

高解像度衛星画像と数値標高モデルを用いた 地形・地盤分類メッシュマップ細密化手法の改良

Revised Method for Detailed Mapping of Engineering Geomorphologic Classification Using High Resolution Satellite Image and Digital Elevation Model

石井 一徳¹, 翠川 三郎¹, 三浦 弘之¹

Kazunori ISHII¹ Saburoh MIDORIKAWA¹ and Hiroyuki MIURA¹

¹東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻
Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

For detailed seismic hazard mapping, the revised method to construct the 50m-mesh engineering geomorphologic classification map is proposed using the existing 250m-mesh map, high resolution satellite (QuickBird) image and digital elevation model (DEM). The spatial spectral characteristics of the satellite image at different geomorphology units are examined by using two-dimensional Fast Fourier Transformation (2D-FFT). The 50m-mesh map for Tsurumi ward, Yokohama is constructed based on the spectral decays computed by 2D-FFT and the topographic information for each geomorphologic unit. The map is compared with the manually classified map, showing the accuracy rate of 85% over the area.

Keywords : *engineering geomorphologic classification map, high resolution satellite image, digital elevation model, two-dimensional Fast Fourier Transform*

1. はじめに

ある地域において地震ハザードマップを作成するためには、その地域の地盤増幅率の分布を把握する必要がある。地盤増幅率分布は、地形・地盤分類から簡便に推定でき、日本全国を対象として 1km メッシュの地形・地盤分類の整備が行われてきた^{1), 2)}。しかし耐震補強のような住民の個々の防災対策を促すための大縮尺の地震ハザードマップを作成するには、50m メッシュマップの作成が推奨されている³⁾。

50m メッシュのような細密な地盤情報をデータ化するには、旧版地形図読図や空中写真判読といった従来の作業では多大な労力と時間を要してしまう。そこで、簡便にデータ化するための方法として、数値標高モデル (DEM) や衛星画像を用いて自動的ないし半自動的に分類する試みが行われてきた。最近では、大都市圏の一部において国土地理院より 5m メッシュ DEM が刊行されており⁴⁾、高分解能データの入手は容易になりつつある。これらの研究では地形を低地、台地、山地などの大分類単位のみを分類し^{5)~9)}、低地部を細分類することは行われていないものが多い。古い土地利用と衛星画像から土地利用の変化を抽出することで詳細な地盤分類が行われているもの¹⁰⁾もあるが、旧版地形図の数値化が必要で、作業量を考えると広域での適用は困難である。

これらを踏まえて、石井他(2007)は、近年各地で利用可能になりつつある高分解能の DEM による地形情報に、土地被覆状況を反映した衛星画像からの情報を加えて、分類規則を作成し、若松・松岡(2005)の 250m メッシュの地形・地盤分類データ¹¹⁾を 50m メッシュデータに細分化することを行い、おおむね良好な結果を得ている¹²⁾。ただし、低地部では分類精度が悪いものも残されている。

この研究では、15m ないし 30m の ASTER 画像のピクセル値を用いて分析を行っている。しかし、実際の地物には 15m 以下の規模のものも多数存在する。そのため、ひとつのピクセル内に複数の地物が混在し、各地物のピクセル値が単一のピクセル値として平均化されてしまうというミクセル問題により、地形・地盤と関係のある土地利用を正しく評価できていない可能性がある。

そこで、地物をより適切に評価できる分解能 1m 程度の高解像度衛星画像を利用することが考えられる。高解像度衛星画像では、建物や樹木等の地物は、複数のピクセルから構成される。このため、衛星画像から土地利用を評価するには、ピクセルを 1 点ごとに解析するのではなく、ある広がりをもった領域内におけるピクセル値の変化を評価する必要がある。画像解析の分野では、画像の周波数解析を行い、画像中のものの見え方のパターンを明らかにする方法が行われている¹³⁾。例えば、北垣らは、2 次元フーリエ変換を用いて、打ち放しコンクリートの視覚情報変化の定量的な分析を行い、汚れの分布具合により周波数特性が異なることを示している¹⁴⁾。

本研究では、高解像度の衛星画像の 2 次元フーリエ変換の結果と土地利用や地形・地盤分類との関係を検討した上で、2 次元フーリエ変換の結果と DEM に基づいて低地部での分類規則を見直し、地形・地盤分類の細密化手法の改良を図ることを目的としている。

2. 検討方法

対象地域は、横浜市鶴見区とした。横浜市鶴見区は、台地から低地、埋立地と様々な地形・地盤を有する地域であり対象範囲とした。図 1(a),(b)には、対象地域の

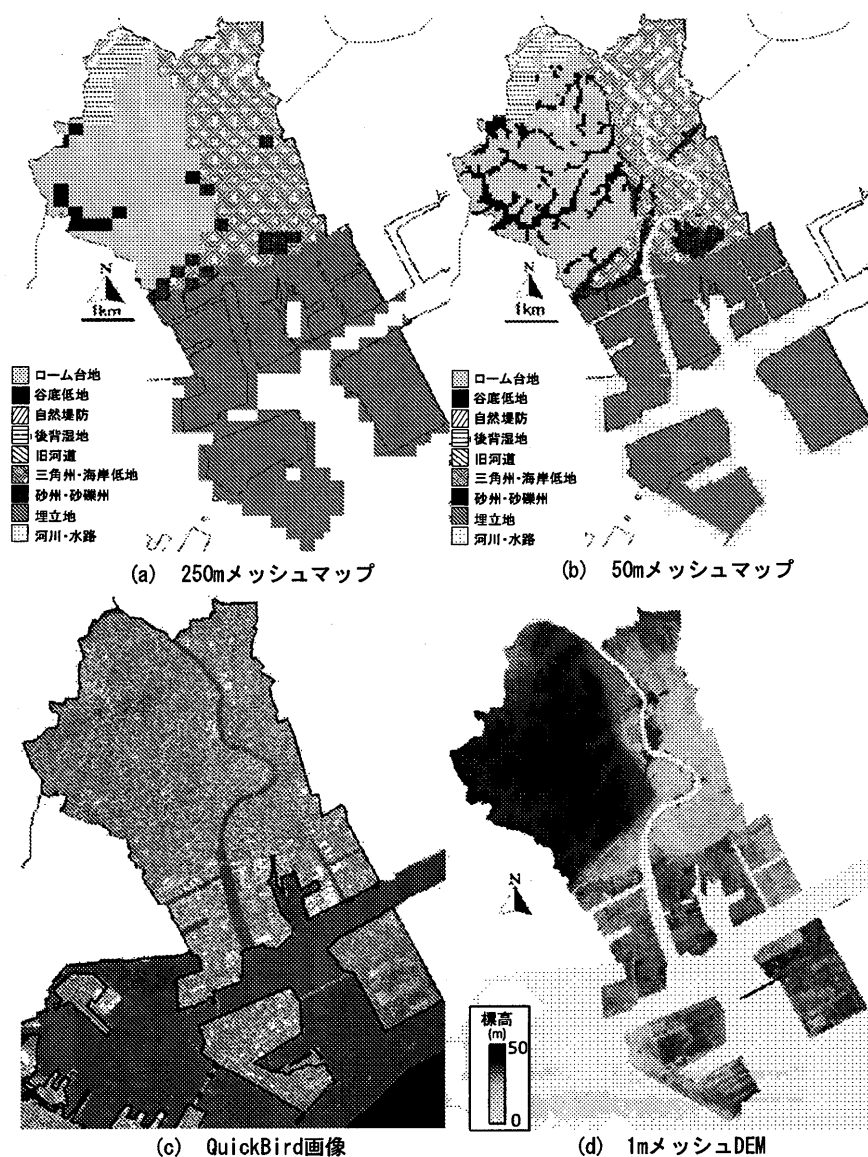


図1 対象地域の各種地図

250m および 50m メッシュの地形・地盤分類マップを示す。50m メッシュマップは、大矢他¹⁵⁾や若松他¹⁾の分類手法に基づき、1922 年作成の 5 万分の 1 地形図¹⁶⁾、¹⁷⁾および 1965, 1979 年発行の土地条件図¹⁸⁾、¹⁹⁾と若松らによる 250m メッシュマップ¹¹⁾を参考にして作成した。作成した 50m メッシュマップを、原本とした土地条件図や 250m メッシュマップと比較し、適切に数値化されていることを確認している。

図 1(c)には、使用した QuickBird 画像を示す。この画像は、2007 年 5 月 8 日に撮影された。空間分解能は 0.7m である。QuickBird 画像は、可視域で RGB の 3 バンド、近赤外域で 1 バンドの計 4 バンドを有している。図 1(d)には、使用した DEM データを示す。使用した DEM は、2002 年に航空機搭載レーザスキャナで取得された数値表層モデルから、フィルタリング処理によって建物や樹木などの地表物を除去したもので 1m メッシュのものである。

3. 空間周波数と地形・地盤との関係

(1) 2次元フーリエ変換によるスペクトルの傾き

ここでは、図 2(a)の衛星画像の明度(図 2(b))の値に対して 2 次元フーリエ変換を行う。画像上のある画素の位置 (x, y) における明度の値を $f(x, y)$ と表わし、波数 (u, v) をパラメータとするフーリエ変換の出力を $F(u, v)$ と表わすと、 $f(x, y)$ と $F(u, v)$ は(1)式によって表現されている。

$$F(u, v) = \iint f(x, y) \cdot e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (1)$$

この式より図 2(c)に示すパワースペクトルが得られる。この図では、図の中心からの距離が波数を示し、画像の明度によってスペクトル強度が表される。

北垣ら¹⁴⁾にない、このパワースペクトルをドーナツ状に分割し(図 2(d))、この内部に含まれるパワースペ

クトル振幅の総和を波数の関数に置き換える²⁰⁾。そして図 2(e)に示すように縦軸に最大値で正規化したパワースペクトル、横軸に波長を取り、周波数-パワースペクトル曲線を得る¹⁴⁾。

さらに、スペクトル特性の特徴を把握するために、得られた周波数-パワースペクトルを線形近似し、その傾き (Spectral Decay) を(2)式に示す最小 2 乗法により求める。

$$\text{Spectral Decay} = \frac{n \sum wp - \sum w \sum p}{n \sum w^2 - (\sum w)^2} \quad (2)$$

ここで、 n はデータ数、 w は波長、 p はパワースペクトルを示す。この際、土地利用図²¹⁾で低層住宅の敷地が 100 m²程度とされていることを参考にして、それよりもやや短い波長 8m から 80m までの波長に対して図 2(e)の破線で示すように線形近似を行い、その傾きを求めた。

(2) 解析結果の例

QuickBird 画像 (図 1(c)) から 256 × 256 ピクセル (約 180m × 180m) を、その中心点が 50m メッシュの中心点と一致するように切り出して解析した。例として、図 3 に典型的な低層住宅地と工業用地の画像の解析結果を示す。得られた周波数-パワースペクトルをみると、低層住宅地の方が工業用地に比べて短い波長の成分が多く含まれていることがわかる。これらスペクトルから傾きを求めると、低層住宅地では 0.007、工業用地では 0.018 という値が得られる。工場のような大規模な地物が存在すると長い波長の成分が多くなるため、傾きが大きくなる。逆に一般低層住宅が密集し、短い波長の成分が多く含まれる画像ほど傾きが小さくなる。

(3) スペクトルの傾きと地形・地盤との関係

得られたスペクトルの傾きの分布を図 4 に示す。バンド 1～3 はほぼ同じ傾向であったためにバンド 1 で代表

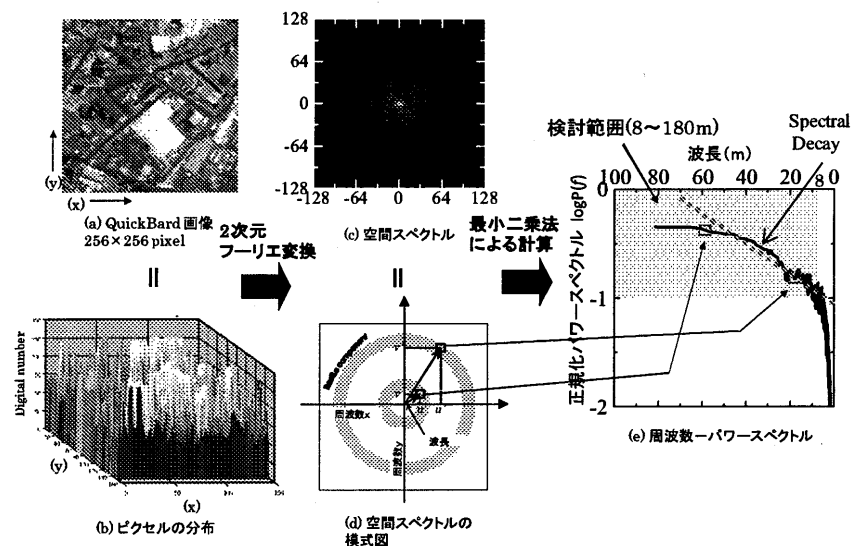


図 2 2次元フーリエ変換を用いた空間周波数解析のフロー

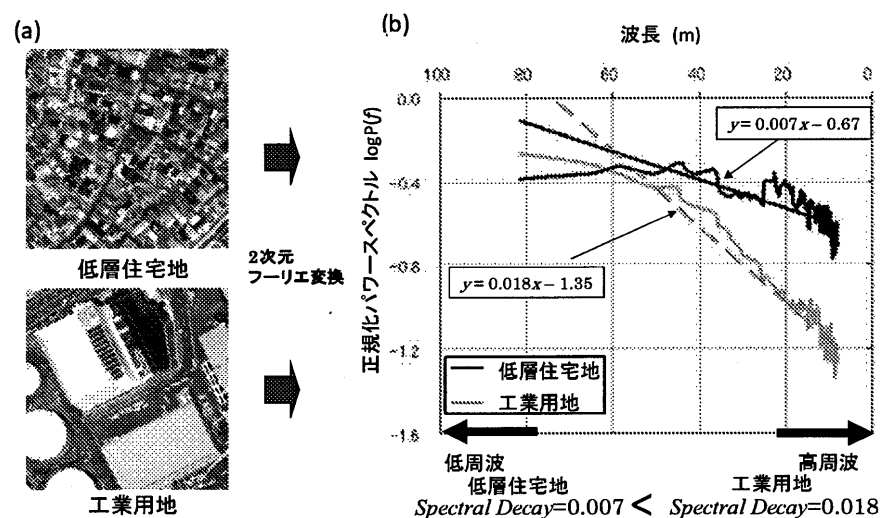


図 3 衛星画像とスペクトルの傾きの関係

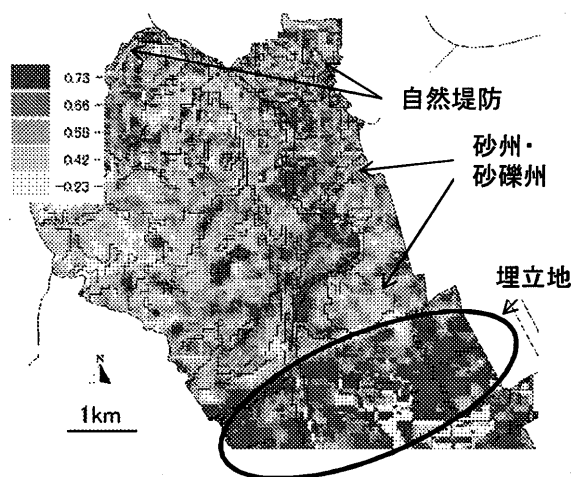


図4 スペクトルの傾きの分布

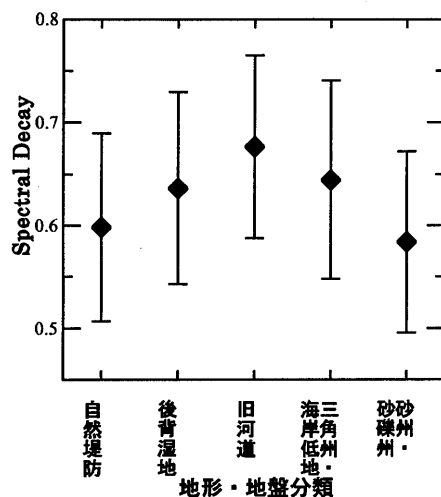


図5 地形・地盤と傾きの関係

させた。バンド4は植生の分布に大きく影響され、建物の形をとらえきれない可能性があるため、今回は検討から除外した。図中の黒枠は、図1(b)の50mメッシュマップの分類項目に対応している。図は、色が濃いほど傾きが大きいことを示している。

図をみると、埋立地付近で傾きが大きくなっていることがわかる。また図中に示す自然堤防や砂州・砂礫州では、周辺の地形・地盤と比べて傾きが小さくなっており、傾きと地形・地盤分類の間に関係がみられる。

図5に、スペクトルの傾きと地形・地盤分類との関係を示す。縦軸に傾き、横軸に地形・地盤分類を示している。図中のダイヤは傾きの平均値を示し、エラーバーは±標準偏差を示している。低地部では自然堤防や砂州・砂礫州で傾きが小さい。三角州・海岸低地や後背湿地は、低地において中程度の値をとり、旧河道や埋立地で傾きが大きい。

この結果は、自然堤防、砂州・砂礫州では低層住宅が多く建てられていること、三角州・海岸低地や後背湿地では商業用地、公共公設施設なども含め様々な土地利用を有していること、三角州・海岸低地や後背湿地では工業用地の割合が高いこと¹²⁾と対応している。以上の結果

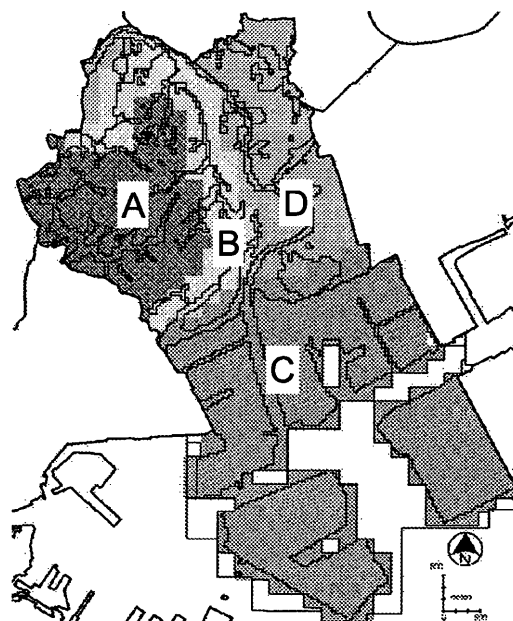


図6 地区分類図

は、スペクトルの傾きが土地利用状況と対応し、ひいては地形・地盤分類のための情報として利用できることを示唆している。

4. 低地部におけるデータの特徴と分類規則

(1) 各地形・地盤の候補地域と利用するデータ

石井他¹²⁾での地形・地盤分類の細密化の結果をみると、台地部と埋立地では比較的高い正解率を得ていた。逆に低地部の微地形の正解率は30%程度とあまり高くなかった。そこで本研究では、正解率の低かった低地を対象として検討を行う。

石井他¹²⁾に従い、図6に示すように対象地域を大きく4つの地区に分けて、地区ごとに検討を行うこととした。すなわち、地区Aは、250mメッシュマップにおいて、あるメッシュの周囲8メッシュが全てローム台地ないし谷底低地からなり、50mメッシュにおいてもローム台地ないし谷底低地のみを取りうる地区である。地区Bは、地区Aに接するメッシュとさらにそれに接するメッシュからなり、台地部と低地部の境界となる地区である。地区Cは、250mメッシュで埋立地となっているメッシュとそれに接するメッシュからなり、埋立地とその他の低地を取りうる地区である。地区Dは、全メッシュから地区A～Cで分類されたメッシュを除いた地域で、三角州・海岸低地や砂州・砂礫州などのその他の低地を取りうる地区である。台地部(地区A)と台地部と低地部の境界部(地区B)、埋立地(地区C)及び地区Dの水域に対しては、石井他¹²⁾の細密化方法をそのまま使い、これらがあらかじめ分類されているものとして、低地部の地区Dを対象として検討する。

図1(a)の250mメッシュマップをみると、低地において砂州・砂礫州や自然堤防の周辺は、三角州・海岸低地や後背湿地といった地形・地盤が分布していることがわかる。砂州・砂礫州や自然堤防の地形・地盤メッシュの分類精度を向上させるためには、三角州・海岸低地や後

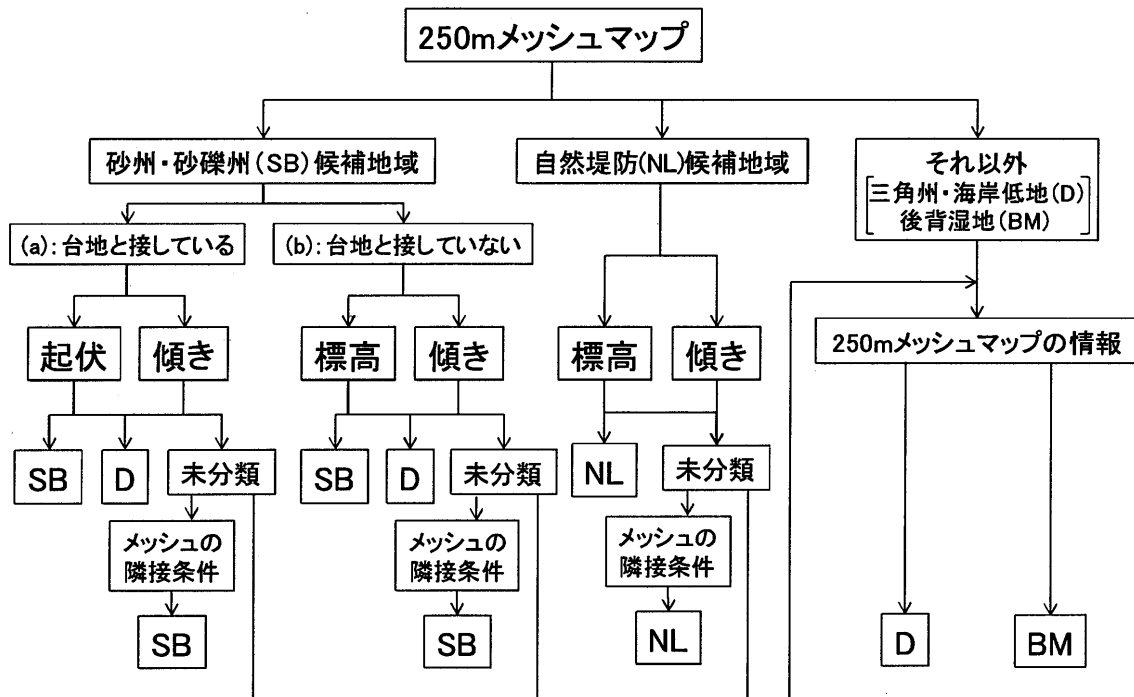


図7 低地部の分類方法のフロー

背湿地との境界を正確に分類する必要がある。

図7に低地部の分類方法のフローを示す。まず、既存の250mメッシュマップで砂州・砂礫州となるメッシュとその周囲1メッシュ分の範囲を抽出し、これらを砂州・砂礫州候補地域として砂州・砂礫州の抽出を行う。同様に、250mメッシュマップで自然堤防となるメッシュとその周囲1メッシュ分の範囲を抽出し、これらを自然堤防候補地域として自然堤防の抽出を行う。最後に、砂州・砂礫州や自然堤防の候補地域外のメッシュに、砂州・砂礫州や自然堤防の候補地域内で未分類となったメッシュを加えて、三角州・海岸低地か後背湿地かの判別を行うことで細密化を行う。

細密化の分類に使用する地形情報の直接的指標として、DEMによる標高値および起伏量を利用し、間接的指標として、3章で説明したスペクトルの傾きを利用する。起伏量は50mメッシュ内の標高値の最大値と最小値の差として求めた。

なお、細密化の際には、使用した250mメッシュ¹¹⁾と細密化の結果が互いに矛盾しないよう、250mメッシュ内にある50mメッシュのうち、その過半数はもとの250mメッシュの地形・地盤と同じとなることを前提条件として分類する。

(2) 低地部における分類規則

a) 砂州・砂礫州（台地と接する箇所）

砂州・砂礫州候補地域では、各メッシュは砂州・砂礫州あるいは三角州・海岸低地のいずれかに分類される。また、砂州・砂礫州は、台地部に接するものとそうでないもので標高や起伏の傾向が異なる¹²⁾。そこで、あらかじめ抽出した250mメッシュの候補が台地部に接している地域と、接していない地域とに分け、それぞれに対して分類を行う。

図8に台地部に接しているメッシュにおける砂州・砂

礫州と三角州・海岸低地での起伏量のヒストグラムを示す。これを見ると、砂州・砂礫州のピークは三角州・海岸低地のものと比べて高くなっていることがわかる。この地域では、砂州・砂礫州が標高の高い台地と接しており、50mメッシュ内に標高の高い台地の一部と標高の比較的低い砂州・砂礫州が混在するために起伏量が大きくなったものと考えられる。ただし、両地形・地盤ともヒストグラムが大きく重なった部分がみられた。そこで、起伏量が0.75m未満となるメッシュを三角州・海岸低地候補、0.75m以上1.0m未満のメッシュを境界領域、1.0m以上を示すメッシュを砂州・砂礫州候補と分類する。

同様に図9に画像のスペクトルの傾きのヒストグラムの比較を示す。前述したとおり、砂州・砂礫州に比べて、三角州・海岸低地の方が低層建物が多く存在するため、スペクトルの傾きは大きい傾向がみられる。ただし、図8と同様に、両ヒストグラムが重なる箇所が見られる。そこで、スペクトルの傾きが0.58未満となるメッシュを砂州・砂礫州候補、0.58以上0.66未満のメッシュを境界領域、0.66以上を示すメッシュを三角州・海岸低地候補と分類する。

あるメッシュにおける起伏量とスペクトルの傾きの2つの指標が、ともに同じ地形・地盤を示しているものは、その地形・地盤として分類する。例えば、起伏量が1.0m以上で、スペクトルの傾きが0.58未満となるメッシュは砂州・砂礫州として分類する。また、あるメッシュにおける指標のひとつが砂州・砂礫州（あるいは三角州・海岸低地）を表し、もう一方の指標が境界領域である場合、砂州・砂礫州（あるいは三角州・海岸低地）として分類する。例えば、起伏量が0.75以上1.0未満で、スペクトルの傾きが0.58未満となるメッシュは砂州・砂礫州に分類する。さらに、あるメッシュの指標のひとつが砂州・砂礫州を表し、もう一方の指標が三角州・海岸低地を表している場合は、そのメッシュは未分類とし

て以降の解析で分類する。

ここで、分類結果と対象となるメッシュが含まれる 250m メッシュの地形・地盤と照らし合わせて、前述した細密化の前提条件を満たしていない場合には、そのメッシュが含まれる 250m メッシュ内のメッシュ全てを未分類とする。

以上の結果から、未分類となったメッシュに対して、地形の連続性を考慮して、対象メッシュの上下左右の 4 メッシュのうち、少なくともひとつは砂州・砂礫州であり、三角州・海岸低地はひとつ以下である、という条件

を満たすメッシュを砂州・砂礫州として分類した。

b) 砂州・砂礫州（台地と接しない箇所）

次に、台地と接していない地域の砂州・砂礫州の分類を行う。このような地域での砂州・砂礫州では、地形の成因上、三角州・海岸低地と比べると標高が高いことが予想される。図 10 に砂州・砂礫州と三角州・海岸低地の標高値のヒストグラムを示す。これを見ると、砂州・砂礫州の標高値の方が全体的に高い傾向が確認できる。そこで、各ヒストグラムの形状から、標高が 1.5m 未満であるメッシュを三角州・海岸低地候補、1.5m 以上

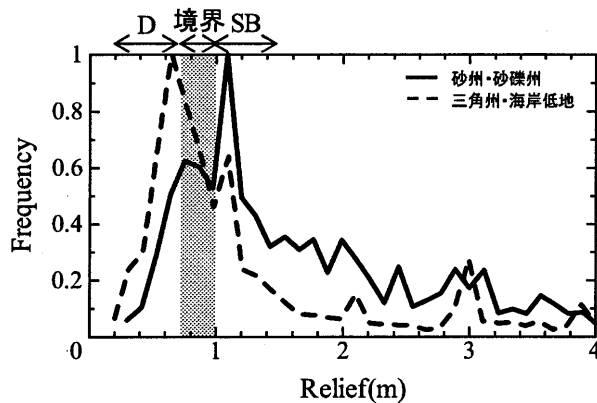


図 8 台地に接した砂州・砂礫州のヒストグラム(起伏量)

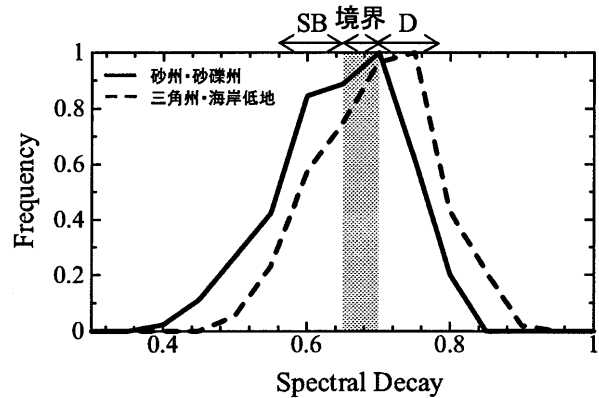


図 9 台地に接した砂州・砂礫州のヒストグラム(スペクトルの傾き)

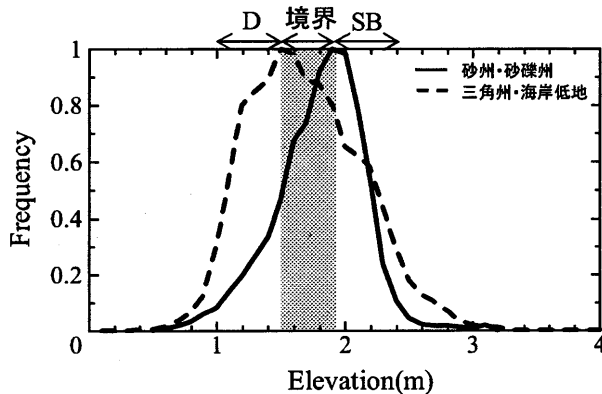


図 10 台地に接していない砂州・砂礫州のヒストグラム(標高)

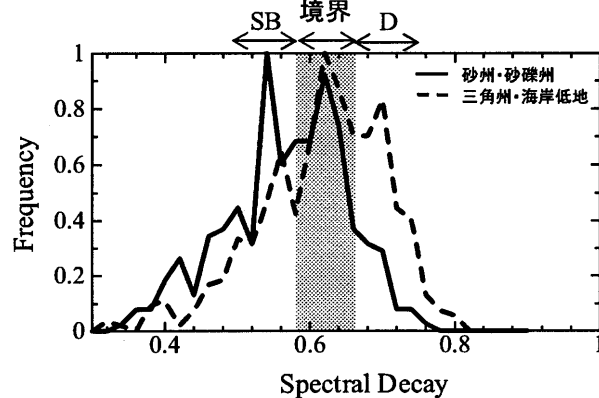


図 11 台地に接していない砂州・砂礫州のヒストグラム(スペクトルの傾き)

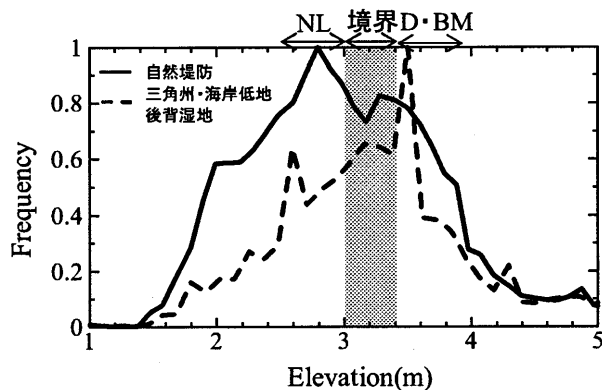


図 12 自然堤防のヒストグラム(標高)

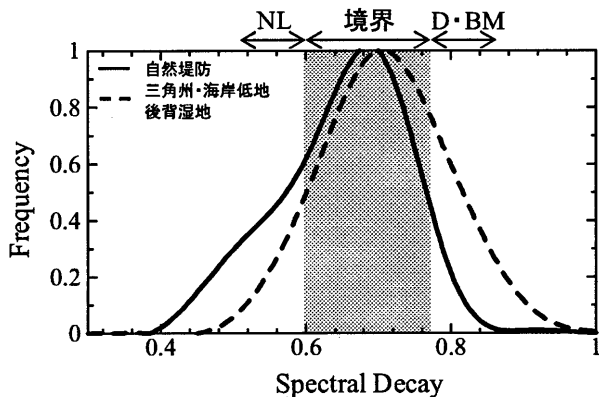


図 13 自然堤防のヒストグラム(スペクトルの傾き)

1.9m 未満のメッシュを境界領域、1.9m 以上を示すメッシュを砂州・砂礫州候補と分類する。

図 11 には画像のスペクトルの傾きのヒストグラムを示す。これを見ると、(a)のときと同様の理由により、砂州・砂礫州の傾きは、三角州・海岸低地の傾きに比べて小さい傾向にある。傾きが 0.64 未満のメッシュを砂州・砂礫州候補、0.64 以上 0.7 未満のメッシュを境界領域、0.7 以上のメッシュを砂州・砂礫州候補と分類する。

以上より分類された砂州・砂礫州候補、三角州・海岸低地候補、境界領域の 3 つの情報を用いて、(a)の分類規則同様の手順で分類を行った。

c) 自然堤防

自然堤防候補地域では、自然堤防の他に三角州・海岸低地と後背湿地を取りうる。ここでは、自然堤防を抽出するため、自然堤防における指標とそれ以外の地形・地盤（三角州・海岸低地と後背湿地）の指標の比較を行った。

図 12 に自然堤防とそれ以外の地形・地盤の標高値のヒストグラムを示す。自然堤防の標高の方が、その他の地形・地盤の標高に比べて全体的に低い傾向がみられる。そこで、標高が 3m 未満を示すメッシュを自然堤防候補、3m 以上 3.4m 未満のメッシュを境界領域、3.4m 以上のメッシュを三角州・海岸低地ないし後背湿地と分類した。ただし、地形学的には自然堤防の方が他の低地と比べ標高が高くなるのが一般的であるが、本対象地域では逆の傾向となってしまった。この理由として、低地部において土地開発・改変のために地形が変化し、元の地形学的な特徴が薄れたことが可能性として考えられる。他の地域へ本手法を適用する際には、注意が必要と考えられる。

図 13 には自然堤防とそれ以外の地形・地盤のスペクトルの傾きのヒストグラムを示す。自然堤防は一般的に良好な地盤とされているため、土地利用として主に低層建物の多い住宅地に用いられる場合が多い。よって自然堤防のスペクトルの傾きは、他と比べて小さくなる傾向にある。そこで、傾きが 0.6 未満のメッシュを自然堤防候補、0.6 以上 0.76 未満のメッシュを境界領域、0.76 以

上を示すメッシュを三角州・海岸低地ないし後背湿地候補と分類する。

以上より分類された自然堤防候補、三角州・海岸低地ないし後背湿地候補、境界領域の 3 つの情報を用いて、(a)や(b)の分類規則と同様の手順で分類を行った。なお、ここでは自然堤防のみを抽出するため、自然堤防となる条件を満たさないメッシュはすべて未分類として以降の解析で分類する。

d) 三角州・海岸低地と後背湿地

以上の分類結果から、未分類となったメッシュは三角州・海岸低地あるいは後背湿地に分類される。対象地域では、双方の地形・地盤は互いに接していないため、250m メッシュから細密化する必要がない。このため、未分類のメッシュを含む 250m メッシュの地形・地盤が三角州・海岸低地であれば、対象のメッシュの地形・地盤も三角州・海岸低地に分類する。逆に、対象のメッシュを含む 250m メッシュが後背湿地であれば、対象メッシュを後背湿地に分類する。

(3) 細密化結果

低地部に対しては図 7 の分類規則を、台地部と埋立地に対しては石井他¹²⁾の分類規則を適用して 50m メッシュに細密化した結果を図 14(a)に示す。比較のため、石井他¹²⁾による細密化結果を図 14(b)に示す。図 14(b)に示すように、特に砂州・砂礫州については、石井他¹²⁾では一部が点在しており不自然な形状となっていたが、本研究による結果では地形がまとまって抽出されており、図 1(b)に示した実際により近い形状となっていることがわかる。今回の検討では、DEM と合わせて衛星画像の情報も多く用いたため、低地の微地形で標高差の大きくない箇所において分類が可能となり、形状が良好に表現できたものと考えられる。

なお、土地条件図などを基に作成した正解とする 50m メッシュマップ(図 1(b)) を分母とし、本検討で得られたメッシュマップ(図 14(a)) によるメッシュ数の割合を示す正解率を計算すると、本研究の砂州・砂礫州の正

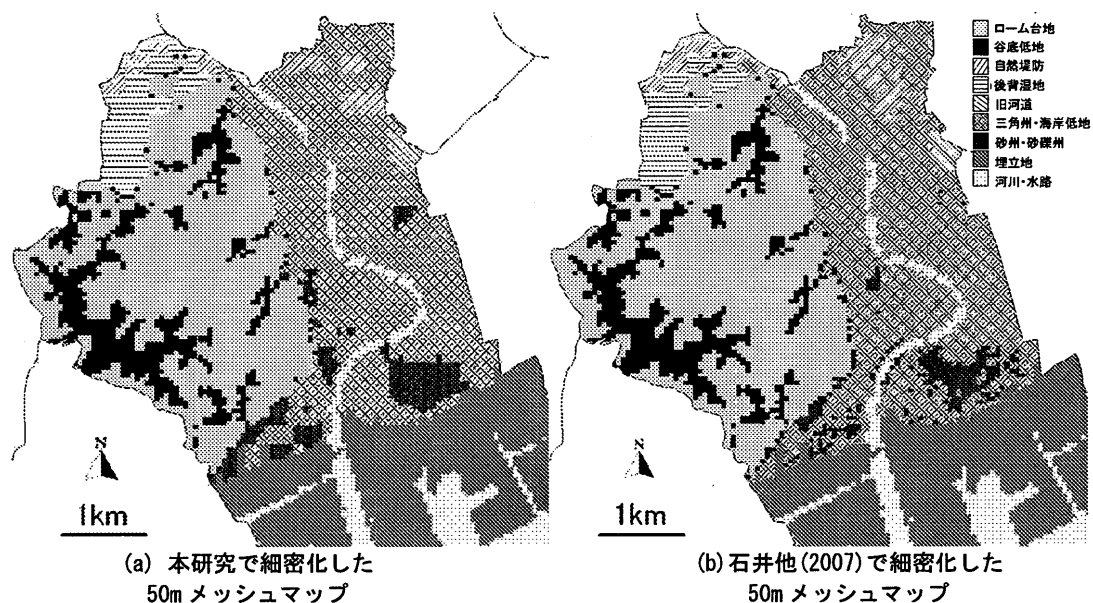


図 14 50m メッシュマップ細密化の結果の比較

解率は 50%で、石井他¹²⁾の正解率に比べて 15%向上した。また自然堤防をみると本研究の正解率は 36%であり、石井他¹²⁾の正解率と比べると 5%向上した。正解率は十分高いとは言えないが、明らかな向上がみられた。また、対象地域全体の正解率は 85.3%となり、石井他¹²⁾による正解率 83.9%よりもわずかではあるが上昇した。

5. 結論

本研究では、石井他¹²⁾で行った地形・地盤分類の細密化の問題点を修正し、改良を図ることを目的とし、高解像度衛星画像とDEMを用いて地形・地盤分類の細密化の検討を行った。高解像度衛星画像に対して、ピクセル値を2次元フーリエ変換することで各地形・地盤における空間周波数特性を検討した。そして得られたパワースペクトルから波長に対するスペクトルの傾きを求め、それを地形・地盤分類のための指標として加えて、地形・地盤分類の細密化の分類規則を検討した。その結果、得られた50mメッシュマップは、石井他¹²⁾の細密化の結果と比べて、より自然な地形形状を表現することができた。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興調整費「統合化地下構造データベースの構築」によった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土庁計画・調整局：国土情報シリーズ 8 国土数値情報（改訂版），大蔵省印刷局，1992.
- 2) 若松加寿江，松岡昌志，久保純子，長谷川浩一，杉浦正美：日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.213-232，2004.
- 3) 内閣府（防災担当）：地震防災マップ作成技術資料，<http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050513siryu.pdf>，2005.
- 4) 国土地理院：数値地図 5m メッシュ（標高）「横浜及川崎」，2009.
- 5) 鄭 炳表，細川直史，畑山 健，座間信作：リモートセンシングに基づく面的基盤データの抽出と地域被害想定への適応に関する研究 -その 1 広域の地盤増幅度推定に向けたDEMによる地形分類-，地域安全学会梗概集，No.13，pp.175-178，2003.
- 6) Matsuura, T., Yokohari, M. and Azuma, A.: Identification of Potential Habitants of Gray-Faced Buzzard in Yatsu Landscapes by Using Digital Elevation Model And Digital Vegetation Data, *Landscape and Urban Planning*, Vol.70, pp.231-243, 2005.
- 7) Iwahashi, J. and Pike, R. J.: Automated Classification of Topography from DEMs by an Unsupervised Nested-means Algorithm and a three-part geometric signature, *Geomorphology*, 86, pp.409-440, 2007.
- 8) Yong, A., Hough, S. E., Abrams, M. J., Cox, H. M., Wills, C. J., and Simila, G. W.: Site Characterization Using Integrated Imaging Analysis Methods on Satellite Data of the Islamabad, Pakistan, Region, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.98, No.6, pp.2679-2693, 2008.
- 9) Bayramin, I.: Using Geographic Information System and Remote Sensing Techniques in Making Presoil Surveys, *Proceedings of International Symposium on Desertification*, Paper No.4, 2000.
- 10) 中井正一，山口祥生，石田理永：衛星データと古い時期の土地利用に基づく地盤特性推定の試み，日本建築学会構造系論文集，第 552 号，pp.69-75，2002.
- 11) 若松加寿江，松岡昌志：大都市圏を対象とした地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築，土木学会地震工学論文集，論文番号 27-050，2003 (CD-ROM).
- 12) 石井一徳，翠川三郎，三浦弘之：数値標高モデルと衛星画像を用いた地形・地盤分類メッシュマップの細密化の検討，地域安全学会論文集，No.9，pp.121-129，2007
- 13) 高木幹雄，下田陽久：新編画像解析ハンドブック，東京大学出版会 2004.
- 14) 北垣亮馬，兼松学，野口貴文：2 次元フーリエ変換による打放しコンクリートの視覚情報変化の分析方法に関する研究，日本建築学会構造系論文集 597 号，pp.39-45，2003.
- 15) 大矢雅彦ほか：改訂増補版 地形分類図の読み方・作り方，古今書院，137p，2002.
- 16) 国土地理院：5 万分の 1 地形図「東京西南部」（図歴：大正 11 年），1927.
- 17) 国土地理院：5 万分の 1 地形図「横浜」（図歴：大正 11 年），1927.
- 18) 国土地理院：5 万分の 1 土地条件図「横浜」，1969.
- 19) 国土地理院：5 万分の 1 土地条件図「東京西南部」，1979.
- 20) 画像情報教育振興協会：画像処理標準テキストブック，1997.
- 21) 国土地理院：数値地図 5000（土地利用）首都圏 2000 年，2007.

（原稿受付 2009.5.30）

（登載決定 2009.9.12）