

SAR によるベトナム低平地の河道網の抽出と河川流量の推定

永岡 淳一* 小川 進**

キーワード：DEM、メコン、河川地形則、フーリエ解析

1. はじめに

東南アジア最大の穀倉地帯であるメコンデルタの問題の1つが、メコン河の洪水である。そのため、河川流量のモニタリングが必要とされるが、流量の観測は主要都市の大河川に限られている。本研究では、衛星画像による河川形状の抽出および河川流量の推定を試みた。

メコンデルタの頂点はプノンベン付近で、河口から約330 km 上流にあるが、標高はわずか2 m に過ぎない。このような低平地において、DEM から水系図を生成することは一般に困難である。DEM から水系を抽出する場合、水の流れは最急下り勾配の方向に向かうという重力の法則を利用して作成することになるが、この方法ではDEM に同一標高があると水が流れなくなってしまう。このようなところに湖沼があるが、河川部にこのような止水部が生じて不自然であれば、標高の値をわずかに操作して水が流れるように工夫する必要がある。したがって、一般にDEM から河道網を抽出することは困難な場合がある。これは、低平地、すなわち標高にそれほど差がないところにおいて特に顕著である。

本研究では、JERS-1/SAR 画像を用いて、河道網の抽出を試みた。しかし、SAR 画像にはスペckルノイズが含まれているため、川幅の細い河川を抽出することは難しい。そこで、ノイズを除去するフィルタとしてSFP フィルタおよび強化 SFP フィルタ（桜井、1999）を用い、河道網の抽出を試みた。桜井は、アマゾン河流域において、川幅25m の河川の抽出に成功している。本研究では、ベトナムのホーチミン市を研究対象地とした。

一方、河川地形則によると、分岐や蛇行といった河川形状は河川流量と関係があり、流量の少ない河川は大きな蛇行を示し、流量の多い河川は蛇行が少ない。これにより、抽出した河道網から河川の特微量（河川の蛇行）

を算出し、流量と蛇行の関係から流量を推定した。

2. 研究対象地概要

メコン河は、標高5,000m 近いチベット高原にその源を発生し、中国の雲南省、ミャンマー、タイ、ラオス、カンボジアを流下し、ベトナムにおいて南シナ海に注ぐ国際河川である。その全長は約4,620 km、流域面積は約79万5,500 km²で、流長、面積ともに世界有数の大河である。カンボジアとベトナムにまたがるメコンデルタも世界の大河川と比較しても劣ることのない東南アジア最大のデルタであり、デルタの北側はカンボジア領（全デルタの26%）、南側はベトナム領（同74%）である。

メコンデルタは、今から6,000年程前にピークを迎えた後氷期の海進によって形成された広大な内湾をメコン河が埋め立てていくことによって陸化した地域である。デルタの頂点はメコン河とトンレサップ川が合流するプノンベン付近で、河口からは約330 km 上流にあるが標高はわずか2 m に過ぎない。そのため、海岸に近い場所では乾期に海水が水路内に浸入し、海岸に比較的近い土地では乾期に水稲耕作ができなくなる。これは、いかに大陸大河川のデルタが穏やかな勾配であるかを示している。プノンベンの下流でメコン河はバサック川と分流するが、ベトナム領内に入るとヴィンロン付近からさらに枝分かれして典型的な扇状デルタを形成し、南シナ海に注ぐ。本研究対象地は、この河口付近である。研究対象地地図を図1に示す。また、ベトナムのSRTM-3（90m メッシュ）を図2に示す。これより作成した水系図を図3に示す。

* 千葉大学環境リモートセンシング研究センター 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1 - 33

** 立正大学地球環境科学部環境システム学科 〒360-0194 埼玉県熊谷市万吉1700



図1 研究対象地：ベトナム

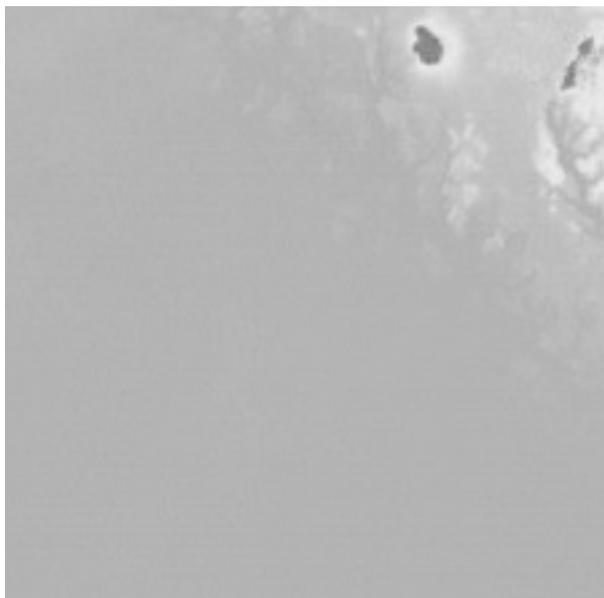


図2 SRTM-3 (90m メッシュ)

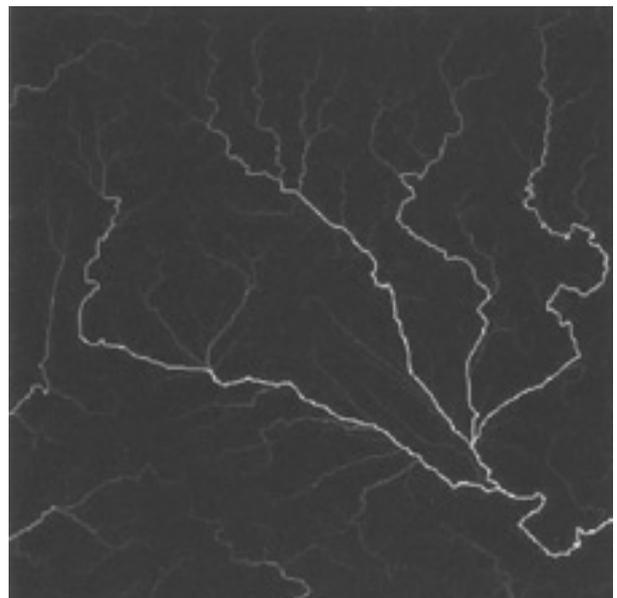


図3 SRTM-3から作成した水系図

3. 方法

3.1 使用データ

本研究で使用したデータは、ホーチミン市近郊 (Path=114、Row=283) の JERS-1/SAR、Level 2.1 (1997/04/07) である。前処理として、画像サイズを縦、横それぞれ1/2に間引きし、画像の上側が北向きになるようにした (図4)。

3.2 河道網の抽出

本研究で用いた河道網抽出の処理手順を図5に示す。

まず、SAR 原画像に含まれているスペckルノイズを次式で与えられる SFP フィルタおよび強化 SFP フィルタ (桜井、1999・2005) によって除去した。

$$\chi_c = \begin{cases} \frac{\sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n W_{kl} Z_{kl}}{\sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n W_{kl}} & \text{if } Z_c < a \\ Z_c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、

$$W_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_{kl} < a \text{ and } |Z_c - Z_{kl}| < 2\sigma_z \bar{Z}_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$a = \begin{cases} \text{constant value 65535 for SFP filter} \\ \text{user specified value for enSFP filter} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 χ_c は評価後のウィンドウの中心画素値、 Z_c はウィンドウの中心画素値、 Z_{kl} はウィンドウ内の中心以外の画素値である。

SFP フィルタは、周囲と異なる細かい微小特徴のコントラストを保持しながら、スペckルノイズを低減するものである。そのため、小さな暗い特徴 (川幅の狭い河川) に関しては最適ではない。したがって、ある閾値以上 (川幅200m 以上の河川の最大値) に対しては処理を施さないという強化 SFP フィルタを用いて、暗い特徴に特化したスペckルノイズを除去した。

スペckルノイズを低減する両フィルタの利点を取り入れるため、SFP フィルタ画像の画素値が閾値 a より低く、強化 SFP フィルタ画像の画素値よりも高ければ強化 SFP フィルタ画像、そうでなければ SFP フィルタ画像を適用するようにして、両フィルタ画像を合成した。ここで、 a は強化 SFP フィルタで用いた値よりも50下げた値を用いた。



図4 対象地の SAR 画像

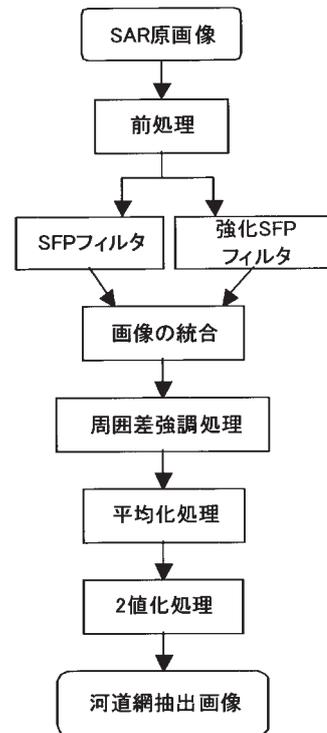


図5 河道網抽出の処理手順

次に、周囲差強調処理により河川の形状を際立たせた。さらに平均化処理を施し、最終的に2値化して河道網を抽出した。

3.3 蛇行流路の解析

河道網抽出画像から流量を推定する河川を切り出し、細線化処理を行った。この画像を河川の蛇行状態を表す1次元信号に変換した (帷子、2003)。すなわち、ある

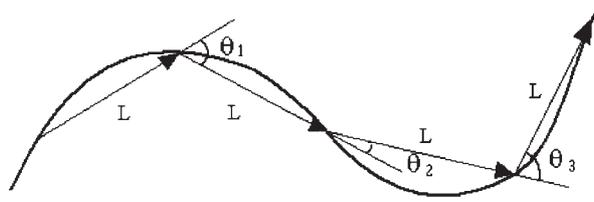


図6 1次元信号変換モデル



図7 河道網抽出画像

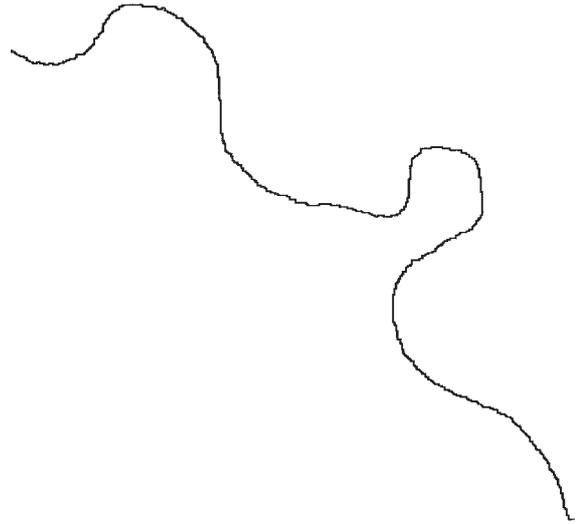


図8 河川の細線化画像

一定間隔ごとに河川の座標をサンプリングし、ある点から次の点と、その点からさらに次の点までのベクトルを考え、そのベクトルのなす角度から、河川の蛇行する角度を順に求めていった(図6)。ここで、サンプリング間隔Lは50 pixelとした。これにより、横軸を距離、縦軸を角度とした1次元信号を算出した。次に、この1次元信号についてフーリエ変換を行い、そのパワースペクトルを求めた。

3. 4 河川流量の推定

流量と河川の特徴量との関係を表した式は多数あるが、流量の代表値として何を採択するかによって経験定数が異なる。本研究では流量Q (ft³/sec) を年平均流量とするCarlstonの式(4)を用いた(高山、1974)。

$$\lambda_m = 106.1Q^{0.46} (\sigma = 11.8\%) \quad (4)$$

ここで、 λ_m は蛇行波長、 σ は(4)式に対する実測値の標準偏差である。蛇行波長は、Speightの方法から求めた。

4. 結果

SAR画像から河道網を抽出した結果を図7に示す。これより、川幅200m以下の細い河川の抽出に成功した。一方、SRTM-3(90mメッシュ)から作成した水系図(図3)では、SAR画像対象地の河道網を抽出できなかった。したがって、低平地における河川の抽出には、SAR画像からの河道網抽出が有用であるといえる。

次に、この画像から流量を推定する河川を切り出し、細線化処理を施した結果を図8に示す。また、細線化された河川形状を1次元信号に変換した結果を図9に示す。この結果は、サンプリング間隔の取り方で大きく異なるが、蛇行の激しい河川は大きな振幅を示し、あまり蛇行しない河川は小さな振幅を示すことがわかる。また、フーリエ変換したパワースペクトルを図10に示す。これより、低周波成分の密度が大きいことがわかるが、蛇行波長を一つのモードで代表できないことがわかる。したがって、Speightの方法を適用し、卓越周波数から卓越波長を算出した。これより、卓越周波数は0.005 pixel⁻¹、卓越波長は5 kmと算出できた。

最後に、算出した河川の特徴量および(4)式により流量

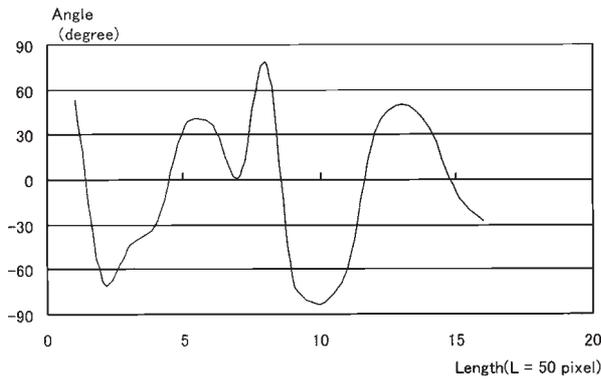


図9 1次元信号に変換した河川形状

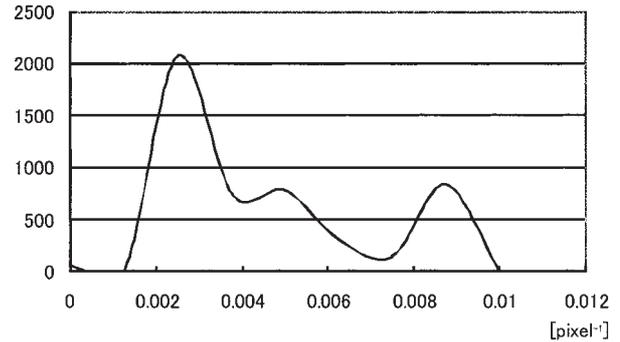


図10 フーリエ変換したパワースペクトル

表1 河川の特徴量および推定流量

蛇行角度の平均値	44°
卓越波長	5,000m
推定流量	1,600m ³ /s

を推定した結果を表1に示す。

5. 考察

本研究の結果を次の3つの視点から考察する。

(1) 河道網の抽出

一般に、水域あるいは陸域を判別・認識するには、SAR画像の反射強度を表すヒストグラムから水域と陸域との境界である閾値を設定する。反射強度の低い方は水域部、高い方は陸域部である。SAR原画像から水域(海洋、湖沼、大河川等)を抽出することは比較的容易であるが、川幅の細い河川に対しての抽出は困難である。したがって、河川を抽出するには、強化SFPフィルタの閾値を定めることが重要となる。

帷子は、アマゾン河流域において、川幅の広い河川の最大値を閾値としているが、本研究対象地ではその値は適さなかった。これは、河川の周囲に非常に明るいオブジェクト(市街地等)があったためと考えられる。したがって、本研究対象地では、画像を分割し、それぞれの領域に対して閾値を定めることで河道網の抽出を行った。これにより、解像度25m以上の河道網の抽出に成功した。

(2) 蛇行形状の解析

抽出した河道網画像から河川を切り出し、細線化処理でしばしば用いられているHilditchのアルゴリズムにより細線化を行った。生じたひげは目視により除去した。

河川の蛇行形状を1次元信号に変換するさい、サンプリング間隔を約1kmとしたが、蛇行の激しい河川に対してはサンプリング間隔をさらに小さくする必要がある。一方、この方法は川幅が広い河川に対しては有効ではないと考えられる。さらに、1次元信号に変換しているため、3次元的な河川形状の情報が失われている。したがって、河川形状をさまざまな視点で解析することが必要とされる。

(3) 河川流量の推定

本研究では、Carlstonの式およびSpeightの方法を用いて河川流量を推定した。結果として、11.5%の誤差を含むものと考えられる。しかし、前述したように、流量の観測データは主要都市の大河川に限られるため、本研究対象地の流量データは提供されていない。したがって、流量の推定結果を検証するためには、現地での流量観測が必要である。

6. 結論

以下に結論を述べる。

- (1) SFPフィルタおよび強化SFPフィルタでSAR画像のスペckルノイズを除去することにより、SRTM-3から作成した水系図と比較して、精度の高い河道網の抽出に成功した。したがって、本研究でとった河道網抽出法は、低平地において有効であるといえる。
- (2) 蛇行形状の1次元信号の変換結果は、サンプリング間隔により大きく異なるが、蛇行の激しい河川は大きな振幅を示し、あまり蛇行しない河川は小さな振幅を示した。また、スペクトル密度は低周波成分の密度が大きいことがわかったが、蛇行波長を一つのモードで

代表できないため、Speight の方法により卓越波長の算出ができた。

- (3) 河川の蛇行状態を 1 次元信号に変換して解析することで、抽出された河川の特微量と流量の関係を見出すことができた。また、河川地形則を適用することで、河川流量を推定することができた。したがって本研究は、SAR 画像から河川形状の特微量を抽出することにより、低平地河川における河川流量の推定が可能であり、河川流量モニタリングに適用できるものと考えられる。

参考文献

- 飯坂讓二監修, 1998. 日本写真測量学会編, 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 208pp.
帷子京市郎, 小川進, 桜井貴子, 高木幹雄, 2003. SAR 画像の見えない小河川の特微量の推定, 第35回リモートセンシ

ング学会学術講演会論文集, pp.165 - 166.

帷子京市郎, 小川進, 桜井貴子, 高木幹雄, 2004. SAR によるアマゾン河支流の流量推定, 第21回パソコン利用技術研究会講演論文集, pp.97 - 100.

帷子京市郎, 小川進, 桜井貴子, 高木幹雄, 2004. JERS-1/SAR によるアマゾン小河川の流量推定法, 生研フォーラム「宇宙からの地球環境モニタリング」第13回論文集, pp.78 - 81.

桜井貴子, 飯坂讓二, 1999. 微小特徴抽出のための SAR 画像のスペckル低減処理, 写真測量とリモートセンシング, 38 (3), pp.32 - 43.

桜井貴子, 高木幹雄, 小川進, 帷子京市郎, 2005. アマゾン河流域の JERS-1 SAR 画像を用いた森林内の細い河川の可視化, 写真測量とリモートセンシング, 44 (5), pp.64 - 72.

高山茂美, 1974. 河川地形, 共立出版, 304pp.

長澤良太, 2002. リモートセンシングによる土地資源評価, 古今書院, 130pp.

堀 博, 1996. メコン河 開発と環境, 古今書院, 476pp.

村井俊治, 2002. 空間情報工学, 日本測量協会, 217pp.

Extraction of a river system image in the lowland of Vietnam from a SAR image and estimate of its discharge

Junichi NAGAOKA*, Susumu OGAWA**

*Chiba University

**Rissho University

In this study, a river-system image in the lowland of Vietnam was extracted from a SAR image and its discharge was estimated. Geographical features have been extracted from DEM by many researchers. Nevertheless a river-system image in the lowland was rarely extracted from DEM. First, the Sakurai's method using SFP filter (1999) was applied to remove speckle noises and a river-system image was produced. Next, the characteristic of river shapes such as the meandering wavelength and the amplitude were extracted. Finally, the empirical laws in river geomorphology estimated the discharge.

Keywords: DEM, Mekong, river geomorphology, Fourier analysis