

II-24

衛星画像データを用いた流域フラクタル構造

北海道大学 正員 道口 敏幸

1.はじめに

降雨流出現象における流域特性解析は、防災工学や水資源工学の観点から重要な課題である。著者らは流域内の河道網形状が種々の流域特性を総合的に表し得るものと考え、河道網に着目した流域特性把握の研究を行ってきた。この結果、流域河道網のフラクタル次元が流出量と密接な関係にあることが明らかとなった。この手法では複数流域での比較検討を必要とし、この点、地球探査衛星画像データのような大気圏外から広範囲を同時期(季節変動)、同時刻(太陽の位置)条件のもとで収集されたデータが有効である。さらに衛星データは地上データが少ない未開発地域(特に海外)でも入手可能であり、衛星画像データの利用法確立が重要である。

一方、最近のパソコンに見られるようなデータ処理能力の増加にともない、衛星画像のような大容量データを身近なコンピュータで取り扱うことが可能となっている。本論文で示されるような画像処理にはCG(コンピュータグラフィックス)が必要不可欠であり、パソコンでの簡単なCG処理が有効な手段である。

以上のような点を踏まえ、本論文は衛星データの画像処理手法とそれにより得られる流域フラクタル次元について検討を加えたものである。

2.衛星画像データ

現在、地球周回軌道上には地表探査目的で、種々のセンサーを搭載した衛星が存在しており、今後、新たな衛星も打ち上げられる予定である。衛星搭載センサー分解能やデータ入手を考え合わせ、本論文ではリモートセンシング技術センター提供による日本の地球観測衛星MOS-1(Marine Observation Satellite-1)のデータ利用を計った。MOS-1は高度約909Kmの太陽同期準回帰軌道(通過地点の太陽高度が一定)を回帰日数17日で観測が行われる。他の観測衛星同様に複数のセンサーが搭載されているが、これらを含めMOS-1の詳細については参考文献を参照して頂くとし、ここでは今回解析に使用した可視近赤外放射計(MESSR: Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer)について簡単な説明にとどめる。MESSRは表-1に示されるような諸元を持ち、ランドサットに搭載されている多重スペクトル走査放射計(MSS: Multispectral Scanner)と同様な波長帯での観測だが、地上空間分解能はランドサット80mに対し、MOS-1は50mである。使用したデータは撮影年月日が1993年5月7日、PATH-21、ROW-59(パス(南北)、ロウ(東西)は衛星軌道位置を示す)で江別市が中央に位置し、石狩平野全域が含まれる。図-1にフォールスカラー(R:4,G:2,B:1)表示の画像を示す。データは種々の形態で得られるが、今回はCCT(Computer Compatible Tape)で入手した。このデータから地形情報の整備されている定山溪ダム流域を中心に

センサー	バンド	観測波長帯域 (μm)	電磁波帯域
MESSR	1	0.51~0.59	可視域 緑
	2	0.61~0.69	可視域 赤
	3	0.72~0.80	近赤外域
	4	0.80~1.10	近赤外域

表-1 MOS-1搭載センサー諸元

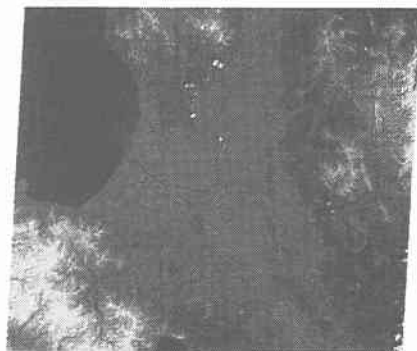


図-1 フルシーンフォールスカラー

640X400Pixel（画素）を4バンド分抽出し、基礎データとして使用する。図-2にバンド3（近赤外では水域の反射率が陸域に比べ極端に低下し、両者の区分に利用）の抽出画像データと定山溪ダム管理施設図（1/5万地形図）から流域界と主河道部をデジタイザーによりサンプリングし、座標変換後合成した画像を示す。これを見ると流域内の複雑に入り組んだ谷や分水嶺が把握でき、この状態を抽出することで流域特性を表現しようとするものである。前出したようにMESSRの空間分解能は50mであり、同地域の10mメッシュ標高値を基準にした50m標高値データとバンド3の受信強度を三次元表示したのが図-4、5である。

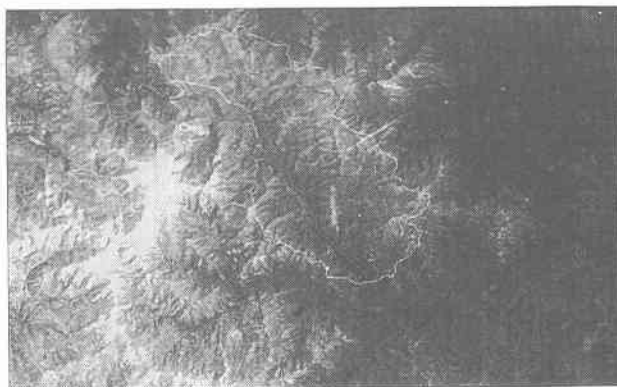


図-2 衛星画像データと地図データ合成図

受信強度の流域内での変動は標高値より小さいものの、尾根部で強く谷部で低くなり、標高値データと同等な特徴を有することが図からわかる。

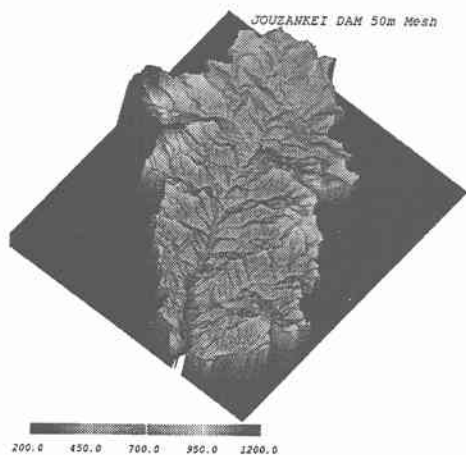


図-4 ダム流域内50m標高値

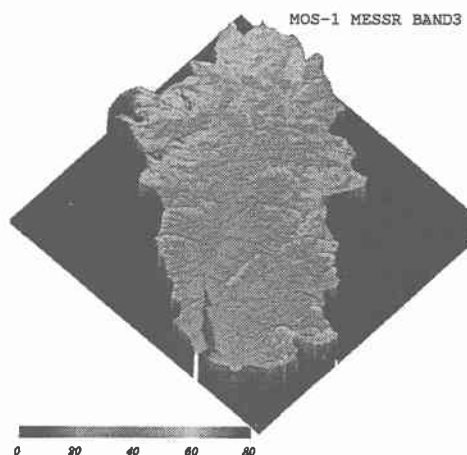


図-5 ダム流域内バンド3反射強度

3. 流域画像の特徴抽出

図-2に示した定山溪ダム流域を含む、MESSR Band3画像データを対象に流域の特徴抽出のために画像処理を行う。着目した特徴は流域内の谷部（図-2では周囲より強度が低い線部）であり、これをより明確にし、抽出する必要がある。画像処理は目的別に色々な手法に分かれているが、ここでは空間フィルタリング（Spatial Filtering）を適用する。これは入力画像に対し、何らかのフィルタ関数をあてはめ目的とする出力画像を得るものであり、次式のように表される。

$$Y(i, j) = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n-1} X(i - [n/2] + k, j - [n/2] + m) f(k, m) \quad \dots (1)$$

ここで、X:入力画像、f:フィルタ関数、Y:出力画像、[]:整数化

フィルタリングの幅nを大きくすると入力画像の持つ特徴が失われること、さらにこれに必要な計算量が増加する等の理由により一般的にn=3が用いられる。フィルタもその目的別に種々の関数が提案されており、ここでは本論文で使用したフィルタ関数のみを表-2に示す。いずれのフィルタとも画像の鮮鋭化を目指すものであり、図-2の画像に対してフィルタリングを行った出力画像を図-6~8に示す。ハイパスフィルタは図-2のオリジナル画像に比べ、

フィルタ名	フィルタ関数	効果
Highpass	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$	エッジ強調 鮮明画像
Laplacian	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	空間微分 二次微分
Sobel	$\text{Max}(Y_A , Y_B)$	空間差分 一次微分
Y:フィルタリング 出力値	$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $B = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	

表-2 使用したフィルタ関数

より谷部が鮮明になっている。隣り合う画像の変化率のみに着目するラプラシアン、ソーベル両フィルタは画像強度の変動幅が狭くなるが、尾根、谷部の線が強調されるのがわかる。また、空間二次微分をとったラプラシアンはソーベルに対し、線が細く見える。実際に流域特性を求めるために使用する画像は上記フィルタの組み合わせを含めて検討を行った。

4. 流域フラクタル次元

流域特性を求めるため前出のフィルタリング後の画像からダム流域のみを抽出し、適当な閾値により二値化を行い、この画像に対してフラクタル次元を求めるBox Counting法を適用する。フラクタルとは対象とする図形の「自己相似性」を表す非整数値の次元により表され、この次元を求める手法の一つがBox Countingである。対称図形領域を基準となる大きさの箱(Box)で覆い、この箱の中に対象物（具体的には二値化図形の1の部分）が存在する箱を数え上げる(Counting)もので、ボックスサイズを徐々に小さくすることで図形の全体構造と微細構造との相似性が表現できる。数式的には(2)式のように表され、実際には両対数紙上で横軸にボックスサイズ、縦軸にカウント数をプロットし、その勾配によってフラクタル次元を表す。言い換えると対象とする図形がフラクタル構造を持つかどうかの判断は、両対数紙上でのプロットが直線的に分布する事で行える。

$$N(\delta) \approx \delta^{-D} \quad \dots (2) \quad \text{ここで、} \delta: \text{ボックスサイズ、} N: \text{カウント数、} D: \text{フラクタル次元}$$

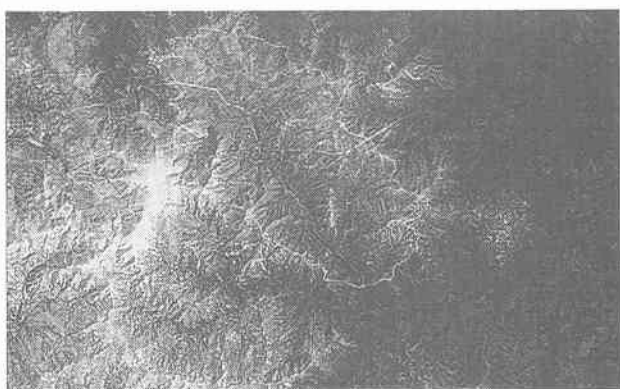


図-6 Highpass Filtering

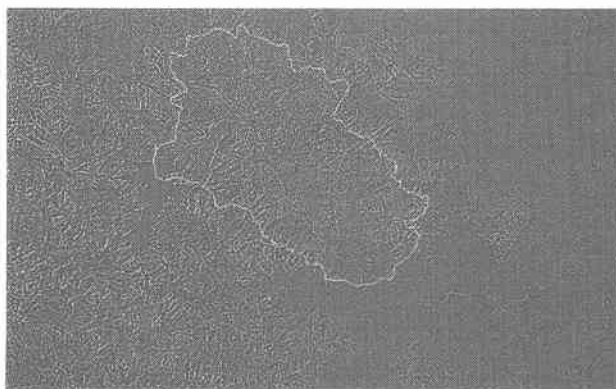


図-7 Laplacian Filtering

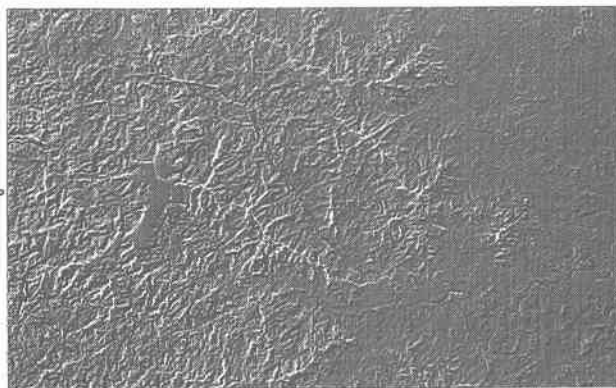


図-8 Sobel Filtering

図-9は図-2に示したMESSR Band3の画像に対し、閾値である輝度値（受信強度）を低い方から徐々に変化させて得られる二値化画像にBox Counting法を適用したものである。前述したように各閾値においてプロット点が直線に並び、対象とした図形がフラクタル構造を有することがわかる。図中において閾値Maxとは流域内全てのPixelを対象とした場合であり、流域外周形状が対象となる。図-10は実際に閾値20で計算に用いた二値化画像で、これを見るとダム湖及びその周辺の低地のみが解析対象となっており、得られたフラクタル次元が流域全体を表す指標とは考えられない。図-4、5に示したように得られた輝度値が標高値と同様な傾向を示すことを考慮すると、直接輝度値を対象に閾値を用いる手法では全流域特性を表わすことは不可能であると考えられる。そこで、前出したLaplacian、Sobelのフィルタリング技法を導入することで流域全体を取り扱うことを目指す。両フィルタは周囲との輝度値の変化を示す相対量を出力するため、低輝度のダム湖周辺と高輝度の谷頭部が同等に扱える。図-7、8を見ると図-2、6に比べて画像濃淡の幅が狭く、輝度変化部分が流域全体で同等に表現されることが分かる。図-11、12にLaplacianとSobelフィルタリング後の画像に対し、前述した図-9と同様なBox Countingを実施した結果を示す。両フィルタとも空間微分であるがSobelが一次に対し、Laplacianは二次微分である。図-6、7、8で定山溪ダム流域内の中央やや左上部分に8の字形の部分札幌国際スキー場のグレンデであり、Laplacianが低輝度（黒く沈んで）に対し、Sobelは高輝度（白く突出して）と見える。このため、図-11、12中に示したように閾値の取り扱いとは両者が逆となっている。また、閾値は流域内での輝度値分布において、端からほぼ5%刻みで決定した。

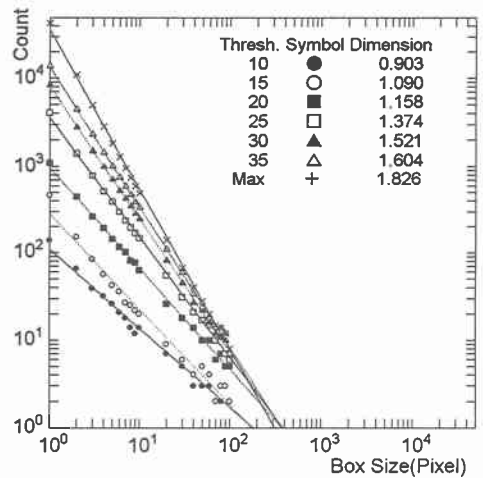


図-9 MESSR Band3 Box Counting

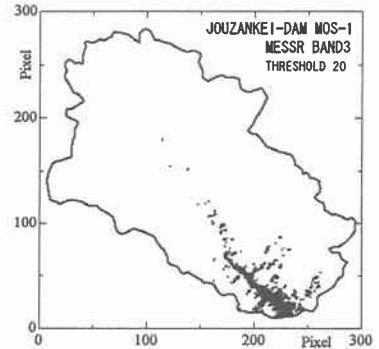


図-10 閾値20の二値化画像

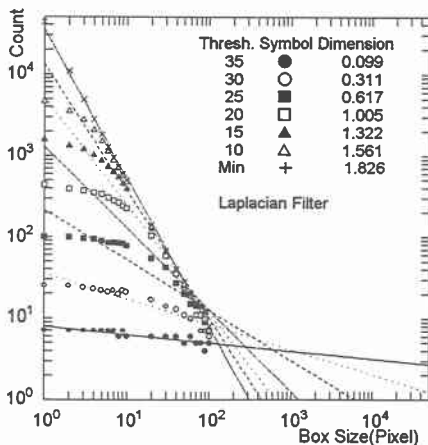


図-11 フィルタリング後画像 Box Counting

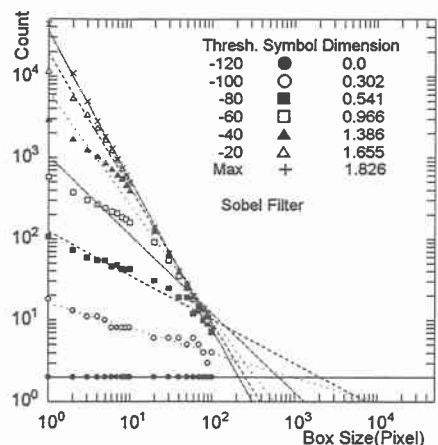


図-12 フィルタリング後画像 Box Counting

両図を見ると閾値が大きいき（図中上位）はフラクタル次元が0（点構造）に近く、閾値を小さくすると次元は2（面構造）に近づく。前出したように閾値を最小とし流域内全体を対象とするとフラクタル次元は1.826で流域外周を表し、逆の場合は流域内で閾値を超える点が数カ所となり、両者とも流域内の特徴を表しているとは考えられない。図-12の閾値-120では最大から最小までの全てのボックスサイズにおいて閾値を超えた点が存在するのは2であり、これは平面的に100Pixel離れた2点のみが閾値を越えたことを示している。マンデルブロは「フラクタル幾何学」中で対象物を巨視的観点から徐々に微視的観点へ移行する場合、我々はその物体を表す次元を変えて取り扱っていることを述べており、閾値により流域特性フラクタル次元が変動することも同様な観点により説明される。実際に流域特性を表すフラクタル次元を求めるための閾値は、流域内全体に分布する複数のPixelを生じさせる値であると考えられ、この値をどのように決めるかが最も重要な問題である。最適閾値を決定する方法については後述するが、その前に図-11、12のBox Counting結果における新たな問題点について検討を加える。それは図中、流域全体に複数点を選出すると考えられる中間閾値の場合、途中に明確な屈曲点が生じており、この分布からはフラクタル次元を定義できない。これも前出した測度の違いによるものと考えられ、Box Sizeが大きき時には次元が大きき（面）、小さくなると次元が小さき（点）になっている。Box Countingにおいて、直線的なプロット点を得るためにさらに画像変換を行った。これは単純に閾値のみで二値化を行うと、着目すべき連続点である谷部等に加え、ノイズのように全体に点々と閾値を超える点が生じる。このため縦横斜め方向に三点連続した点のみを抽出するリニアメントを行い、ノイズ除去後画像にBox Countingを適用してフラクタル次元を求めた。図-13は元画像にエッジ強調のハイパスフィルタをかけ、その出力画像に流域全体で相対的な変化量をとるソーベルフィルタをさらにかけた出力画像にリニアメント変換を行った画像の結果であり、図を見ると中間閾値において直線分布状況の改善が見られる。

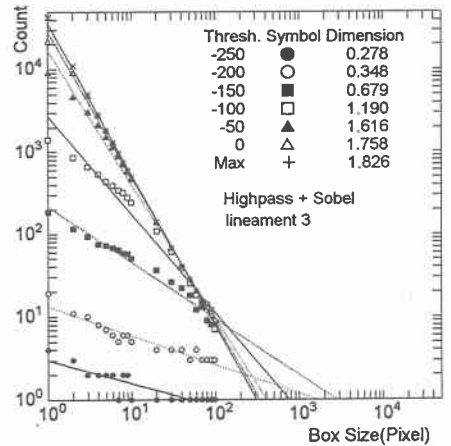


図-13 複数フィルタリング適用画像 Box Counting適用結果

5. 最適閾値決定法

図-9の際にも述べたように対象流域内にダム湖のような輝度値の小さな点が集中した場合、閾値をどのように変化させてもBox Countingの結果は直線分布しており、これにより得られるフラクタル次元の変化は閾値によるダム湖形状の変化を表している。このことは各種フィルタを施し、流域全体で相対的な値に変換した画像においても同様であり、図-13に示したBox Counting結果からこの流域を示すフラクタル次元を決定するのは難しい問題である。そこで、本論文では以下の評価指標A. I. (Appraisal Index) を用いて最適閾値を決定する。

$$A.I. = \frac{P_{CV}}{R_{SE}} \quad \dots (3) \quad \text{ここで} \quad P_{CV} = \frac{L_s}{L}, \quad R_{SE} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta_i^2}$$

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i, \quad L_s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}, \quad L_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}$$

$\Delta_i = \log(C_i) - \{D \log(B_i) + \beta\}$, B_i, C_i : ボックスサイズとカウント値、 D, β : 最小二乗法回帰係数
 P_{CV} は二値化されたPixelの平均位置 x_c, y_c からの距離の変動係数を、 R_{SE} はBox Counting結果に対する直線回帰式の二乗誤差を表している。対象とすべきPixelが流域全体に広く分布し（距離の変動係数が大きく）、フラクタル構造を示す回帰直線とBox Counting結果の適合が良い（二乗誤差が小さい）ほど評価指標は大きくなる。図-14に元画像と各フィルタリング画像に対し、前出のリニアメントを施した場合の評価指標計算結果を示す。横軸は閾

値を変えることで得られる二値化画像pixel数を全体との比率で表している。定山溪ダム流域でMOS-1 MESSRを対象にした場合の総Pixelは43190点である。図-14より、このデータの場合における最適閾値はハイパス+ソーベル+リニアメントを施した画像に対し、最大評価指標528.3となる点であることが分かる。この際の閾値は-177、フラクタル次元は0.475であり、このように提案した評価指標を用いることで利用すべきフィルタリングの種類とその際の閾値を決定できる。

6. おわりに

以上述べてきたように衛星画像データから流域フラクタル次元を求めるための画像処理技法と二値化画像を得るために必要な閾値決定法を明らかにした。流域形状から流域特性を決定するためにフラクタルを用いた最大の利点はデータの一部が欠落していても値を求めることが可能な点である。これは衛星データによる解析対象が山岳地域であり、領域全体に雲が無いことは希であることを考慮するとデータ利用の点で非常に有利であると言える。本論文で示した手法は途についたばかりで多くの問題が残っており、今後の課題としては以下のような点が挙げられる。

- ①季節変動調査 標高値と反射強度が同等な特徴を示すことが、5月7日撮影で標高値が高い地点の残雪（反射強度が強い）の影響である可能性があり、夏期、初秋の雪のない季節データでの検証が必要である。
- ②分解能比較 MOS-1 MESSRは地上分解能が50mであり、ランドサットTMで30m、SPOT PAmodeで10mの分解能が得られる。今回の手法、結果と分解能の関係を明らかにする必要がある。
- ③アクティブセンサー利用 地球資源探査衛星JERS1、ERS1はアクティブセンサーである合成開口レーダ（SAR）を搭載している。このセンサーは地上分解能が12.5mと小さく、雲の影響を受けない等有利な点もあるが、マイクロ波を斜め方向に出すため地上起伏の裏側が探査できず、後方に倒れたように画像が歪む。以上の点を考慮してデータの利用法を検討する必要がある。
- ④流域特性との関係 得られたフラクタル次元と流出量等の流域特性の関係を検討する。このため多くの流域で解析を行う必要がある。

【謝辞】 本研究は平成7年度科学研究費補助金（奨励研究(B)07914004）の援助を受けました。また、データの収集において北海道開発局開発土木研究所環境研究室の協力を受けました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 田中・藤田・清水・道口：河道フラクタル構造から見た流域特性について、平成6年度道支部論文報告集、1995
- 2) 藤田・道口・北條他：定山溪ダム流域における小河川のフラクタル構造、平成4年度道支部論文報告集、1993
- 3) B. マンデルブロ：フラクタル幾何学、広中平祐訳、日経サイエンス社、1985
- 4) 画像解析ハンドブック、東京大学出版会、1992
- 5) 図解リモートセンシング、日本リモートセンシング研究会編、1992
- 6) 坪根治広：パソコンによる人工衛星データの画像処理、1991
- 7) 地球観測データ利用ハンドブック-MOS-1編・改訂版一、リモート・センシング技術センター編、1987
- 8) MOS-1 MESSRデータ CCTフォーマット説明書 第2版、リモート・センシング技術センター編、1989

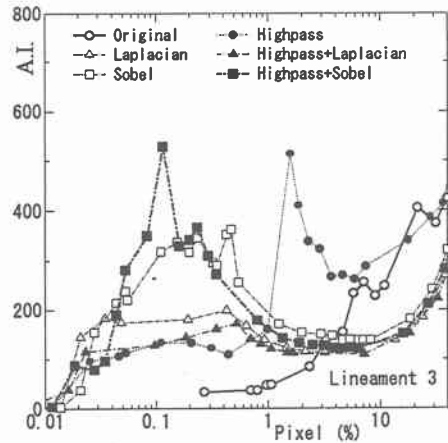


図-14 各種画像における評価指標