/ 8	SAR	77.1	22.5
	⑥鹿沼地区	1972/11/26	MSS	87.3	11.5	⑫三郷地区	1980/12/17	MSS	79.3	26.3
		1980/12/17	MSS	80.0	26.1		1985/12/17	MSS	73.0	25.9
		1991/ 1/ 7	MESSR	78.3	14.8		1991/ 1/ 7	MESSR	85.5	23.0
		1992/11/28	SAR	76.8	12.3		1993/ 4/ 8	SAR	71.0	28.6

c) 市街地へ変化した画素の抽出と差画像の作成

多時期にわたる分類結果を比較する場合として、例えば3時期での比較を考えてみる。市街地とそれ以外の土地被覆に限定すると土地被覆の変化の組合せは表-3に示す8ケースがあげられる。これらのケースはすべての組合せ事象を挙げたものであり、数十年間の間に、ケース2のように市街地が一旦消滅して再び市街化するといったような変化の状況は現実問題として起こりえない。ケース7もこの状況に相当する。

ケース5とケース6の場合では、農村地域等で集落単位といった局所的な範囲では起こりえるが、市街化区域や調整区域等のように市街化が進展する過程にある地域においては、相当量の面積で既存市街地を消滅させるような他用途転換がなされることは、法的規制の面から見てもありえない。

以上のことから本研究では市街地の変遷の状況を分析する上で、ケース1、ケース3およびケース4に相当する領域を分析対象として取り上げる。すなわち、最も新しい時期の土地被覆分類図上で市街地として分類された画素を基準とし、分類結果が変化しない画素を「安定画素」、分類結果が変化した画素を「変化画素」として抽出する。安定画素はケース1に相当し、変化画素はケース3とケース4に相当する。これらの画素に対して表-3に示す色を割当てたものを「差画像」として出力した。

表-1で示した各エリア別に4つの観測時期のデータから差画像を作成することも考えられるが、本研究では、SARデータの代替利用の可能性を見出すこ

表-3 土地被覆変遷の組合せ事象

ケース	土地被覆変化の組合せ事象	差画像
ケース1	市街地 → 市街地 → 市街地	赤色 - 青色 緑色
ケース2	市街地 → 市街地 → 市街地	
ケース3	他の土地被覆 → 市街地 → 市街地	
ケース4	他の土地被覆 → 市街地 → 市街地	
ケース5	市街地 → 市街地 → 市街地	-
ケース6	市街地 → 市街地 → 市街地	-
ケース7	市街地 → 市街地 → 市街地	-
ケース8	市街地 → 市街地 → 市街地	-

とも目的の一つとすることから、最も新しい観測時期の光学センサデータの代わりにSARデータを使用した場合の差画像を作成する。つまり、3時期の衛星データを使用して差画像を作成するものであり、次の2ケースとなる。

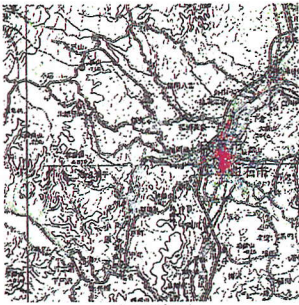
①ケース1：光学センサデータのみ使用して差画像を作成(表-2の3時期使用)。

②ケース2：SARデータを最新の光学センサデータの代わりに使用して差画像を作成。

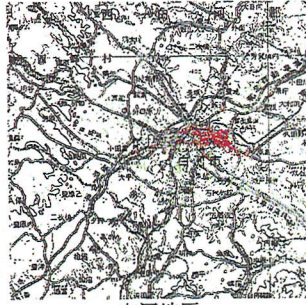
ケース1の差画像はすでに参考文献(3)に掲載したので、紙面の都合上、本論ではケース2の差画像を写真-1に示した。

また、表-4には、SARデータを使用する場合と使用しない場合の土地被覆の組合せ事象の発生頻度がどの程度異なるのかについて整理した。本表では、判りやすくするために、発生頻度の差を百分率表示してある。

ケース1~ケース3ではマイナスの値を示している。



白石地区
(単焦点状型)



白河地区
(単焦点状型)



福島地区
(放射環状型)



郡山地区
(放射環状型)



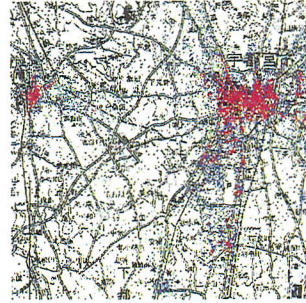
古河地区
(多心型)



久喜地区
(多心型)



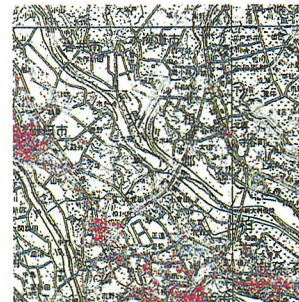
黒磯地区
(複眼型)



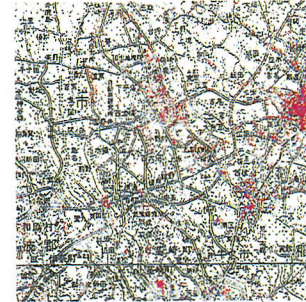
鹿沼地区
(複眼型)



水戸地区
(複眼型)



柏地区
(その他)



土浦地区
(その他)



三郷地区
(その他)

注1) 光学センサデータとSARデータを併用した差画像(ケース2)

2) 色の意味は表-3参照

写真-1 市街地変遷の状況を示す差画像の作成

表-4 土地被覆組み合わせ事象発生頻度の差

(単位: %)

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8
東 北 道	白石	-0.1	-0.1	-2.1	0.6	0.1	0.1	0.2	1.3
	福島	-1.3	-0.8	-2.4	-0.2	1.3	0.8	0.6	1.9
	郡山	-1.3	-0.7	-3.8	1.7	1.3	0.8	0.8	1.4
	白河	-0.1	0.0	-2.9	1.4	0.2	0.0	0.3	1.2
	黒磯	-0.9	-0.2	-3.7	2.1	-0.7	0.1	2.8	0.5
	鹿沼	-0.2	-0.2	-4.5	1.4	0.3	0.2	0.9	2.2
	古河	-0.4	-0.4	-3.6	0.9	0.3	-0.1	0.6	2.2
	久喜	-0.2	-0.2	-4.4	1.7	0.2	0.2	0.6	2.0
常 盤 道	水戸	-0.9	-1.2	-6.1	2.0	0.8	2.1	0.9	2.3
	土浦	-0.4	-0.5	-4.3	1.6	0.4	0.5	0.8	1.9
	柏	-0.7	-1.1	-6.5	1.1	1.2	1.0	1.5	3.3
	三郷	-2.4	-1.4	-6.1	1.7	2.4	1.4	1.6	2.8

注1) 総画素数: 340×340=115,600画素

2) 表中の数値=B-A (%)

A: 光学センサデータのみを用いた場合の土地被覆変遷の組合せ事象の発生頻度

B: 光学センサデータとSARデータを用いた場合の土地被覆変遷の組合せ事象の発生頻度

これはSARデータを用いることによって、全体として市街地に判別される画素が少なくなったことを意味する。つまり、光学センサデータでは、裸地等の輝度値の高い箇所が市街地に誤分類され、市街地領域が大きく見積もられていると言える。一方、ケース4では、全体の傾向としてプラスの値を示し、SARデータを用いることによって、逆に市街地領域が多く判別されていることになる。ケース5～ケース8までも同様の傾向にある。

前述したとおり、土地被覆の変遷の組み合わせ事象と市街地として判定される領域の増減を、このような定量評価を通して厳密に議論することは困難であることを認識した上で、TAFモデルにおいては、実際に起こり得ないケース(ケース2およびケース5～ケース8)を分析対象から除外して以降の検討を進めることとした³⁾。

(2) 差画像に対するフラクタル次元の計算

a) フラクタル次元計算方法

TAFモデルでは、フラクタル次元(FR次元)の計算にボックスカウンティング法を採用している³⁾。面的な広がりやの形態に対するFR次元の計算には最も一般に利用されている方法である。空間を一辺がr(m)の正方形に分割(格子状)し、対象とする形態の一部を含むような正方形の数をN(r)とすると、自己相似性を有する形態は任意のrに対して、

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (3)$$

が成り立つ。この時のDの値をFR次元と定義するものである。FR次元の計算に際しては式(3)の関係より

$$\log N(r) = -D \cdot \log r + C \quad (C: \text{定数, 底: } e) \quad (4)$$

となるので、横軸にlog r、縦軸にlog N(r)をとり、得られたデータをプロットし(これをフラクタルプロットと呼ぶ)、直線の傾きの絶対値をFR次元とする。

b) フラクタル性の評価

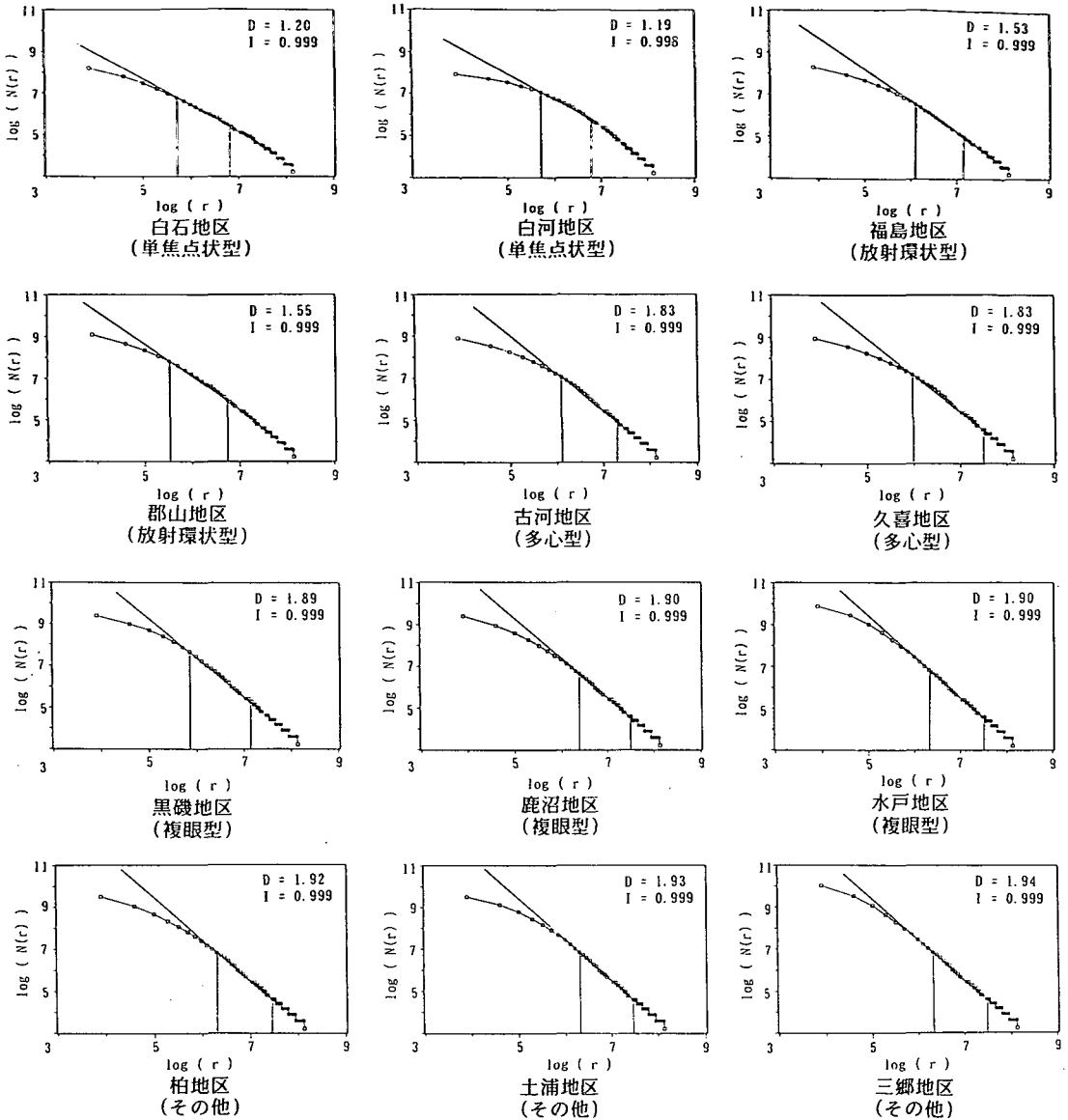
FR次元を計算する場合には、変化画素で形成される面的な広がりやの形態がフラクタル性を有するか否かが問題となる。そこで、TAFモデルではフラクタルプロット図において直線性を有する空間スケールの上限と下限、すなわち自己相似性の成り立つ範囲をコンピュータ処理を通して自動決定し、FR次元を計算する。フラクタルプロットの直線性の評価には、大津が提案した直線度Iを用いる¹²⁾。フラクタルプロット図上の点列(X_i, Y_i), (i=1, 2, ..., n)の直線度Iは、式(5)で定義される。

$$I = \sqrt{4\mu_{11}^2 + (\mu_{20} - \mu_{02})^2} / (\mu_{20} + \mu_{02}) \quad (5)$$

$$\text{ここで、} \mu_{pq} = (1/n) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^p (Y_i - \bar{Y})^q$$

$$\bar{X} = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i, \quad \bar{Y} = (1/n) \sum_{i=1}^n Y_i$$

μ_{pq} : 正規化された(p+q)次のセントラルモーメント



注1) D : フラクタル次元、 I : 直線度

2) 図中の2本の垂線は、フラクタル性の成立する下限と上限を示す。

図-3 変化画像(写真-1)に対するフラクタル性の評価(フラクタルプロット図)

直線度は $0 \leq I \leq 1$ の値をとり、1に近い程直線性が保証され、0に近い程、点列が無相関、等方的にランダムに分布することを意味する。この指標はデータの相似変換、つまり平行移動、回転、伸縮に関して不変であるといった不変式論から導かれたものである。

写真-1で示した差画像の変化画像に対するフラクタルプロット図を図-3に整理した。図では直線度が最も高いデータ点列の上限と下限を示してある。この範囲の点列の直線度は0.9以上であり、直線性は高

く、差画像上の変化画像の面的な広がりやの形態は、フラクタル性を有していると判断できる。

なお、図-3において、空間スケール範囲の小さい例として「白石地区」を見ると、約 $r=300\text{m} \sim 1,050\text{m}$ の範囲でフラクタル性があることになる。1画素が50mであることから、これは約6画素～15画素分に相当する。どの程度の空間スケール範囲についてフラクタル性が成り立つのかと言った点について指摘されることもあるが、フラクタル性の成り立つ空間スケー

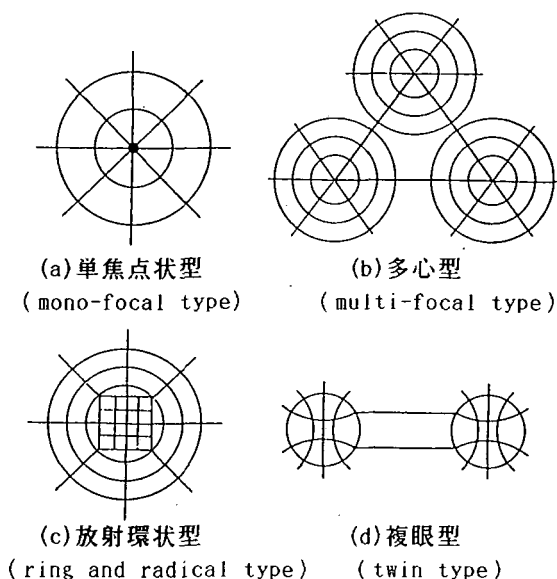


図-4 代表的な市街地の成長・形成パターン

ル範囲は、分析対象によっても異なり、一意的にその範囲を特定することは困難である。空間スケール範囲

の妥当性については議論の余地は残されるが、本研究で対象とした市街地形成パターンに対しては、少なくとも直線度を介した一般的なフラクタル次元の計算方法を用いれば、図-3のようにフラクタル性のある範囲を見い出せることが判る。

c) 本研究で扱う市街地形成パターン

市街地形成パターンは、図-4に示すように「単焦点状型、多心型、放射環状型、複眼型」といった4種類に分けられる^{31)・33)}。本研究で対象とする都市の規模は、中都市圏(人口10万~20万人、圏域半径15~30km程度)および小都市圏(人口3万~5万人程度、圏域半径15~30km程度)の間に位置付けられることから、圏内に存在する市街地を内包する領域17km四方(340画素×340画素:写真-1の矩形領域)に対してフラクタル次元を計算した。

なお、フラクタル次元解析を行う場合、分析対象となる領域の範囲に留意する必要があるが、極端に小さな領域に絞って分析することは、市街地の規模とその配置関係を含めて分析精度の信頼性の問題が派生する。この点については本研究の範囲には含めず、今後の課題とする。

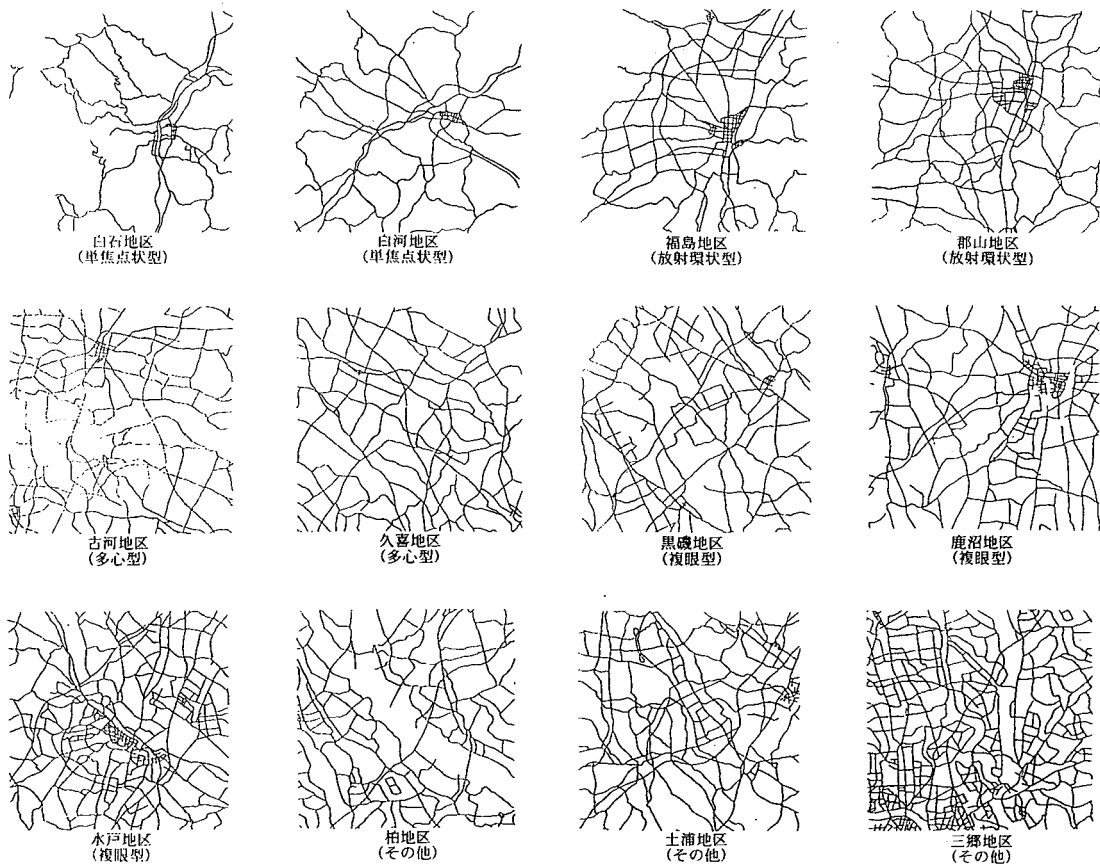


図-5 分析対象領域の道路網

(3) 道路網のフラクタル次元

最近では、都市の街路形態そのものをFR次元によって分類できることを示した研究も見られ¹⁰⁾、道路網のフラクタル性は確認されている¹⁴⁾。しかし、分析対象毎に道路網のフラクタル性をチェックすることはTAFモデルにおいて不可欠な処理となる。対象領域の道路網を図-5に示した。紙面の都合上、図-3と同様のフラクタルプロット図は割愛するが、直線度の値はいずれも0.9以上と高く、本研究で対象とする道路網についてもフラクタル性があることを確認している。

5. SARデータの適用効果の検証

(1) 市街地FR次元と道路網FR次元の関係

市街地FR次元と道路網FR次元の値を表-5に整理した。これは光学センサデータのみを用いた場合(ケース1)に相当する。さらに、これら2種類のフラクタル次元の値を2次元空間にプロットしたものを図-6(以下、相関図)に示す。この相関図から次の3つのことが読み取れる。

なお、フラクタル次元と市街地形成パターンあるいは道路路路形態等との関係に関する研究については、すでにいくつかの研究報告が見られる^{10)・14)}。また、これらの研究に対するTAFモデルの開発段階における特色については、参考文献(3)に詳述したので、本文では割愛する。

①「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型」の4つの市街地形成パターンと「その他の型」は、性質が異なるパターンであることが判る。特に、市街地FR次元だけでは「その他の型」と「複眼型」の都市の違いは明確に識別できないが、道路網FR次元を併用することによってこの点が明らかになる。

②4つの市街地形成パターンについて：「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型」の4つの市街地形成パターンに関する道路網FR次元と市街地FR次元の相関係数は0.934である。道路網と市街地の広がり相関が高い。このことは、市街地の形成パターンと道路網の整備状況との面的な広がり相関関係を定量的に分析できる可能性を示唆するものである。

③その他の型の都市について：三郷、柏の2地区は、市街化がかなり進展しており、道路網FR次元も高く、他の市街地形成パターンと異なっていることが相関図上に現れている。また、土浦地区は全域にわたって道路網整備が先行している領域である。道路網や地形の制約よりは人為的な影響を強く受けた形で、都市の開発が行われはじめていけると言える。

以上の内容は、筆者らの今までの研究では言及でき

なかった点であり³⁾、図-4で示した4つの代表的な市街地形成パターン以外の市街地の形成状態も識別でき、TAFモデルの分析範囲の拡張につながる結果である。

(2) SARデータの適用効果

図-6は光学センサデータのみを使用した(ケース1)の場合の相関図であったが、表-6および図-7には、SARデータを適用した場合(ケース2)のFR次元と相関図を示した。

この4つの市街地形成パターンに対する道路網FR次元と市街地FR次元の相関係数は、0.942と高く、図-6と同様に相関関係が保たれている。このことから、光学センサデータに対するSARデータの併用・代替利用が可能であることが裏付けられる。

さらに注目すべき点は、図-6に比べて図-7の相関図上では「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型、その他」といった5つの市街地形成パターンの分離性が向上していることである。SARデータの適用効果はこのような結果となって現れる。

図-6と図-7の比較から、SARデータを適用した場合、単焦点状型と放射環状型の分離性が最も高くなっている。このことは、道路網が放射状に整備されてくると単焦点状型の市街地が放射環状型に移行するといった事象の推定精度が高められることにつながる。その他にも相関図を介して多角的な視点から解釈ができる。詳細は、次項(5(3))で述べる。

光学センサデータでは市街地が裸地や影、水域等と誤分類されやすい。一方、SARデータの特徴である後方散乱係数の値は、地表面の凹凸によって変化し、特に市街地では高い値を、裸地等の平坦面では低い値を示し、「市街地」と「裸地、畑地、水田、水域」の分類精度を高める上でSARデータは有効であることは知られている。このような光学センサデータにはないSARデータの特性を反映できる土地被覆時系列分析モデルとして、TAFモデルの有用性は高い。

光学センサデータとSARデータをはじめ異種衛星データの市街地領域の抽出精度そのものを画素単位で厳密に議論することは極めて困難であるが¹⁵⁾、TAFモデルにSARデータを導入することによって、今まで以上に高い精度で「市街化形成パターン」を類型化できることが示されたことは意義ある結果と言える。

(3) 市街地化変遷の分析(相関図の解釈)

図-6および図-7の相関図上で示した変遷ケースA~ケースDに着目すると、市街地の変遷について多角的な視点から分析が可能となる。

①変遷のケースA(単焦点状型→放射環状型)

表-5 市街地FR次元と道路網FR次元の計算結果
(ケース1:光学センサデータのみ使用)

対象領域	市街地FR次元	道路網FR次元	市街地形態	
北海道	白石地区	1.42	1.22	単焦点状型
	白河地区	1.45	1.23	
	福島地区	1.59	1.26	放射環状型
	郡山地区	1.65	1.28	
	古河地区	1.77	1.50	多心型
	久喜地区	1.78	1.49	
	黒磯地区	1.82	1.54	複眼型
鹿沼地区	1.85	1.52		
常磐道	水戸地区	1.81	1.50	複眼型
	柏地区	1.89	1.83	
	土浦地区	1.90	1.76	その他
	三郷地区	1.92	1.89	

表-6 市街地FR次元と道路網FR次元の計算結果
(ケース2:光学センサデータとSARデータ併用)

対象領域	市街地FR次元	道路網FR次元	市街地形態	
北海道	白石地区	1.20	1.22	単焦点状型
	白河地区	1.19	1.23	
	福島地区	1.53	1.26	放射環状型
	郡山地区	1.55	1.28	
	古河地区	1.83	1.50	多心型
	久喜地区	1.83	1.49	
	黒磯地区	1.89	1.54	複眼型
鹿沼地区	1.90	1.52		
常磐道	水戸地区	1.90	1.50	複眼型
	柏地区	1.92	1.83	
	土浦地区	1.93	1.76	その他
	三郷地区	1.94	1.89	

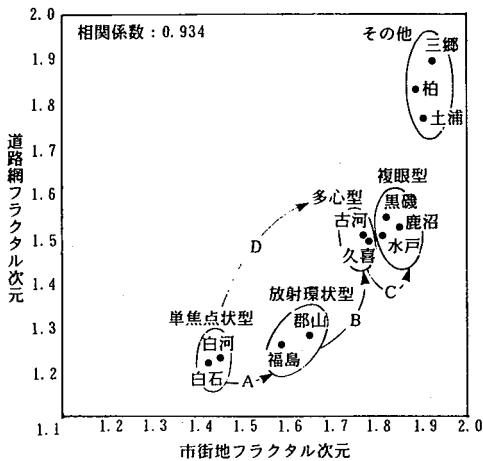


図-6 市街地FR次元と道路網FR次元の相関図
(ケース1:光学センサデータのみ使用)

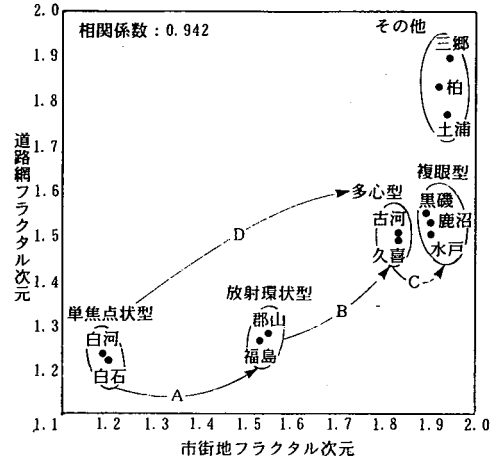


図-7 市街地FR次元と道路網FR次元の相関図
(ケース2:光学センサデータとSARデータ併用)

道路網がさほど整備されていない単焦点状型の市街地は、道路網が放射状に整備されていく場合、放射環状型に進展していく可能性を秘めている。つまり、相関図上のプロット点がこのケースの近くにある場合には、このような変遷をたどるものと推測できる。

②変遷のケースB (放射環状型→多心型)

放射環状型の都市が、多心型に分離して成長することは考え難い。現実問題として起こりえないケースと言える。道路網の計画・整備事業が積極的に推進されていけば、放射環状型から「その他の型(柏, 三郷等)」のような市街地形態へと移行する可能性が想定できる。

③変遷のケースC (多心型→複眼型)

多心型を形成している都市では、道路網に沿って市街地がつながって形成される。このため、市街地の発展形態は、特に道路網の今後の整備状況に大きく左右される。隣接する既存市街地を融合しながら成長し、

複眼型へ移行することが想定される。

市街化形態の分類は、図-4に示したように、都市計画分野で研究されたもの¹³⁾を適用している。この分類は、市街地の規模に対する評価者の判断に基づくものであり、多心型と複眼型の区別は図-6では明確ではない。一方、SARデータを適用した場合の図-7の相関図では、多心型と複眼型の分離性は明らかである。特に、水戸と久喜地区の分離性は向上しており、多心型および多心型から移行していく複眼型の都市形態をグループ化できることが判る。

④変遷のケースD (単焦点状型→多心型)

単焦点状型の都市の近郊では、種々の規格の道路網敷設計画が想定される。これに影響を受けて、単焦点状型の都市は、前述した放射環状型や多心型、さらには複眼型都市へといった様々な変遷の可能性を秘めている。

例えば都市全域に碁盤の目のように張り巡らされた

場合、道路交差点の近郊の土地利用が促進され、短期間のうちに多心型へ変貌していくことが予想される。また、衛星都市が成長し、基幹道路網の整備に伴って複眼型に移行していくことも考えられる。相関図上でのプロット点の位置によって、このような変遷過程の状態を推定することが可能となる。

⑤その他のケース：三郷、柏、土浦地区のように対象領域全体に道路網が張り巡らされているケースは、フラクタル次元も高い値を示している。市街地FR次元は複眼型と近い値を示すが、全体的に高い値となっている。このことから、道路網や地形等の土地のもつ潜在的価値よりは、土地利用政策上の種々の制約条件を強く受けて、都市開発が行われはじめている地区として解釈できる。

以上のように市街地FR次元と道路網FR次元の相関図を用いると、様々な解釈が展開できることが判る。写真-1の差画像と図-5の道路網を横並びにして眺めただけでは、市街地変遷の状況を分析する上で限界があることは言うまでもない。市街地FR次元と道路網FR次元とを併用することは、市街地変遷の分析を支援する上で、今までにない手段として有用となる。

6. まとめ

(1) 研究の成果

本研究は、筆者らが開発した土地被覆時系列分析モデルの分析機能を拡張（道路網フラクタル次元の導入）するとともに、マイクロ波映像レーダデータ（SARデータ）を併用した場合の分析精度について検討したものである。研究の内容と成果は次の3点にまとめられる。

①観測年月の異なる光学センサデータとSARデータから土地被覆分類図を作成した上で、市街地へ変化したと判定される領域のフラクタル次元（市街地FR次元）を計算し、道路網のフラクタル次元（道路網FR次元）との相関を分析した。光学センサデータのみを使用した場合（ケース1）と光学センサデータとSARデータを併用した場合（ケース2）を設定して検討した結果、いずれのケースにおいても市街地FR次元と道路網FR次元は高い相関関係にあることが判った。これにより、TAFモデルにおいてSARデータは光学センサデータとの併用・代替利用が可能であることが裏付けられた。

②市街地FR次元と道路網FR次元で構成する相関図を提案し、この相関図を用いれば「単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型」といった市街地形成パターンを、今まで以上に高い精度で類型化できることを示した。

③さらに、SARデータを併用した場合には市街地形成パターンの分離性が向上し、市街地の形成・成長形態の分析精度を高められることが判った。このことから、TAFモデルを用いて市街地の成長過程を分析する上で、SARデータそのものの有用性が示された。

光学センサデータを利用する場合、雲の影響を受けて良質な時系列データを収集することが難しいといった問題が多い。SARは雲の影響を受けずにデータを観測収集できることから、TAFモデルを利用するにあたって、SARデータの併用・代替利用が可能である点が示されたことは、データ利用者にとって朗報になる。

なお、本研究は、衛星リモートセンシングデータから得られる土地被覆変遷の情報を用いて市街地形成パターンを分析するといった範囲に限られる。都市構造と種々の社会・経済要因との因果関係等の問題については、他の専門分野の研究に委ねられるが、本研究の内容が、この方面の研究の支援情報として役立てばと考えている。

(2) 今後の展望

SARは、昼夜全天候型といった光学センサにはない特徴が唱われてはいるものの、「SARデータそのものの適用意義」を明確にしようとする研究アプローチは意外にも少ない。地球観測計画が積極的に推進されている今日、SARデータと光学センサデータとの併用・代替利用、いわゆる複合センサデータの融合利用に関するニーズは今後益々高くなるはずである。

数年後には、地上分解能が1~2mといった超高分解能衛星データが入手できるようになると言われている。土地被覆の変遷を分析・理解していく上で、過去に観測収集された衛星データを活用することは言うまでもなく、今後新しく入手できる種々の衛星データの活用面として、TAFモデルの適用範囲は広い。新しい衛星センサから観測収集されるデータの適用効果を比較検証すること等は、今後の研究課題として興味深いものとなる。

ネットワークを含めてコンピュータ環境が充実してきた今日、GIS（Geographic Information Systems）の適用分野の開拓が盛んになってきており、世界的に空間データの分析モデリング機能の開発が求められるようになってきている¹¹⁾。本研究の内容は、衛星リモートセンシングとフラクタル、さらにはGISといった3つの技術を融合利用しようとする萌芽的研究として意義あるものと考えている。今後これらの方面の研究の展開にも何らかの形で参考ともなれば幸いである。

謝辞:本研究は、平成7年度文部省科学研究(奨励研究A:07750629)の成果の一部である。種類の異なる衛星データをはじめ関連する資料を提供いただきました関係各位に記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Harris, J.R. and Murray, R.: IHS Transform for the Integration of Radar Imagery with other Remotely Sensed Data, Photo. Eng. and Remote Sensing, Vol.56, No.12, pp.1631-1641, 1990.
- 2) 土田聡, 山口靖, 松永恒雄: LANDSAT/TMおよびJERS1/OPS, SWIRバンド Blur-less画像データを用いた岩相識別, 日本リモートセンシング学会第19回学術講演会論文集, pp.203-204, 1995年11月.
- 3) 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年6月.
- 4) 若林裕之, 新井康平: SARスペックルノイズの低減化に関する一手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.34, No.2, pp.15-24, 1995年2月.
- 5) 竹内章司: SAR標準処理データのための2次補正方法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.34, No.2, pp.54-64, 1995年2月.
- 6) 田中章司郎: ベイズ判別法の分類条件別精度の比較と評価, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.12, No.4, pp.3-21, 1992年12月.
- 7) 小島尚人, 大林成行: トレーニングクラスの設定方法の提案, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.15, No.4, pp.50-65, 1995年10月.
- 8) 木村宏: マルチパラメータSARデータによる植生解析の可能性, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.13, No.1, pp.36-47, 1993年3月.
- 9) 斉藤元也, 美濃伸之: SARデータの農業利用, 一農地のSAR画像の特徴-, 日本写真測量学会秋季学術講演会, pp.61-64, 1993年10月.
- 10) 水野節子, 掛井秀一: 都市街路形態のフラクタル解析, 日本建築学会計画系論文報告集, 第414号, pp.103-108, 1990年8月.
- 11) Fotheringham, S. and P.Rogerson: Spatial Analysis and GIS, Taylor & Francis, 1994.
- 12) 大津展之: 平面上のデータ点列の直線度, 電子通信学会総合全国大会講演集, No.1571, pp.124, 1984年.
- 13) 渡辺与四郎: 都市計画・地域, 技報堂出版(株), 1980年.
- 14) Batty, M. and P.A. Longley: Fractal Cities, Academic Press, 1994.
- 15) 瀬戸洋一, 古村文伸: 異種データ間比較による変化解析方式の一提案, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.10, No.1, pp.5-15, 1990年3月.

(1996.8.27 受付)

IMPROVEMENT OF THE MULTI-TEMPORAL ANALYSIS ACCURACY ON THE LAND COVER CHANGE APPLYING SATELLITE REMOTE SENSING DATA

Hirohito KOJIMA, Shigeyuki OBAYASHI and Jyunko SAKURAI

The objectives of this study are to extend analysis functions of the multi-Temporal Analysis model with the Fractal theory (termed TAF model) and to improve the accuracy in analysis of land cover change applying the synthetic aperture radar (SAR) data. Through the box counting procedure, the fractal dimensions of the changed areas for the residential and the road-network were calculated, respectively. The high correlation between these two fractal dimensions was confirmed in twelve test areas. Especially, in case of using SAR data, the separability of the four typical types of the residential form and growth; the mono-focal, the ring/radial, the multi-focal and the twin type, was improved. These results suggest that SAR data could be substituted for the optical sensor data in the multi-temporal analysis with the fractal dimension.