

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

小島尚人¹・大林成行²・武藤恵美子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、衛星マルチスペクトルデータを用いた土地被覆時系列分析にフラクタルを導入した新しい分析方法を提案し、その適用性について検討したものである。観測時期の異なる衛星マルチスペクトル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、変化画素に対して算出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。また、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。

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

1. はじめに

交通手段としてその重責を担っている道路や鉄道は、自然環境の変化や地域開発に大きなインパクトを与えている。鉄道駅周辺の市街化や高速道路沿線の環境変化が数年の単位で大きく様変わりする地域が数多くなってきたこともその証拠の一つと言える。このような社会基盤整備とあいまって、周辺環境の変化を的確に把握・分析するとともに、将来にわたって適正な国土の計画そして利用へと展開していくアプローチが今後益々必要とされてくる。その手段の一つとして、広域性、同時性、周期性といった特徴を持つ衛星マルチスペクトルデータ(以下、衛星データ)から作成される土地被覆分類図の利用に期待が寄せられている。

土地被覆分類図の作成に関する研究は、古くから着手され数多くの研究成果が蓄積されてきているが、トレーニングデータの選定方法や使用する分類手法、さらには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^{1),2)}。また、土地被覆の時系列分析に関わる研究に至っては、月別、季節別さらには数十年におよぶ時間変遷を考慮した上で、分類精度を論じることから問題はより複雑化する^{3),4)}。土地被覆の変化域そのものを抽出することさえ難しいといった根本的な問題も指摘されている現状にある^{5),6)}。衛星データの種類が多様化する中、適用の範囲や利用目的に応じて許容できる分類精度を念に検討するとともに、実用性のある衛星データの利用方法を提案していく姿勢が今後益々重要になると言える。

これらの背景のもと、著者らは衛星データを用いた「土地被覆時系列分析」の支援を最終目標として設定し、フラクタルを導入した土地被覆変化の分析方法の提案(TAFモデル: multi-Temporal Analysis model with the Fractal using satellite multispectral data)とその適用性に関する検討に着手した^{7),8)}。フラクタルは、形状の面的な広がりや複雑さを定量化する指標として注目されており、建設分野ではライフラインの震害評価⁹⁾、舗装のひび割れ評価や都市の街路形態分類等に研究事例が見られ^{10),11)}、基礎研究段階から応用研究段階に入っている。本研究では新たな試みとして、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、市街地へ変化した領域に対してフラクタル次元(以下、FR次元)を算出するとともに、FR次元を用いて市街地の面的な広がりの状況を類型化できることを示す。さらに、これらの成果をもとに、将来にわたる市街地変遷(都市発展パターン)の推定の可能性について検討し、TAFモデルの有用性、発展性を示す。

2. 既往の研究と本研究の特徴

(1) 衛星データを用いた土地被覆時系列分析の問題点
衛星データを用いて土地被覆の時系列分析を行う研究は、一般に次の2つに分けて考えられている。

①スペクトル情報そのものの変化から、土地被覆の変化域を判定し分析する。

②多時期の衛星データを個別に分類し、分類結果の違

いを抽出し分析する。

前者の場合、スペクトル情報やバンド間演算の結果等を利用して、2 時期間での各画素の特徴ベクトルの変位を求める方法や⁴⁾、多時期にわたる衛星データを多変量で構成される1組のデータセットとして主成分分析や回帰分析等を行う方法がある¹²⁾。さらに、2 時期のデータが同種の衛星データでない場合には、空間分解能および波長特性等の整合をとる疑似スペクトルデータを作成し、このスペクトル空間において各時期間でのベクトル変量を求める方法等がある⁶⁾。一方、後者の場合では、当然のことながら一時期の衛星データに対する分類において指摘されている諸問題が内在する^{11,2)}。分類手法として教師付き最尤法が多用されているが、多時期にわたって安定したトレーニングデータを選定することは困難であり、現実問題として過去のグラントルースデータを収集できないといった問題もある^{3),7)}。

いずれにしても土地被覆の変化を検出する手法そのものが、未だ研究途上にあると言っても過言ではない。多時期にわたる衛星データを有効に利用する技術的方策を考えていく上で、あまりにも解決しなければならない問題は多い。「衛星データの利用普及」を図っていく上で、「全く別の視点」から新たな研究の萌芽も望まれるところである。衛星データを用いた土地被覆の時系列分析にフラクタルを導入しようとする本研究の着想は、以上のような問題背景に基づいている。

(2) 本研究の範囲と特色

a) 研究の範囲

①土地被覆変化検出の方法：本研究では、多時期の衛星データから作成される土地被覆分類図から変化したと判定される画素を抽出した上で(前述②)、これらの画素で構成される土地被覆形状を分析する方法を提案する。分析過程にフラクタルを取り入れる点が特徴となる。なお、スペクトル情報そのものから土地被覆の変化検出を行う方法に関わる問題については前述のとおり多くの問題が内在していることから、本研究の範囲には含めないが、これらの問題が将来にわたって解決されていけば、本研究の提案手法(TAFモデル)の分析精度が今以上に向上することが期待できる。

②土地被覆分析対象：本研究で提案するTAFモデルは、特定の土地被覆を対象とした分析に限るものではないが、あまりにも土地被覆項目が混在し、分類結果の信頼性が低くなってしまふもの(例えば、占有領域が小さく、他の土地被覆項目内に含まれてしまうような裸地や芝地等)を分析対象には含めない。本研究では、まず第1にTAFモデルの有用性を立証する上で、教師付き最尤法分類による判別精度の信頼性が高い「市街地」を取り上げた。

③フラクタル次元の算出手法：本研究では、FR次元を算出する手法として、広く一般に利用されているボックスカウンティング法を採用するとともに⁹⁾⁻¹¹⁾、この手法を組み込んだTAFモデルを用いて市街地変遷の分析が可能であることを示す。現状では、FR次元の推定精度そのものの問題についても詳細な研究が進められている。これらの成果を加味し¹³⁾、TAFモデルの分析精度を今以上に高める点については今後の課題とする。

b) 研究の特色

衛星データを対象とした研究分野におけるフラクタルの導入事例は、画像濃度曲面の複雑さを定量的に分析したり¹⁴⁾、テキスト解析の精度を高めようとするものが主なものである¹⁵⁾。最近では、衛星データから作成された土地被覆分類図からクラス別の土地被覆の分布形状(外形)を抽出し、これらのフラクタル性の有無について検討する基礎的な研究が見られるが¹⁶⁾、具体的な活用方法や時系列的な分析までには言及されていない。

本研究で提案するTAFモデルでは、多時期にわたって市街地へ変化したと判定された画素を抽出するとともに(差画像の提案)、これらの画素の占める領域に対してFR次元を算出し、市街地変遷の状況を分析する点に特徴がある。さらに、古くから都市計画の分野で研究されてきている代表的な市街地の形成パターン(4章(3)で詳述)がFR次元を介して説明できることを示す。

衛星データの有効利用技術の一つとしてフラクタルの具体的な適用方法の提案とその有用性を示す過程において、従来の研究には見られない特色を持つ。

3. 提案手法と処理手順

提案手法(TAFモデル)の処理手順を図-1に示す。

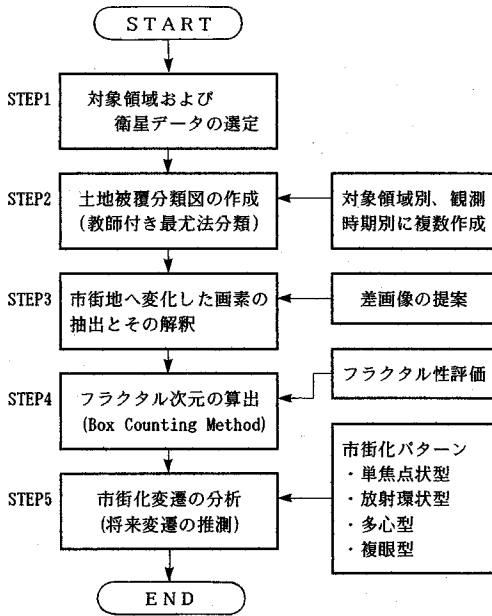
(1) STEP 1：対象領域および衛星データの選定

a) 対象領域

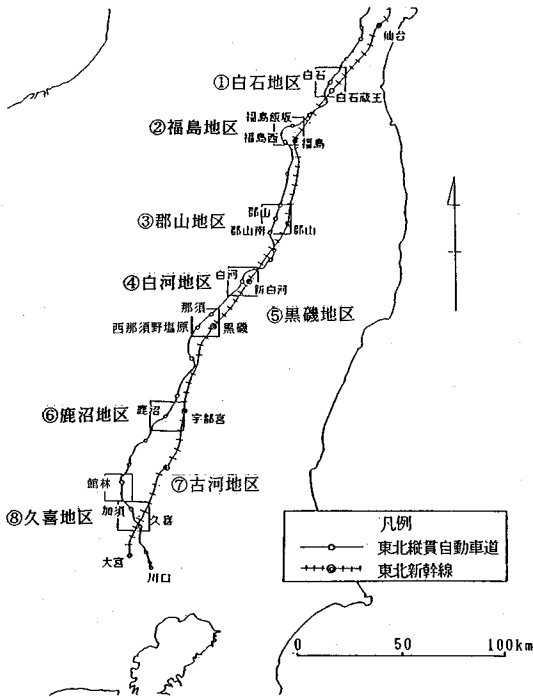
多極分散型の都市の計画とその形成が目指される中、基幹交通網の整備に伴い、今後市街地の進展が予想される東北地方に着目した。なかでも供用開始後長い年月を経ており、しかも周辺環境の変化が著しい東北自動車道および東北新幹線沿線に焦点をあて、インターチェンジと鉄道駅の隣接している「白石、福島、郡山、白河、黒磯、鹿沼、古河、久喜」の8つの地区を検討対象地区に設定した。図-2にこれらの位置を示した。いずれも開発と保全のバランスを考慮した土地利用の展開が求められている地域である。

b) 衛星データの選定

本研究では、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・選定した。最終的に選定したデータ一覧を表-1に示す。



図一 提案する土地被覆時系列分析の流れ



図二 分析対象領域

表一 選定した衛星データ

観測年月日	センサ	PATH-ROW	雲量 (%)	対象地区
1979.5.12	MSS	115-34	0	①白石地区 ②福島地区 ③郡山地区 ④白河地区 ⑤黒磯地区
1981.4.22			0	
1991.4.19	MESSR	20-67W	10	
		20-68W	0	
1972.11.26	MSS	115-35	10	
1980.12.17			10	
1991.1.7	MESSR	20-69W	10	

ることは現実問題として不可能である。このような点を含めて、TAFモデルにおけるトレーニングデータ設定に関する基本的な考え方については、4章(1)にて詳述する。

(3) STEP 3：市街地へ変化した画素の抽出

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る。本研究では、安定画素と変化画素を色分けして表示した差画像を作成し、時系列変化を分析する上で有用性のあることを示す。

(4) STEP 4：変化画素に対するFR次元の算出

差画像上の「変化画素」によって形成される面的な分布形状に対し、ボックスカウンティング法によってFR次元を算出する。FR次元算出の際には、変化画素の分布の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。TAFモデルでは、大津が提案した直線 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¹⁷⁾、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次元を算出する(4章(2)で詳述)。

(5) STEP 5：市街地変遷の分析

図二に示した8つの対象地区が、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」¹⁸⁾のいずれに属するかについて整理する。さらに、STEP 4で算出したFR次元を介して、これらのパターンとの相関があることを示すと同時に、FR次元を相互比較することによって、将来にわたる市街地変遷を推測できる可能性のあることを示す。

(2) STEP 2：土地被覆分類図の作成

表一に示した衛星データに対して、教師付き最尤法分類を用いて土地被覆分類図を作成する。本研究では、市街地の変遷を分析対象としていることから、市街地として判別された画素を抽出する必要があるが、過去の土地被覆状況を反映した精度の高いトレーニングデータを収集す

4. 提案手法の適用効果

(1) 土地被覆分類図の作成

a) トレーニングデータ設定の基本的考え方

多時期にわたる土地被覆分類図を作成する場合、分類

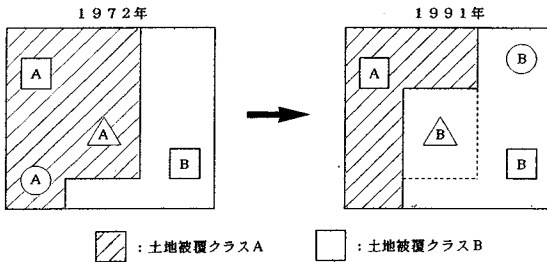


図-3 トレーニングデータの設定方法

精度は各時期毎に選定したトレーニングデータの良否に左右され、常に一定の分類結果が得られるとは限らない。土地被覆変化の抽出精度を安定化させることを目的に、トレーニングデータの設定方法に関する研究も進められているが^{3),6)}、試行処理を余儀なくされることや、変化域の抽出精度をどのように評価すればよいのかといった根本的な問題も指摘されている⁹⁾。そこで、TAFモデルでは、次の3つの点に留意してトレーニングデータを設定することとした。

①画像上で2時期にわたって明らかに土地被覆の変化がないと判読できる箇所を選定する。具体的には図-3において□の枠で囲まれたクラスAやクラスBのように、各時期の衛星データに共通する領域で設定されるトレーニングデータである。

②しかし、このような共通領域においてトレーニングデータを設定する上で判断に迷う場合等もある。例えば、図-3の○で囲まれたクラスAおよびクラスBのように土地被覆の境界部でトレーニングデータを設定する場合等である。これらの領域では、各時期の衛星データにおいて単独でトレーニングデータを設定する。

③2時期にわたって明らかに土地被覆の変遷が確認できる領域を選定し、各々の時期に対応する土地被覆クラスを命名する。図-3において△で囲まれたクラスAおよびクラスBに相当する。土地被覆の変遷を抽出する上で、重要なトレーニングデータに位置付けられる。

以上の3点は、トレーニングデータの設定に際して最も基本に立ち返った考え方と言えるものである。本研究では、この方法で設定されたトレーニングデータを用いて市街化変遷の状況を分析可能であることを示し、TAFモデルの実用性を示す(4章(3)で詳述)。

b) 土地被覆分類精度の評価

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、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^{1),2)}。

そこで、本研究では一般に利用されているトレーニン

表-2 区分精度と誤分類率(市街地)

	観測時期	区分精度(%)	誤分類率(%)
①白石地区	1979/ 5/21	91.1	28.4
	1981/ 4/22	92.4	27.1
	1991/ 4/19	88.2	22.2
②福島地区	1979/ 5/21	92.8	16.3
	1981/ 4/22	79.4	25.4
	1991/ 4/19	78.5	29.0
③郡山地区	1979/ 5/21	95.9	21.6
	1981/ 4/22	80.3	25.5
	1991/ 4/19	90.5	28.2
④白河地区	1979/ 5/21	90.6	20.9
	1981/ 4/22	83.8	19.6
	1991/ 4/19	78.7	15.2
⑤黒磯地区	1979/ 5/21	96.1	6.3
	1981/ 4/22	92.7	28.3
	1991/ 4/19	86.1	24.9
⑥鹿沼地区	1972/11/26	87.3	11.5
	1980/12/17	80.0	26.1
	1991/ 1/ 7	78.3	14.8
⑦古河地区	1972/11/26	83.9	26.7
	1980/12/17	70.9	20.9
	1991/ 1/ 7	82.6	22.6
⑧久喜地区	1972/11/26	89.3	17.3
	1980/12/17	79.4	12.7
	1991/ 1/ 7	83.1	16.4

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²⁰⁾ (Error Ratio)

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

ここに、 i : トレーニングデータ内の分類クラス

M_i : クラス i のうちクラス i に分類されたピクセル数

M_{ij} : トレーニングデータ内のクラス i のうちクラス j に分類されたピクセル数 (Omission errors)

M_{ji} : トレーニングデータ内のクラス j のうちクラス i に分類されたピクセル数 (Commission errors)

N_i : i 項目のトレーニングデータのピクセル数

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。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。

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) が用いられるが²⁰⁾、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

表一3 土地被覆の組合せ事象 (3時期)

	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
ケース2	市街地	→ 他の土地被覆	→ 市街地	-
ケース3	他の土地被覆	→ 市街地	→ 市街地	青色
ケース4	他の土地被覆	→ 他の土地被覆	→ 市街地	緑色
ケース5	市街地	→ 市街地	→ 他の土地被覆	-
ケース6	市街地	→ 他の土地被覆	→ 他の土地被覆	-
ケース7	他の土地被覆	→ 市街地	→ 他の土地被覆	-
ケース8	他の土地被覆	→ 他の土地被覆	→ 他の土地被覆	-

価の問題については今後の課題とする。

c) 市街地へ変化した画素の抽出と差画像の提案

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一3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て、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一3に示す色を割当てたものを「差画像」として提案した。作成した差画像を写真一1に示す。

安定画素(赤色)の周辺から変化画素(青色、緑色)が広がっている様子が一目で把握できる。特に道路網に沿って市街地領域が拡大している状況が捉えられることは興味深い。前述したとおり、変化画素の判定精度を厳密に議論することは困難ではあるが、これらの差画像を通して、市街地の進展の状況は、少なくとも変化画素の面的な広がり状況に反映されていると言える。

さらに、この変化画素の広がり形態をフラクタル次元によって定量的に分析できるか否かについて(フラクタル性の評価を含む)検討を進める。

(2) 差画像に対するフラクタル次元の算出

a) フラクタル次元算出方法

TAFモデルでは、フラクタル次元(FR次元)の算出

にボックスカウンティング法を採用している。面的な広がり形態に対するFR次元の算出には最も一般に利用されている方法である。空間を一边が r 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次元の算出に際しては式(3)の関係より

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

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計算しFR次元とする。

b) フラクタル性の評価

FR次元を算出する場合には、変化画素で形成される面的な広がり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次元を算出する。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¹⁷⁾。フラクタルプロット図上の点列 (X_i, Y_i) ($i=1, 2, \dots, n$)の直線度 I は、式(5)で定義される。

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

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

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

(なお、 u_{pq} は正規化された $(p+q)$ 次のセントラルモーメントを表す)

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¹⁷⁾。

8つの分析対象地区に対するフラクタルプロット図を図一4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0.996以上であり直線性は高く、差画像上の変化画素の面的な広がり形態はフラクタル性を有していると判断できる。

(3) 市街地変遷の分析

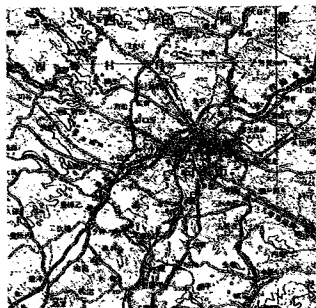
a) 市街地形成パターンの整理

都市の規模は、中核となる市街地の面積、市街地人口等で表現されるが、一般には表一4のように3種類に分けて考えることができる¹⁸⁾。

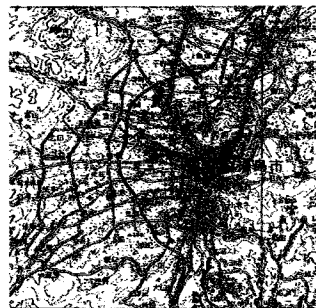
このうち小都市と中都市の成長は、鉄道網や道路網といった社会基盤整備等とともに、物理的な近接関係に



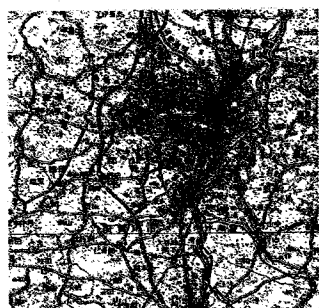
白石地区
(単焦点状型)



白河地区
(単焦点状型)



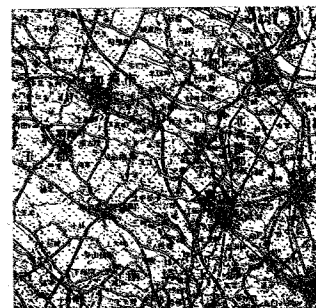
福島地区
(放射環状型)



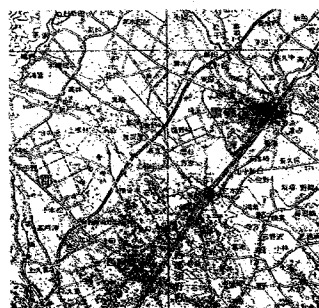
郡山地区
(放射環状型)



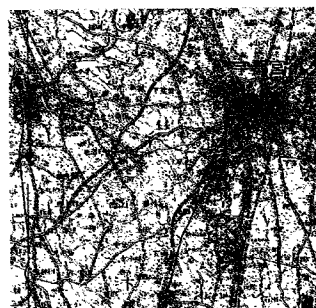
古河地区
(多心型)



久喜地区
(多心型)



黒磯地区
(複眼型)



鹿沼地区
(複眼型)

注) 色の意味は表-3参照

写真-1 差画像の作成(市街地)

よって一体的に進むものと考えられる。例えば、インターチェンジや鉄道駅を中心としてクラスター(房)状に市街化が進展していく事例等である。形成された市街地のパターンをモデル化すると、代表的なものとして図-5のように分けることができる¹⁸⁾。これらの市街化パターンがフラクタル次元によって説明付けられれば、衛星データから得られる時系列情報が都市の成長過程を評価する新たな指標となり得るだけでなく、将来にわたる市街化変遷の推測の可能性が期待できる。この点について次節でさらに分析を進める。なお、本研究の分析対象区域は、小都市圏と中都市圏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(約20 km 四方)を

表-4 都市の規模

①大都市圏	人口	50~100万人程度
	圏域	半径45~90 km程度
②中都市圏	人口	10~20万人程度
	圏域	半径15~30 km程度
③小都市圏	人口	3~5万人程度
	圏域	半径5~10 km程度

注) 本研究の対象圏域は、中都市および小都市。

設定してフラクタル次元を計算した。

フラクタル次元解析を行う場合、解析対象領域の設定

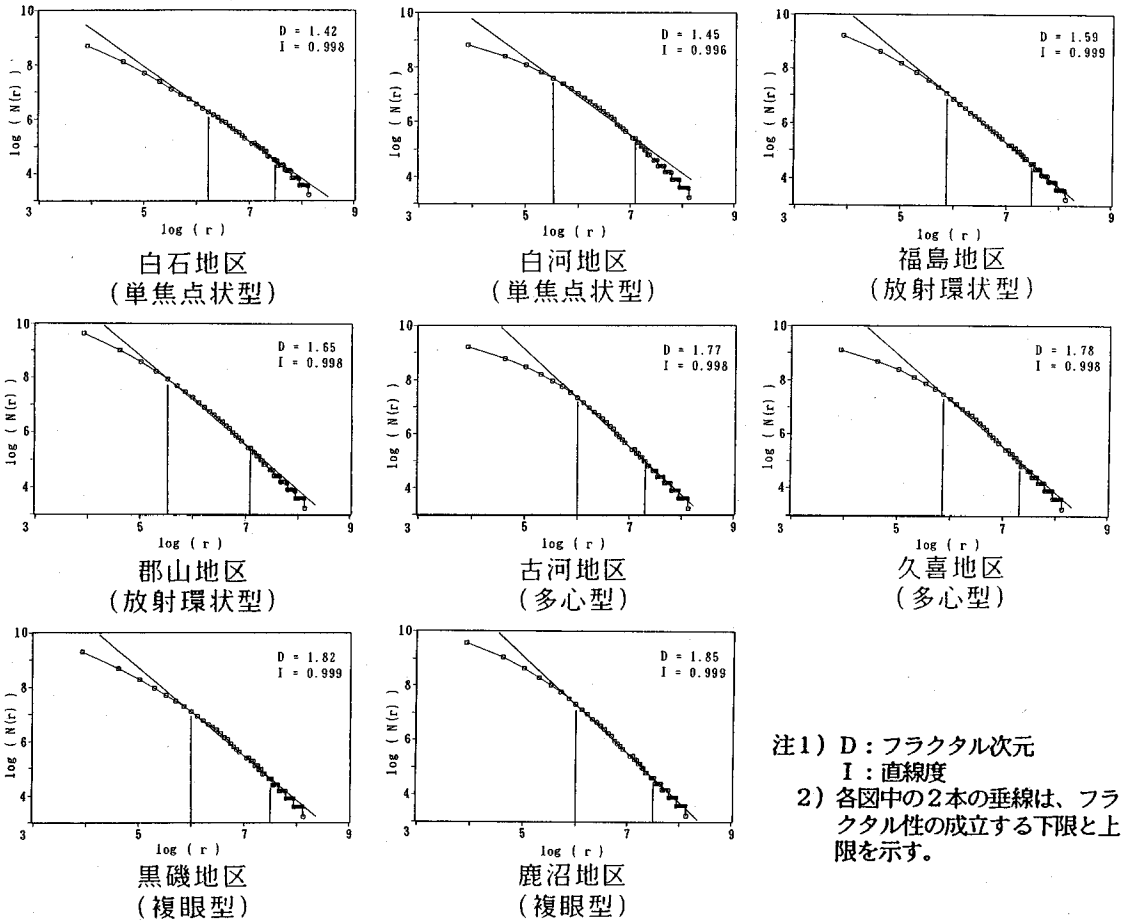


図-4 変化画素に対するフラクタル性の評価 (フラクタルプロット図)

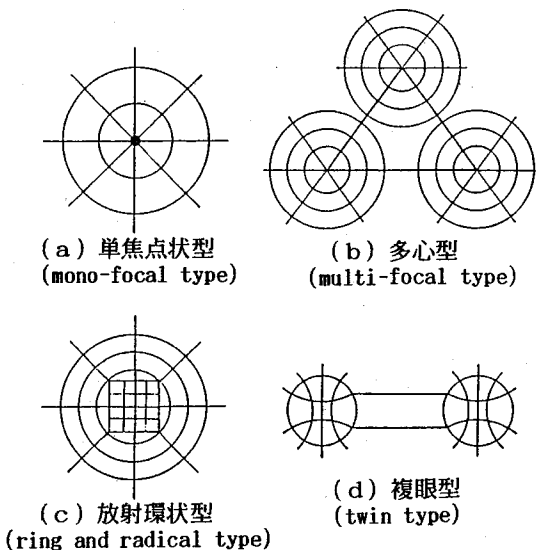


図-5 市街地形成パターン¹⁸⁾

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。

b) FR 次元と市街地形成パターンとの関係

図-4 から算出された FR 次元を表-5 に整理した。写真-1 を参照しつつ、FR 次元と図-5 に示した市街地形成パターンとの関係について考察する。

①白石地区、白河地区 (単焦点状型)

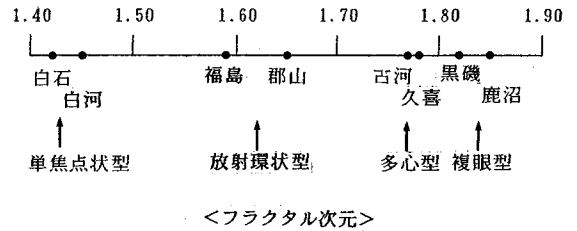
古くから存在している市街地の規模が小さく、道路網もさほど整備されていない地区である。白石、白河地区の FR 次元は、それぞれ 1.42、1.45 と小さく、既存の市街地の周辺やある限定された道路の周辺に変化画素の存在する場所がかたよっているのが特徴である。これらの地区は一点集中型の市街地構造で、「単焦点状型」に分類できる。

②福島地区、郡山地区 (放射環状型)

既存市街地の規模が非常に大きい地区である。両地区の FR 次元はそれぞれ 1.59 および 1.65 であり、単焦点

表一五 フラクタル次元と市街化形態

対象地域	FR次元	市街化形態
白石地区 白河地区	1.42 1.45	単焦点状型
福島地区 郡山地区	1.59 1.65	放射環状型
古河地区 久喜地区	1.77 1.78	多心型
黒磯地区 鹿沼地区	1.82 1.85	複眼型



図一六 フラクタル次元と市街地形成パターンの関係

状型と多心型の間の値を示している。両地区ともに市街地の規模、道路網の整備の状況（放射状）が類似しており、変化画素はこの道路沿いだけでなく、全域に広がって分布しており、「放射環状型」に分類できる。

③古河地区、久喜地区（多心型）

かなり小規模な市街地が点在している地区であり、これらの市街地を結ぶ道路網が張りめぐらされている。両地区のFR次元はそれぞれ1.77および1.78であり、単焦点状型に比べて高い値を示し、面的な広がりやの形態が異なっていることを裏付けている。変化画素は市街地間を結ぶ道路に沿って広い範囲で分布している。主要道路の交差点にも新たな市街地が形成されており、これらの地区は「多心型」に分類できる。

④黒磯地区、鹿沼地区（複眼型）

古くからある市街地が2箇所偏心して存在する地域である。写真一1の差画像を見ると、黒磯地区では、複数の小さな町が市街化し、隣接する既存市街地とともに複眼型都市としての形成過程にある様子を見ることが出来る。また、鹿沼地区では、南北方向に伸びる道路に沿って広域にわたって市街地が拡大している地域とそれに影響を受けるように隣接する都市が成長していく様子が判る。黒磯地区、鹿沼地区のFR次元は、それぞれ1.82および1.85であり、他の地区に比べて突出している。市街地形成パターンが大きく異なっていることを裏付けており、これらの地区は「複眼型」に分類できる。

以上をまとめると、分析対象地区はFR次元によって表一五のように市街地形成パターンに類型化できる。

なお、FR次元の大小は、市街地の面的な広がりやの状況の複雑さの「度合い」を表しているとは言えない。この点については何をもって複雑さの「度合い」を定義するのかといった議論になることから、本研究の範囲には含めないこととするが、差画像と表一五で示したFR次元を照らし合わせて見ると、現状の市街地の「形成パターン」を定量的に把握・分析できることは明らかである。さらに、次項(C)でも述べるようにFR次元によって今後の市街地の発展形態等について多角的な視点から考察が展開できる。

以上までの考察は、本研究で取り上げた8つのエリアに対する分析の範囲にとどまるものではあるが、変化画

素の面的な分布形状を定量化して分析できるFR次元の有用性は高い。多時期衛星データの有効利用技術の一つとして提唱できるものであり、今後は他地域にも適用し（常磐自動車道近郊等）、TAFモデルの適用範囲を拡張していくことを考えている。

c) FR次元による市街地変遷の推測の可能性

図一六に示すように、FR次元を横軸にとって地区別に並べてみると興味深い考察が可能となる。例えば、単焦点状型の都市が、放射環状型、多心型、複眼型のいずれの成長過程をたどるのかといった問題を考える。

単焦点状型のFR次元の値から徐々に高くなる場合には、放射環状型へ移行し成長する過程にあり、FR次元が急に高くなる場合には、多心型が複眼型へ移行していく傾向にあるといった推測が可能となる。つまり、単焦点型市街地からやや離れて個別に市街地が形成されてきていることをFR次元によって判断することが可能となる。さらに、図一六からも判るように、FR次元が大きくなる程、多心型から複眼型への成長過程にあるといった推測もできる。また、道路網の計画と整備状況が市街地の発展形態を左右することは言うまでもないが、このことは差画像上の変化画素が道路網に沿って分布していることから伺える。つまり、白石、白河地区の道路網の整備計画が、福島地区や郡山地区と同様になるならば、放射環状型へ移行するといった発展形態をたどる可能性がある。一方、単焦点状の都市の周辺に比較的規模の大きい市街地が形成されてくると将来的には多心型から複眼型に移行していくことも考えられる。

以上まではFR次元が高くなる市街地形態へと移行する場合の推測であるが、現実には多心型や複眼型の市街地がより大きな単焦点状型に成長していくこともある。この場合にはFR次元が低くなることは本研究の結果から容易に理解でき、FR次元を介して多角的な視点から市街地の形成・発展形態について推測できると言える。

このようにTAFモデルから得られる情報は、将来の道路網計画、土地利用構想や地域計画等への基礎資料としても有用となる。衛星データから作成される土地被覆分類図を単に横並びにして眺めただけでは、以上のような分析を展開することはできない。前述した市街地形成パターンの分析に加えて、フラクタルを導入したTAF

モデルのもう一つの特徴である。

5. まとめ

本研究は、衛星データを用いて土地被覆の経年変化を分析することを目的に、フラクタルを導入した新たな土地被覆変化の分析手法 (TAF モデル: multi-Temporal Analysis model with the Fractal using satellite multispectral data) の提案とその適用性について検討したものである。研究の成果は次の4点にまとめられる。

①衛星データを用いた土地被覆時系列分析に関わる既往の研究について調査するとともに、そこに内在する問題点を整理した。その結果、多時期にわたる衛星データを有効に活用する技術的方策を考えていく上で、「全く別の視点」から新たな研究の萌芽も必要であることを述べるとともに、フラクタルを導入することの意義と本研究で取り扱う範囲を明示した。

②観測時期の異なる衛星データから土地被覆分類図を作成し、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」として抽出した。さらに、この安定画素と変化画素を色分けして表示した差画像を提案し(写真-1)、時系列変化を分析する上で実用性の高いことを示した。

③「市街地の広がり」の状況・複雑さは、変化画素の分布形状に反映される。この変化画素の分布形状はある一定の空間スケール範囲においてフラクタル性を有することが確認された(図-4)。これにより、FR次元を介して市街化の進展状況を定量的に分析できる可能性が見い出され、さらに研究を展開した。

④市街化の進展が予想されるいくつかの代表的な市を対象にFR次元を算出した結果、次元の違いによって古くから研究されている市街地の形成・成長形態(単焦点状型、放射環状型、多心型、複眼型)が類型化できることが示された(表-5)。さらに、FR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形成の過程を推定できる可能性を見い出した。

このように、TAFモデルを適用することによって、衛星データから得られる時系列情報に対して、今までにない視点から分析が展開できる。多時期衛星データの利用技術の一つとしてTAFモデルは実用性、発展性のある分析モデルとして提唱できる。

6. 今後の展望

今後の展望として次の3点があげられる。

①本研究では、衛星データを用いた場合の土地被覆時系列分析にフラクタルを導入した新たな方法の提案と、

その適用性を示すことをまず第1の目的としたことから、衛星データから分類される土地被覆の中でも精度の高い市街地領域を分析の対象とした。しかし、山間部や起伏の伴う地方市街地においては、その発展形態が地形条件に左右され、しかも樹林地を伐採したり、農用地を宅地化していくといった土地利用転換を余儀なくされている。今後は、樹林や農用地等の変化についてもTAFモデルを用いて分析し、市街地形成との因果関係について分析することが必要と言える。

②市街化の進展は道路網の整備状況にも左右される。本研究ではこの点に触れることができなかったが、都市街路形態をFR次元によって分類した研究も見られることから^{11),21)}、今後はさらに道路網のFR次元と差画像上の変化画素に対するFR次元との因果関係分析を進めたいと考えている。これらの相関が認められれば、差画像上で示される変化画素の分布状態の信頼性を裏付けることにもつながる。また、計画道路網のFR次元を介して将来の市街化の状況を推測、さらには市街地の成長過程を面的に「予測シミュレート²⁰⁾」するといった展開も十分に期待できる。衛星データを適用したTAFモデルの分析範囲の拡大につながるものであり、興味ある研究課題と言える。

③4章(1)で述べたように、一時期の分類図の全域にわたる分類精度の問題さえも今なお多くの議論が交わされている現状にある。ましてや多時期にわたる土地被覆変化の分析の信頼性を厳密に評価することは、不可能であると言っても過言ではない。対策としては過去に観測されている航空写真を時系列的にデータベース化し、これらのデータを評価基準として、画像全体にわたる分類精度と差画像の信頼性の評価を支援できるシステムを構築すること等が挙げられる。特に差画像の信頼性評価については、誤認される可能性の高い土地被覆変化の組合せ事象を検討し、この事象の比率が高い場合には土地被覆分類図に立ち戻るといった繰り返し検証ができるような機能をシステムに組込むこと等が今後の課題となる。

市街地の形成と発展の問題に関する研究は古くから数多く発表されており、本研究で扱った内容は衛星データから得られる情報の分析の範囲に過ぎないものではあるが、最近では世界的にも都市の形成と成長を定量化する方法としてフラクタルの適用が目目されている²⁰⁾。衛星リモートセンシングとフラクタルといった2つの技術を融合利用するTAFモデルは、この方面の研究分野にも参考になるものと期待できる。

光学センサ、合成開口レーダに代表されるように、高分解能化、多バンド化を目指した衛星搭載センサの開発計画が積極的に推進されている今日、異種衛星データの併用とともに、多時期にわたってデータを活用しようとする研究は、今後益々重要な課題になるはずである。本

研究で提案した TAF モデルは、これらの問題にも十分に対応できる可能性を秘めたモデルであり、今後の衛星データの有効利用技術の一つとして何らかの形で寄与できれば幸いです。多分野にわたる専門家の方々のご批判とご叱正を仰ぐ次第であります。

参考文献

- 1) 稲村實, 神保裕紀, 小林幸夫: カテゴリー分類精度の評価方法とカテゴリー分解について, 日本リモートセンシング学会第 13 回学術講演会論文集, pp.53-54, 1992 年 12 月.
- 2) 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.
- 3) 竹内章司: 時系列データの最尤法分類における分類結果の安定化手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.31, No.2, pp.11-22, 1992 年 4 月.
- 4) Jenson, J.R. and D.L. Toll: Detecting Residential Land Use Development at The Urban Fringe, *Photo. Eng. and Remote Sensing*, Vol.48, No.4, pp.629-643, 1982.
- 5) Howarth, J.P. and E. Boasson: Landsat Digital Enhancements for Change Detection in Urban Environment, *Remote Sensing of Environment*, Vol.13, pp.149-160, 1983.
- 6) 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.
- 7) 大林成行, 小島尚人, 武藤恵美子, 熊谷樹一郎: 衛星マルチスペクトルデータを用いた土地被覆時系列分析に関する研究, 土木学会第 48 回学術講演会概要集, 第 4 部門, pp.176-177, 1993 年 9 月.
- 8) 大林成行, 小島尚人, 武藤恵美子: 衛星マルチスペクトルデータを用いた土地被覆時系列分析におけるフラクタルの適用可能性, 日本リモートセンシング学会第 16 回学術講演会論文集, pp.89-90, 1994 年 5 月.
- 9) 中川昌美, 佐武正雄, 猪股亮裕: ライフラインシステムの震害評価におけるフラクタル次元の応用, 土木学会論文集, No.428/I-15, pp.177-182, 1991 年 4 月.
- 10) 阿部忠行, 小川進: 舗装ひびわれのフラクタル解析, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.119-126, 1992 年 2 月.
- 11) 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.
- 12) Byrne, G.F.: Monitoring Land Cover Change by Principal Component Analysis of Multitemporal Landsat Data, *Remote Sensing of Environment*, Vol.10, pp.175-184, 1980.
- 13) Olsen, E.R., Ramsey, R.D. and D.S. Winn: A Modified Fractal Dimension as a Measure of Landscape Diversity, *Photo. Eng. and Remote Sensing*, Vol.59, No.10, pp.1517-1520, 1993.
- 14) Lam, N.S.: Description and Measurement of Landsat TM Images using Fractals, *Photo. Eng. and Remote Sensing*, Vol.56, No.2, pp.187-195, 1990.
- 15) 吉沢達也, 曾根光男, 高木幹雄: フラクタル次元と低次統計量とを用いたテクスチャの自動分類, 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.7, pp.45-55, 1990 年 7 月.
- 16) De Cola, L.: Fractal analysis of a Classified Landsat Scene, *Photo. Eng. and Remote Sensing*, Vol.55, No.5, pp.601-610, 1989.
- 17) 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, p.124, 1984 年.
- 18) 渡辺与四郎: 都市計画・地域計画, 技報堂出版(株), 1980 年.
- 19) 清水英範, 花村嘉夫, 金田和久: リモートセンシングデータによる土地利用変化地点の抽出方法, 日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集, pp.153-156, 1988 年 5 月.
- 20) Batty, M. and P.A. Longley: *Fractal Cities*, Academic Press, 1994.

(1994.10.31 受付)

A MULTI-TEMPORAL ANALYSIS METHOD ON THE LAND COVER CHANGE IN CASE OF APPLYING SATELLITE MULTISPECTRAL DATA

Hirohito KOJIMA, Shigeyuki OBAYASHI and Emiko MUTHO

The objective of this study is to propose a practical method applying fractal for the multi-temporal analysis on the land cover change in case of applying satellite multispectral data. The changed area to the residential over twenty years were extracted through the plural land cover classification maps made by using Maximum Likelihood method. For these areas, the box counting procedure were applied to calculate the fractal dimension. The results of this study are as follows: 1) The distribution of changed areas to the residential showed the fractal properties over a range of spatial scales. 2) Furthermore, it was confirmed that four typical types of the residential form and growth, such as the mono-focal, the ring/radical, the multi-focal and the twin type, could be discriminated by means of fractal dimension. These results suggest that it may be possible to presume and analyze the residential sprawling in the future through the fractal dimension.

CIVAS

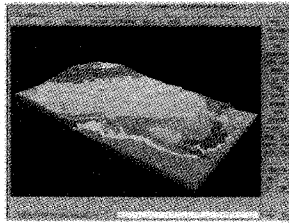
Civil Engineering
Analysis
Service

CRC地盤・地下水トータルサービス

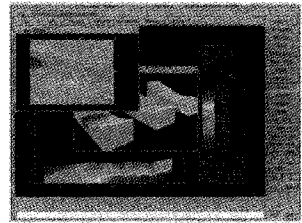
地質解析

GEORAMA

3次元地質解析プログラム



3次元地質ブロック図



物性値のコンター表示

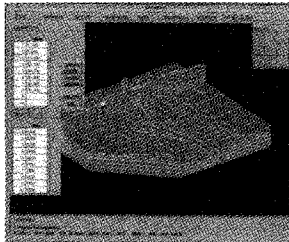


地盤・地下水解析

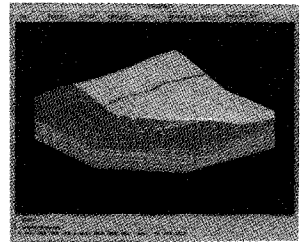
■プリ処理(データ作成)

CIVAS/Pre

対話型プリプロセッサ



CIVAS/Preによる掘削データの入力画面



CIVAS/Preによる3次元メッシュ図

■解析処理

SoLver

各種解析コード

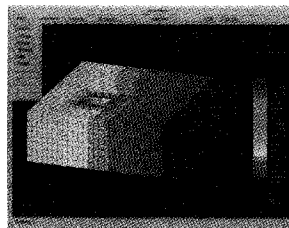


SEEPAGE-3D(3次元地下水解析プログラム)

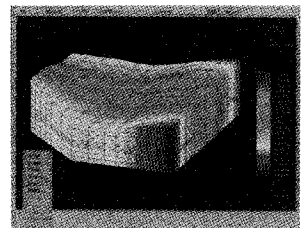
UNICOUP(土と水の連成(逆)解析プログラム)

UNISSF(V-2)(広域地下水変動解析プログラム)

Mr.SOIL(地盤解析プログラム)



CIVAS/Postによる掘削(ディープウェル)による全水頭コンター図



CIVAS/Postによるトンネル工事による全水頭コンター図

■ポスト処理(図化)

CIVAS/Post

対話型ポストプロセッサ

CRC 株式会社 **CRC** 総

日本技術開発研究所



* 8 0 1 0 5 7 9 *

システム事業部 建設エンジニアリング部
東京都江東区南砂2-7-5 ☎(03)5634-5789

日本事業部 科学システム営業部
大阪市中央区久太郎町4-1-3 ☎(06) 241-4121

土と水の連成逆解析プログラム

未来設計企業

CRC

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

盛土・掘削

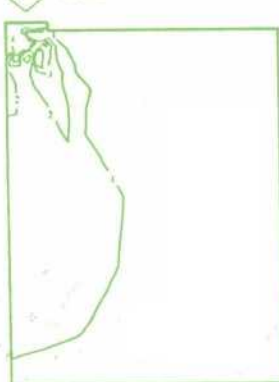
出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他、
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

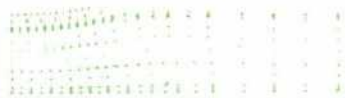
プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・プラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(関口・太田モデル)

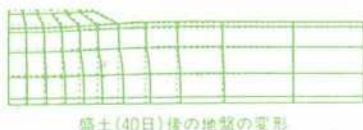
(荷重)



応力増分コンター(JeV)
(10日後)



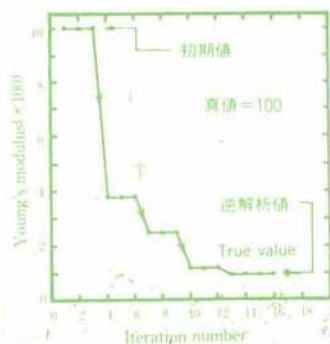
変位ベクトル図(40日後)



盛土(40日)後の地盤の変形



盛土(40日)後の地下水の流れと水頭
コンターおよび自由水面



ヤング率と繰返し回数の関係
逆解析によるパラメータの推定

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 CRC 総合研究所

西日本事業部

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL.(03)3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 営業担当:岩崎
(03)3665-9741 本社窓口:菅原