

地形判読自動化における地形特徴量としての フラクタル次元に関する研究

三好弘晃¹ 廣重法道¹ 鶴田直之¹

概要: 地形判読は地質学や火山学, 防災・減災と言った多目的で重要である。そこで, 地形の規模によらず日本全国を網羅するために地形判読の自動化を進めている。本研究では, 地形の輪郭および標高変化の複雑さを表現するフラクタル次元のボックスカウント算出法を提案し, その表現力について予備実験を行った。

キーワード: 地理データベース・空間データ管理, 分類学習, 複雑系数学 (カオスとフラクタル等)

A Study on Fractal Dimension as a Topographic Feature for Automated Terrain Interpretation

HIROAKI MIYOSHI¹ NORIMICHI HIROSHIGE¹
NAOYUKI TSURUTA¹

Abstract: Topographic interpretation is important for many purposes such as geology, volcanology, disaster prevention and mitigation. Therefore, we are working on the automated of topographic interpretation to cover the whole Japan regardless of the size of the terrain. In this paper, we proposed a box-counting method of fractal-dimension for representing complexity of the contours of terrain and the elevation change, and conducted preliminary experiments on its expressive power.

Keywords: Geographical databases, Classification, Fractal

1. はじめに

1.1 研究背景

地形判読とは、任意の地形を「地形種」に分類し、その起伏状態と形成過程を理解することであるとされる^[1]。地形種は、規模または形成過程によって分類されることが多い。例えば、カルデラは、規模がおおよそ 1km~10km で、形成過程は火山地形と分類され、これを理解することは地質学や観光、地質資源において重要である。また、地すべり堆は、規模が 100m~1km で、形成過程は集動地形と分類され、防災・減災や土地活用に応用できる。このように判読の対象地形は規模が多様であるうえ、判読の結果は多目的に利用さえる。そこで、全国の地形を網羅的に記録し、かつ多目的に利活用が可能なデータベースの構築が望まれる。これに対し、現状では利用目的別にデータベースが構築されていたり、ハザードマップのように居住区の周辺のみに地域が限定的であったりする。そこで、筆者らは、任意の規模で凹凸に基づいて地形を区分し、地形領域ごとに地形特性を記録した地理データベースの構築を目指している。

地理データベース構築の工程を図 1 に示す。

1. まず、国土地理院が発行する数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) を定期的にダウンロードし、DEM データから標高値を画素値とする画像を生成す

る。

2. 次に、画像処理のラプラシアンフィルタを適用して、地形を凹凸に基づいて区分し、地形領域ごとにデータベースに登録する。その際、地形の多様な規模と地形の複雑さを表現できるように、画像の尺度空間法を用いることによって地形領域の階層的な表現を得る。
3. 更に、地形領域毎に算出可能な地形特性の指標を記録し、機械学習 (教師なし学習) を適用して地形を分類する。最後に、災害の記録や学術的知見を教師データとして学習した人工知能により、未完読地形領域の自動判読を可能にする。

1.2 研究の目的と本稿の構成

本稿の目的は、前述の地理データベース構築工程の 3 において、地形領域毎に算出可能な地形特性の指標にフラクタル次元を用い、機械学習のクラスタリング手法を適用して地形を分類することである。藏田らの先行研究^[2]によれば、長い年月をかけて自然に風化もしくは浸食した地形における凹 (谷) 凸 (尾根) 領域の輪郭は、地形の規模によらず魚の骨あるいは雪の結晶のような形状になる。一方、土石流や地すべりのような集団地形移動の痕跡では、周囲とは特性の異なり丸みを帯びた孤立領域として検出される傾向にあることが示されている。したがって、地形領域の形状の複雑度を表す指標により、地形の分類が可能になる

¹ 福岡大学工学部電子情報工学科
Department of Electronics Engineering and Computer Science, Fukuoka

University

ことが示唆された。また、空間尺度法を用いた階層表現において、これらの特徴が顕著に表れるスケールも一つの特徴として利用可能であることが示唆された。

本稿では、蔵田らの先行研究に着想を得て、地形の複雑度を表現するフラクタル次元の算出方法を提案する。まず、2章

で3次元形状のフラクタル次元の算出方法を提案する。次に、3章で得られたフラクタル次元と地形領域の階層表現との組み合わせによる地形領域の特徴ベクトルの定義方法を提案する。4章で予備実験を行い考察をし、5章でまとめる。

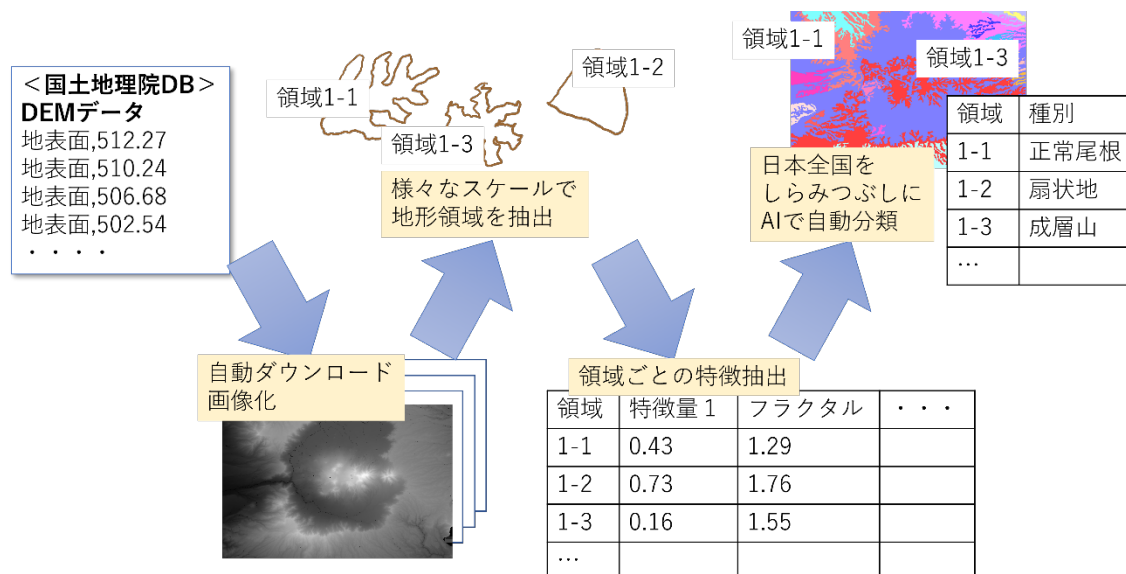


図 1 自動化された地形判読システム全体の概念図

2. 地形領域の3次元形状

1章で述べた地理データベース構築工程の2から受け渡されるデータは、図2に示すように、対象領域の標高を画素値とする濃淡画像（図2(a)）と、濃淡画像にLoG（Laplacian Of Gaussian）フィルタを適用して凹凸領域に区分した領域データ（図2(b)）である。

ここで、LoGフィルタとはガウシアンフィルタとラプラシアンフィルタを組み合わせたフィルタである。ラプラシアンフィルタは、画像の2階微分に相当するため、出力の正負の符号により画素を凹（谷）に含まれるものと凸（尾根）に含まれるものとに分けることができる。図2(b)では、白い領域が凸領域、黒い領域が凹領域である。

一方、ガウシアンフィルタでは画像の平滑化を行い、ノイズを低減する。地図においてガウシアンフィルタを使用する利点は、地形には風化等による細かな凹凸を消去して大まかな凹凸情報のみをとらえることができる点である。ガウシアンフィルタに用いる正規分布の標準偏差をスケールと呼ぶ。スケールを大きい方から小さい方へ変化させながら地形領域を抽出すると、地形領域の形状が徐々に複雑になるだけでなく、次の階層的性質を有する領域（空間尺度表現）が得られる。

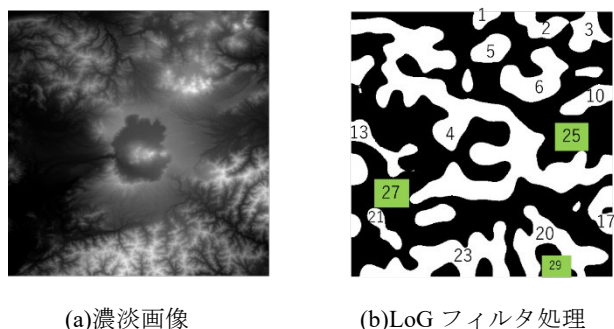
- 一つの領域が複数の領域に分かれることがある
- 領域の内部に新たな領域（凹領域の中に凸領域、凸領域の中に凹領域）が生じることがある
- 鞍状点（1方向には凸（凹）でありながら別方向には

凹（凸）であるような点）を除けば、別れていた領域が一つになることはない

- 1度生じた領域が消滅することはない

図2(b)は最も大きなスケールで得られたもので、ここでの独立した領域には通し番号のラベルが付加されている。そして、各領域に図2(c)に示すような空間尺度表現を得る。本稿での分類する単位となる地形領域は、ラベル付けされた領域で、特徴表現するのは個々の領域の空間尺度表現全体である。1つの地形領域の1つのスケールにおける地形領域データは、そのスケールでの領域区分を表す2値画像をマスク画像として、同スケールでぼかされた濃淡画像から標高データを切り出したものである。図2(d)に図2(c)に対応したぼかされた濃淡画像を示す。5番の地形領域のスケール $\lambda=8$ において切り出された標高データを3次元グラフ表現したものが図2(e)である。地表面の緯度・経度方向に対応した定義域を x, y 方向で表し、標高を値域として z 方向に表している。なお、図中の x, y の向きは、立体的な形状が把握しやすい方向に約180度回転している。

3章では、図2(e)に相当する一つの地形領域データからフラクタル次元を算出する方法と、同一地形領域の異なるスケールから得られたフラクタル次元をまとめてフラクタル次元ベクトルとし、地形領域間の類似度を定義する方法について提案する。



(a)濃淡画像

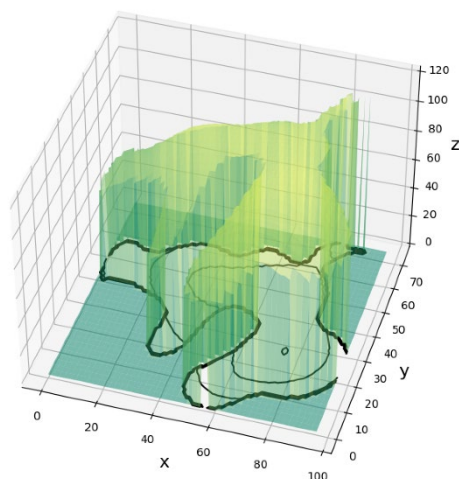
(b)LoG フィルタ処理



(c)領域 5 のスケールスペース表現



(d)(c)に対応したぼかされた濃淡画像



(e)スケール $\lambda = 8$ のとき(d)から(c)のマスク画像によって切り出された標高データの3次元表現

図 2 地形分類の基となるデータ (阿蘇周辺の例)

3. 3次元形状のフラクタル次元算出法の提案

3.1 フラクタル次元とボックスカウント法

フラクタルは複雑な形を記述するための概念で、フラクタルの特徴として次の3つの基本的性質が挙げられる。

1. 自己相似性
2. 非正数次元
3. 変数間に存在するべき常則

ただし、自然界で見られるパターンの多くは自己相似性が成り立たず厳密な数学的な定義が当てはまらないため、実用的な算出法が複数提案されている^[1]。ここでは、まず明石^[3]によるコッホ島の例を用いたボックスカウント法

を引用する (図 3 を参照)。まず、図 3 (a)のように計測する図形を一片の長さが r の方眼で覆い、図形領域を一部でも含む正方形の数をカウントし、これを $N(r)$ とする。次に、 r の値を変えながら $N(r)$ を求め、図 3 (b)のように横軸が $\log(r)$ 、縦軸が $\log(N(r))$ の両対数グラフ (log-log プロットと呼ばれる) を描く。これを直線近似した時の傾きからフラクタル次元 D が求まる。計測する図形が直線の場合に r を $\frac{1}{2}$ にして底 2 の対数を取ると $\log_2\left(\frac{r}{2}\right) - \log_2(r) = -1$ である。

これに対し、 $N(r)$ は 2 倍に増えるから $\log_2\left(N\left(\frac{r}{2}\right)\right) - \log_2(N(r)) = 1$ となっており、フラクタル次元は 1 になる。一方、図形が正方形領域の場合、 r を $\frac{1}{2}$ にすると、 $N(r)$ は 4 倍になるのでフラクタル次元は 2 になる。これに対し、コッホ島の場合には、図形の輪郭付近では 1 辺の長さ r の正方形を 2×2 の正方形に 4 分割した際にカウントされない正方形が現れるので、フラクタル次元は 1 と 2 の間の非整数次元を取るようになる。以上のような方法をボックスカウント法と呼ぶ。

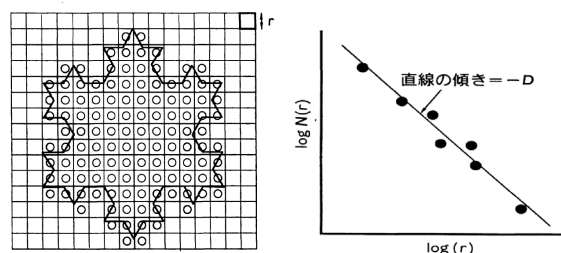


図 3 ボックスカウント法によるコッホ島のフラクタル次元算出の概念図

3.2 3次元地形領域へのボックスカウント法の適用

ここでは、図 2 (e)に相当する 3 次元の地形領域データからフラクタル次元を算出する。定義域 $x-y$ 平面内に関しては、前節で述べたボックスカウント法を適用する。図 4 に模式図を用いて例を示す。定義域の地形領域を一边が r の正方形 (図中では青色の正方形) で区分けし、図形の 1 部が含まれる正方形の数を数えてボックス数 $N(r)$ を求めていく。図中では、青色の正方形は 2 つともカウントされる。次に r を $\frac{1}{2}$ にして $N\left(\frac{r}{2}\right)$ を求める。右側の青色正方形内では、 2×2 分割された 4 つの赤色正方形はいずれもカウントされるため、この部分だけを考えればフラクタル次元は 2 となる。一方、左側の青色正方形内では、赤色正方形は 3 つしかカウントされないため、フラクタル次元は 2 に満たない。

これに、さらに地域 z 方向の変化の複雑さを表すフラクタル次元を追加する。地形の 3 次元形状のフラクタル次元の算出法の先行研究に太田ら^[4]の手法があり、これを参考にする。なお、太田らの手法では定義域 $x-y$ 平面内での形状の複雑さを考慮されていない点が本手法の違いである。

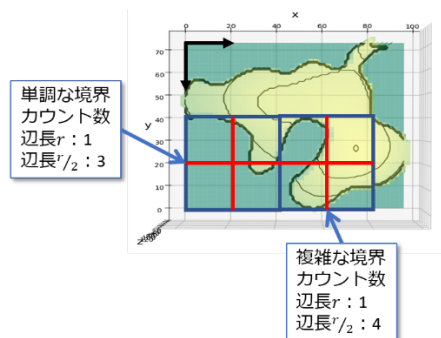


図 4 定義域方向のボックスカウント

図 5 に模式図を用いて例を示す．高さ方向に一边が r の正方形で分けし，分けられた中の標高値の最大値と最小値を含むボックスをカウントしていく．この時 z 軸のみに着目しカウントする．つまり，一边が r の青い箱の時にはカウントは 1 しかされないが， $\frac{r}{2}$ の赤線で分けした場合，それぞれのカウント数は青い箱の下に書いているカウント数となる．

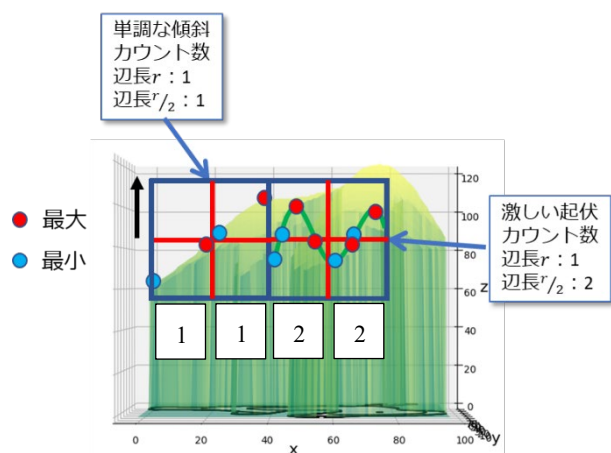


図 5 値域方向のボックスカウント

したがって，ここで示した例において単調な境界と単調な傾斜の組合せの領域のフラクタル次元は， $\log_2(3 \times 1) = 1.58$ ，複雑な境界と激しい起伏の組合せの領域のフラクタル次元は， $\log_2(4 \times 2) = 3.00$ のように求まる．

このようにして，ここで提案した 3 次元形状のフラクタル次元は 1 から 3 までの値をとる．また，例で示した領域 5 のスケール $\lambda = 8$ のときの $\log$ - $\log$ プロットを図 6 に示す．プロットされている点がよく 1 本の直線に乗っていることから，本手法がフラクタルの特性をよくとらえた算出法になっていることがわかる．

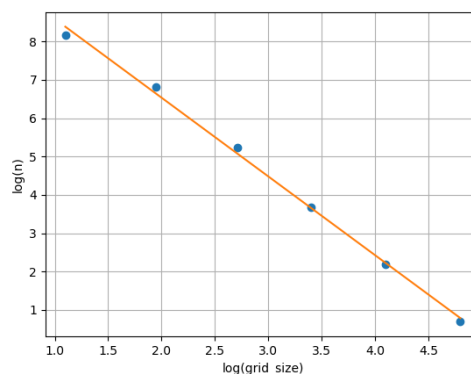


図 6 領域 5 のスケール $\lambda = 8$ のときの $\log$ - $\log$ プロット

3.3 空間尺度表現された地形領域の特徴量

フラクタル次元は，1 つの地形領域の 1 つのスケールにおける地形領域データに対して 1 つ求まる．したがって，1 つの地形領域に対してスケールを変化させると複数のフラクタル次元が求まる．領域 4 においてスケールを変化させたときのフラクタル次元の変化を図 7 に示す．スケールが大きくなりばかされた地形が単調になるにつれてフラクタル次元も単調に減少していることがわかる．フラクタル次元を $f(\lambda)$ と表すことにし，複数のスケールから得られたフラクタル次元をまとめてベクトル表現する．本稿では領域 i の $f_i(\lambda)$ から $f_i(\lambda)$ の平均値 $\bar{f}_i$ をあらかじめ引いておいた時のベクトルをフラクタル次元ベクトルと呼び F_i で表し，1 つの地形領域の特徴量とすることを提案する．

$$F_i = \begin{pmatrix} f_i(4) - \bar{f}_i \\ \vdots \\ f_i(16) - \bar{f}_i \end{pmatrix}$$

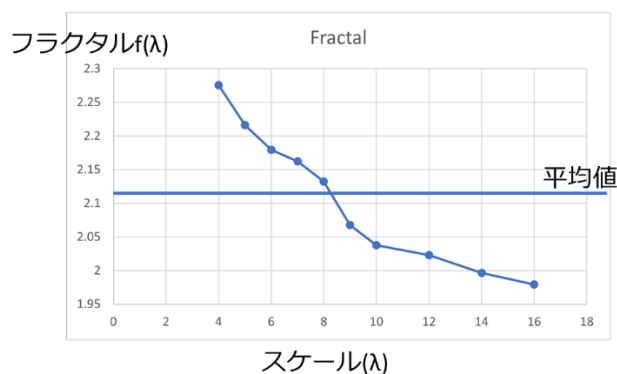


図 7 領域 4 のスケール変化に伴うフラクタル次元の変化

二つの地形領域の類似度には，コサイン類似度を用いることにする．

$$-1 \leq \cos(F_i, F_j) = \frac{F_i \cdot F_j}{\|F_i\| \|F_j\|} \leq 1$$

4. 検証実験

4.1 クラスタリングの結果

図 2 に示した阿蘇地域に対して、地形領域のクラスタリングを試みた。クラスタリングには、階層的 (Ward 法)、非階層的クラスタリング (k-means 法) を用いた。図 8 に Ward 法の結果のデンドログラムを、図 9 に k-means 法の結果を示す。図 9 では、フラクタル次元ベクトルの主成分分析を行い、第 1 から第 3 主成分までを用いて 3 次元表示した。いずれの結果からも共通して A から D に示す 4 つのクラスが検出された。以下、それぞれのクラスについて分析を行い、それぞれの地形的性質を考察する。

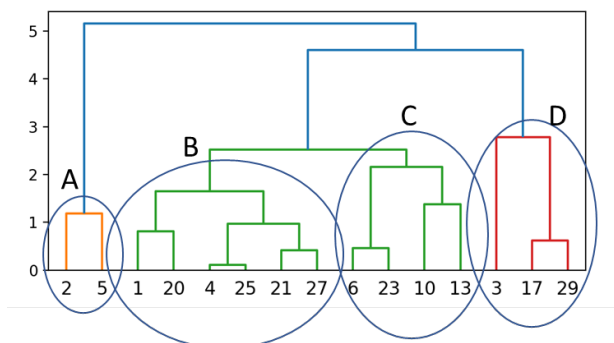


図 8 階層的クラスタリング Ward 法の結果デンドログラム (横軸が領域番号)

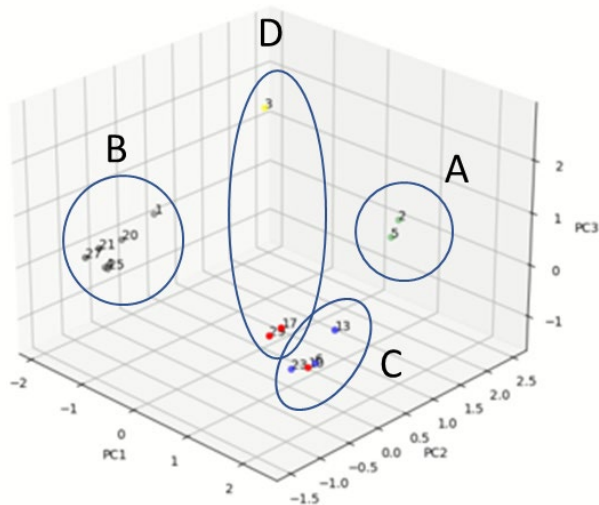


図 9 非階層的クラスタリング (k-means 法) の結果

4.2 クラス A の分析と考察

図 10 に示すようにクラス A のフラクタル次元のグラフは、どちらも逆 V 字型になっていた。このようになっている理由を図 11 の領域 5 に対して考察した。 $\lambda=16$ から $\lambda=10$ にかけては、単調な形状が徐々に複雑になりフラクタル次元も上昇する。ところが、 $\lambda=4$ では、 $\lambda=16$ の時の形状を縮小したような (相似な) 単調な複数の領域に分割されて $\lambda=16$ と同じ次元に戻ったと考えられる。

また実際に阿蘇周辺の地形に当てはめた図 12 を見ると、

どちらの領域も久住周辺に位置していることが分かった。

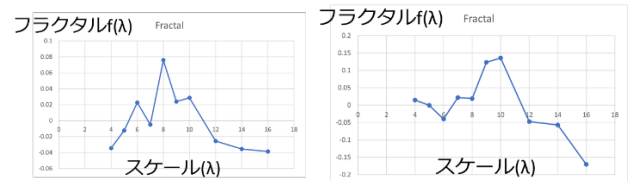
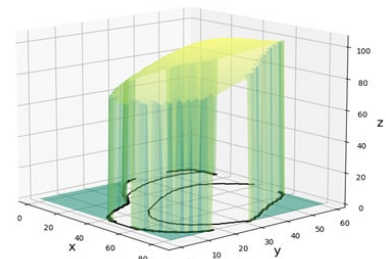
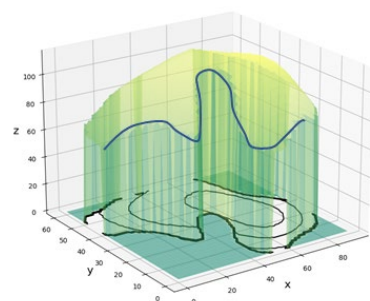


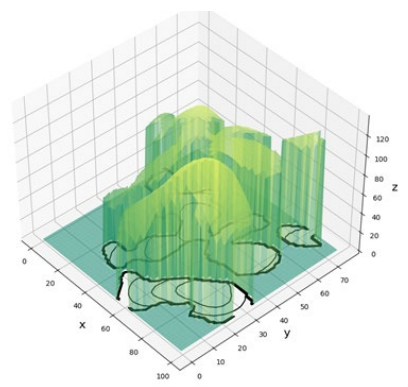
図 10 領域 2 (左) と領域 5 (右) のフラクタル次元



$\lambda=16$: 形状も起伏も単調



$\lambda=10$: 激しい起伏の変化



$\lambda=4$: スケール 16 を縮小したようなものに分割

図 11 領域 5 のスケール毎の 3D 図

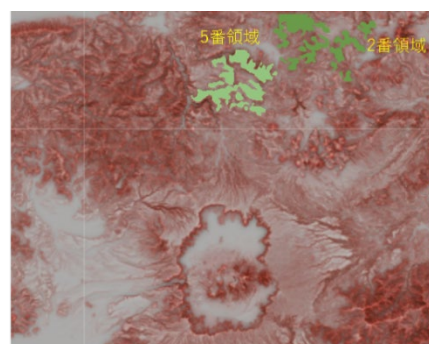


図 12 阿蘇周辺での領域 2 と領域 5 の位置関係

4.2.1 クラスタ B の分析と考察

図 13 に示すようにクラスタ B のフラクタル次元のグラフは、左上から右下にかけて下っていく自然な形状といえる。また実際に阿蘇周辺の地形に当てはめた図 14 を見ると、どちらの領域も阿蘇周辺の広範囲に位置していることが分かった。すなわち、多くの領域では自然な風化により地形が形成され、局所的に特異な現象（例えば火山の隆起や地すべり）によって形成された地形が点在するのだと考えられる。

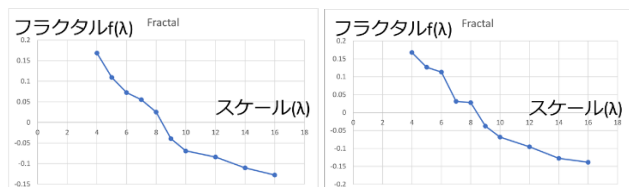


図 13 領域 4 の (左)と領域 25(右)のフラクタル次元

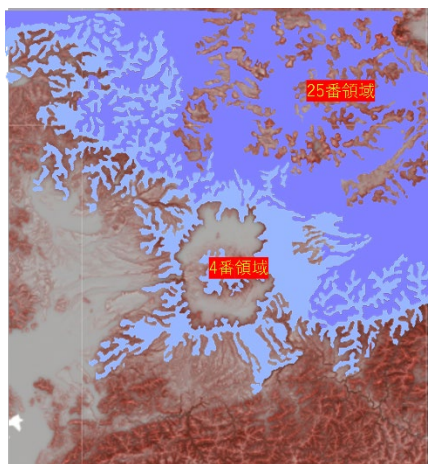


図 14 阿蘇周辺での領域 4 と領域 25 の位置関係

4.2.2 クラスタ C の分析と考察

図 15 に示すようにクラスタ C のフラクタル次元のグラフは、クラスタ B のグラフと似ているが、クラスタ B のグラフがやや下に凸なのに対し、クラスタ C のグラフは上に凸になっている。また実際に阿蘇周辺の地形に当てはめた図 16 を見ると、6 番領域は久住付近に、23 番領域は国見岳付近に位置していることが分かった。久住の成り立ちを調べたところ、溶岩流からできていることが記されていたが、国見岳はその分布には当てはまらなかった[5]。

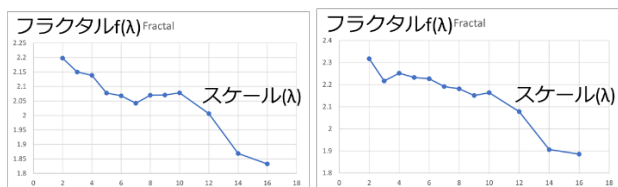


図 15 領域 6 (左)と領域 23(右)のフラクタル次元

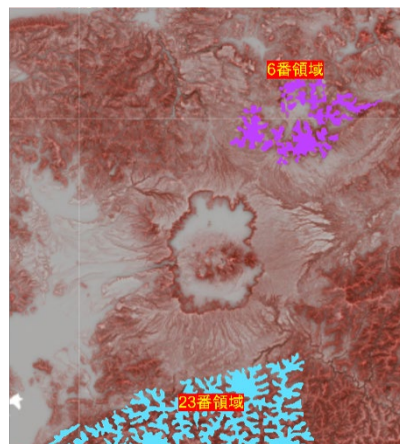


図 16 阿蘇周辺での領域 6 と領域 23 の位置関係

4.2.3 クラスタ D の分析と考察

図 17 に示すようにクラスタ D のフラクタル次元のグラフは、V 字型ようになっておりクラスタ A とは真逆の結果となった。また実際に阿蘇周辺の地形に当てはめた図 18 を見ると、どちらの領域も右下に位置していて、魚のような形状になっていることが分かった。

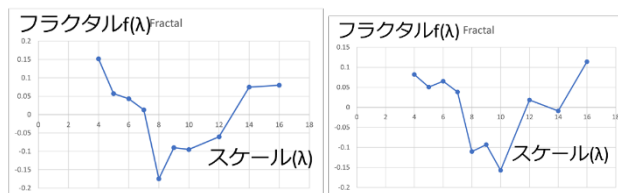


図 17 領域 17 (左)と領域 29(右)のフラクタル次元

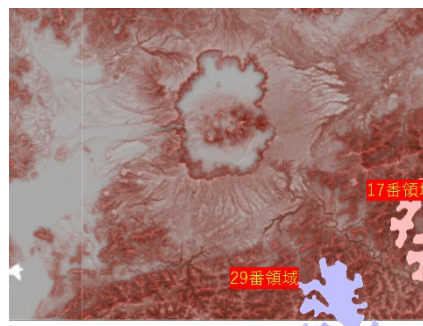


図 18 阿蘇周辺での領域 17 と領域 19 の位置関係

5. 結論

5.1 まとめ

本研究では、地形判読の自動化を目指し、地形領域毎に算出可能な地形特性の指標として新たなフラクタル次元の算出法を提案し、機械学習のクラスタリング手法を適用して地形を分類した。判読の対象となる地形領域に、矩形領域や境界があいまいな地域ではなく、地形の凹凸に注目した区分を用いている。また、画像処理の尺度空間表現を用いて、1 つの地形領域を多次元の特徴ベクトルによって表

現している. この手法を阿蘇地域に適用し, 地形領域を 4 つのクラスタに分類されることを確認した.

分析の範囲や最大スケールは, 火山噴火や火砕流による地形の形成過程の判読が目的の場合には大規模に, 土石流や地すべりのような頻繁に起こる災害の防災・減災が目的の場合には, それより小規模になると考えられる. 今後は, 地質学や防災・減災学の知見と照合しながら, 本手法の有効性を検証することが課題である.

謝辞 福岡大学 領域別研究チーム「情報科学教育のための九州の活火山における画像認識を活用した GIS 開発」の成果の一部である.

参考文献

- [1]月刊『測量』別冊 いまさら聞けない地形判読, 公益社団法人日本測量協会, 2019 年
- [2]蔵田, 鶴田, 廣重, 三次元地図データを用いた地形判読の自動化に関する研究—扇状地・地すべり・斜面崩壊—, 火の国情報シンポジウム 2020, C3-5, 2020.3
- [3]明石友行, フラクタル理論の計測, 制御への応用, 32 巻, no.2, pp.156-157, Feb.1993
- [4]Ohta Takahiro, Three-dimensional geomorphological analysis using fractals for prediction of prediction of debris flow, Geoinformatics, Vol.7, Nos.1-2, p69-76 (1996)
- [5]火山の活動による地形
https://www.gsi.go.jp/kikaku/tenkei_kazan.html#%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%87%E3%83%A9%E6%B9%96%E3%83%BB%E7%81%AB%E5%8F%A3%E5%8E%9F%E6%B9%96
(参照 2022.2)