

# リモートセンシング・DEM を用いた水文地形研究の展望

## A Prospect for Hydrogeomorphological Studies using Remote Sensing and DEM

中山大地（東京都立大学）

Daichi NAKAYAMA (Tokyo Metropolitan University)

キーワード：リモートセンシング，DEM，地形モニタリング

Key Words: Remote Sensing, DEM, topographical monitoring

### 1. 水文地形学とリモートセンシング・DEM

水文地形学は、山地における水循環・地形プロセス・地形の3要素間の相互作用を解明する学問である(恩田ほか, 1996)。水文地形学の手法は、山地において試験流域を設定し、そこで流出や土砂の生産量・運搬・堆積などの観測を行うことが特徴である。これにより、前述の3要素の相互作用を、ダイナミックな要素も含めて高い時空間解像度で明らかにすることが可能である。しかし、時空間解像度が高いゆえに、ある試験流域において成立した相互作用をそのまま他の流域に広げようとする、不確定要素が多くなるために解析は難しくなる。

一方、リモートセンシングは、狭義には人工衛星や航空機に搭載したセンサで捉えられた地表面の放射を観測し、比較的広範囲において地表面がどのような状態になっているか把握しようとする技術および応用研究である。リモートセンシングでは画像の範囲においては同時性を見ることができる。また、衛星は一定の周期で同じ場所を撮影するため、反復性のあるデータを得ることが可能である。しかし、衛星画像のピクセル値には地表面の様々な状態が合わさった結果が反映されているため、この値から物理量を直接求めるのは困難である。このため、物理量が既知である点のピクセル値を参考にし、統計的手法を用いて広範囲の地表面がどのような状態になっているかを予測する手法を用いることが多い。

一方、DEM は狭義のリモートセンシングには含めることができない。例えば、国土地理院が発行している数値地図や USGS などが発行している GTOPO30 などは、ソースデータの作成年次などが異なるためにリモートセンシングデータの特徴である反復性や同時性を持たないからである(中山 1999a)。しかし、ステレオ衛星画像や空中写真などから DEM を作成すれば、その範囲内の同時性は保証されるし、定期的に作成すればデータの反復性も生じてくる。この点では、DEM を用いた解析は広義のリモートセンシングに含んでも構わない。

以上のように、水文地形学は狭い範囲で時空間解像度の高い観測を行ない、プロセスを考えることが重要になっている。また、リモートセンシングや DEM を用いた解析は、広範囲の同時性と反復性を持ち、統計的な手法を用いて研究を行っている。このように、水文地形学的手法とリモートセンシング的手法は一見相反した性質を持

っているように見える。しかし、この二つの手法を組み合わせることにより、お互いの弱点を補完して進んだ解析を行うことが可能になる。

たとえば水文学的見地から両者の融合を見てみると、詳細な現地観測などで得られた現象を、より広範囲に延ばすための手法としてリモートセンシングを用いることが可能になる。また、もう一つは、リモートセンシングの見地から見てみれば、水文地形学のもつ解像度高いの観測結果をグランドトゥルースのための基礎データとして用いることが考えられる。このように、水文地形学(的手法)とリモートセンシング・DEM を用いた地形解析(的手法)を融合させることにより、お互いの弱点を補完することが可能になる。

本稿ではこのような点に着目し、リモートセンシングや DEM を用いた研究を行っている立場から、水文地形学の成果をどのようにして取り込むことができるか、ということについて提案を行う。

### 2. DEM を用いた地形解析の手法

図1にDEMを使った地形解析の一例を示す。これは、ボリビアのタリハ地域を対象にして、土壤侵食が進行している流域を抽出する研究のフローチャートである(Nakayama et al. 1999)。解析対象とする地域や、何を対象に解析を行うかは研究によって異なるが、DEM から流路網を作成し、対象流域を抽出して各種地形量を計測し、多変量解析を用いて分析するという基本的な手法はほとんど同じである。

まず、DEM から研究対象となる流域を抽出する(図2)。このためには、擬似流路網を作成する必要がある(図2-B)。擬似流路網は現実の流路網とは異なり、DEM 上でシミュレートされる流路網である。基本的には最大流下方向をたどることによって作成されるが、DEM には凹陷点や平坦地が含まれるため、単純に最大傾斜方向をつなげただけでは擬似流路網はできない。さらに、凹陷点や平坦地の問題を解決するために乱数で流下方向を決定したとしても、流路のループや交差のない流路網を作成するには比較的複雑なアルゴリズムが要求される。このため、DEM から流路網を作成するアルゴリズムの開発は、1980年代からDEMを用いた水文地形学の主要なトピックであった(Band 1986, 中山 1999bなど)。ここでは代表

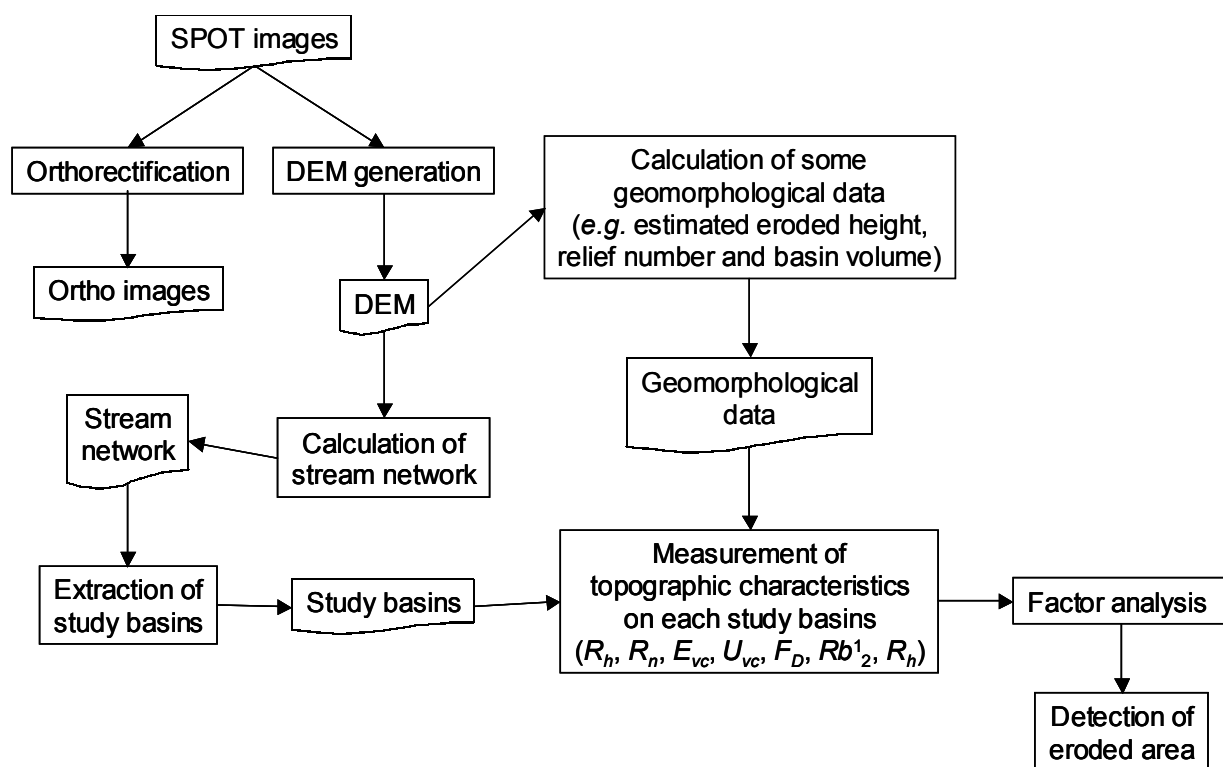


図 1 DEM を用いた地形解析の流れの一例

的な流路網作成アルゴリズムである Nogami (1995) の洪水追跡アルゴリズムを改良したものをを用いて流路網を作成している。Nogami (1995) のアルゴリズムは、凹陷点に水が溜まり、これが溢れることをシミュレートすることによって凹陷点の問題を解決している。

流路網が完成したら、研究対象となる流域を抽出する。流域を抽出する際には、任意の地点を流域の出口として抽出する方法や、流域面積などのパラメータにしきい値を設けて流域を抽出する方法があり (中山, 1999c), 任意の条件を持つ流域を抽出することが可能である。どちらにしても流域の出口となるグリッドを何らかの形で指定し、そのグリッドに流れ込むグリッドを求める方法により流域を抽出する。図 2-C は、南アルプスを対象にして、流域面積が同程度の流域を自動的に抽出させた例である (Nakayama 1997)。解析対象となる流域が決定したら、流域単位に地形量を計測し、その結果を多変量解析などの手法を用いて解析を行う。

### 3. DEM の作成

DEM を作成するにはいくつかの手法がある。古典的な方法では、地形図にグリッドを書き、交点の座標を読み取って手で入力していく方法がある。しかし、これでは広範囲の DEM を作成するには非常に時間がかかる。そこで、

地形図の等高線のみを抽出し、これをデジタル化して計算により DEM を求める方法も開発されている (岩手大学渡辺研究室, <http://bali.cis.iwate-u.ac.jp/~hide/teras/teras.html>)。しかし、これらの手法は簡便である一方、一次データとして印刷された地形図を用いているため、地形図に表現されている等高線以上の精度を持った DEM を作成することができない。そこで、デジタル写真測量ワークステーションを用いて、衛星画像や空中写真といった可視のステレオ画像から直接 DEM を作成する方法について紹介する。

#### 3.1 衛星画像からの DEM の作成

ステレオ視が可能な衛星画像には、JERS-1 の OPS, SPOT のパンクロマティックなどがあるが、ここでは SPOT のステレオペアを用いた例を紹介する (中山・隈元 1999)。図 3 は八ヶ岳から甲府盆地近辺の SPOT パンクロマティック画像である。DEM を作成するには、同じ地域をステレオ視できるようなペア画像が必要になる (図 3-A)。ステレオペアから DEM を作成するには、三次元座標が既知である点 (Ground Control Point: 以下 GCP) が、オーバーラップする部分に最低でも 6 点必要であり、これに相対的な画像の位置を示すタイポイントを付加して画像に座標値を与える。これが標定という作業である。図 3B 中の黒

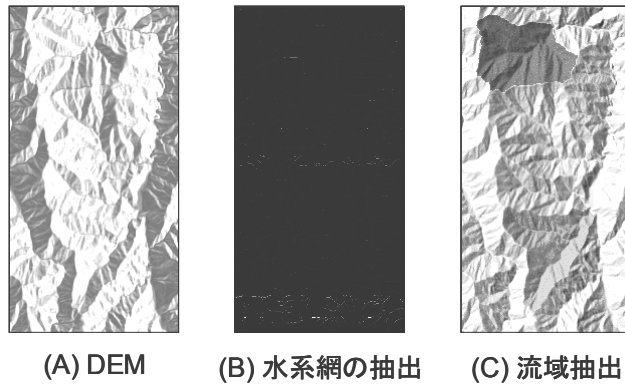


図 2 研究対象流域の抽出

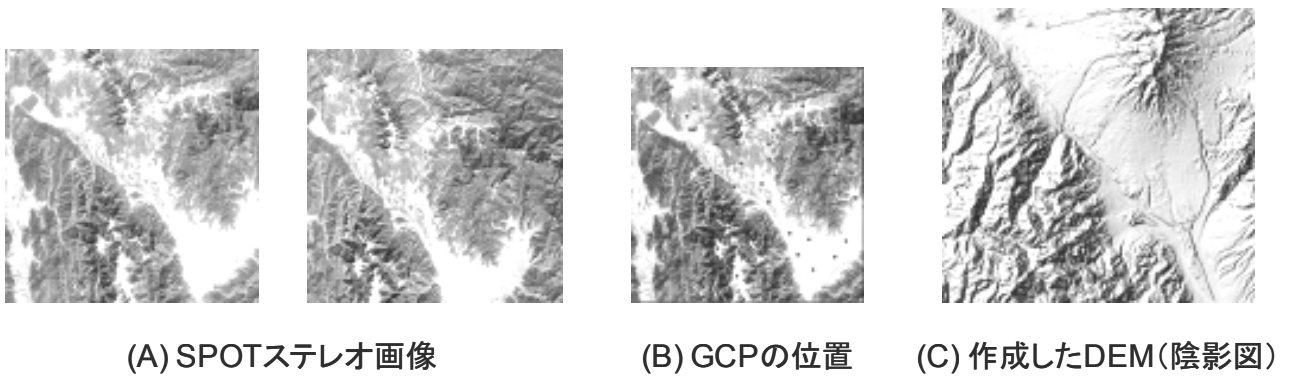


図 3 ステレオ SPOT 画像を用いた DEM の作成(八ヶ岳付近)

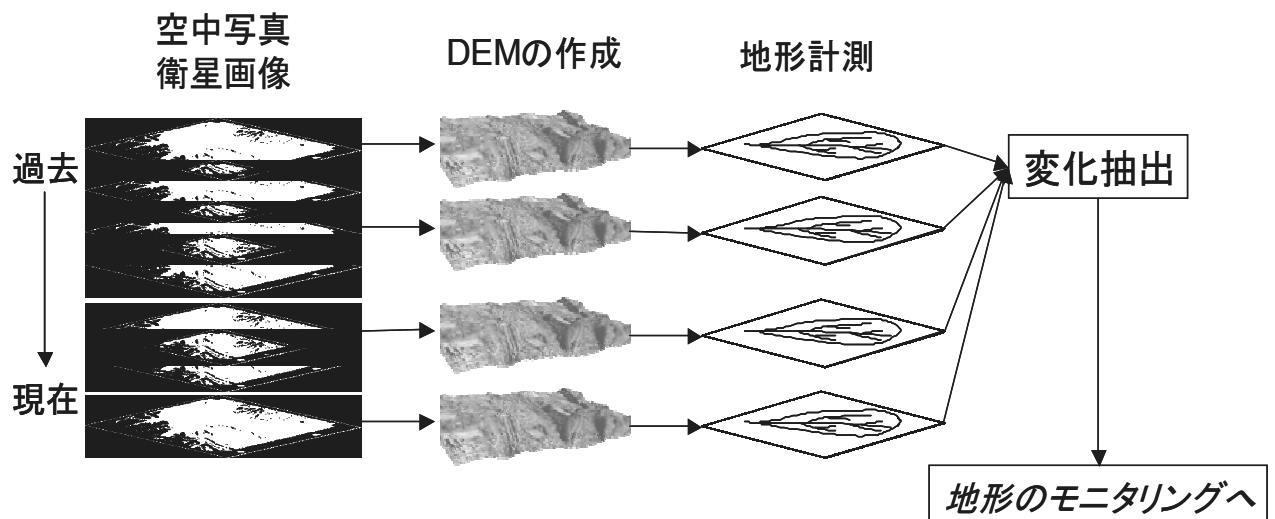


図 4 地形モニタリングの概念

点が GCP とタイポイントの位置である。GCP とタイポイントの座標から空中三角測量を行ない、画像撮影時のカメラの位置・角度、画像間の位置関係などを求める。その後、ステレオペアの各画像に対してカーネル領域を設定し、イメージマッチングによって対応するピクセルを抽出する(村井 1999)。対応するピクセルが見つければ、ピクセルの視差によって標高を求めることができる。これをすべてのピクセルについて行えば、ステレオペアのオーバーラップ部分の DEM が完成する(図 3-C)。

このように作成した DEM の精度はどのようなものであろうか。写真測量で標高を求めるという手法上の制約から、ソースデータとなる写真のクオリティに DEM の精度は依存していることは明白である。これに加え、衛星画像を用いた場合には衛星が太陽同期のために撮影される時刻がほぼ一定になる(SPOT の場合は日本では午前 9 時から 10 時あたり)ということが問題になる。例えば、日本を対象にし、SPOT のステレオペアを用いて DEM を作成しようとすると、衛星の撮影時間が午前 9 時から 10 時あたりになってしまうため、衛星画像は南東から光が当たったものになる。このため、深い谷では稜線の影が南東斜面に生じる。DEM を作成する際には、イメージマッチングにより対応するピクセルを探索して視差から標高を計算するため、斜面に写った稜線の影を谷底として誤認してしまい、実際の谷よりも浅くなってしまふという傾向があるとされている。現在、これらの問題も含め、地形区分ごとにどのような傾向が現われているのかを検証する作業を行っている。

### 3.2 空中写真からの DEM の作成

空中写真を用いて DEM を作る場合には二つの利点がある。一点は衛星画像に比べて画像の解像度が高いことである。

例えば、衛星画像では SPOT のパンクロマティックが解像度 10m、JERS-1 の OPS が 18m である。感覚的には画像の 5 倍程度の解像度が DEM の最高解像度であるため、衛星画像から DEM を作成すると、最低でも数十 m の解像度になってしまう。これに対して、空中写真はもともと解像度が高いため、数 m 解像度の DEM を作成することが可能である。しかし、解像度が高いゆえの問題も生じてくる。衛星画像は撮影時の衛星の位置などが画像中とともに配布されているため、画像の絶対座標を指定する絶対標定の手順が必要ない。しかし、空中写真にはそのような情報は含まれておらず、何らかの形で画像上の座標を入力しなくてはならない。また、解像度が高いため GCP の座標値もより厳密に取らなくてはならない。都市部などでは国土基本図などの大縮尺地形図があるのでこれを用いて標定のための GCP を取ればよいが、山間部などでは GPS などの器材を用いて GCP を取る必要がある。

もう一点は古い空中写真から当時の DEM を求めることができるということである。過去の写真を用いて過去の DEM を求めることができるというのも空中写真を用いた場

合の利点である。国内では、最も古い空中写真は戦後直後の米軍撮影のものに遡ることができる。このため、高度成長期以降に受けた地形の大規模改変より前の地形をある程度復元することができる。しかし、古い写真を用いると、写真の画質が悪い場合や撮影時に用いられたカメラの諸元などがわからない場合も多く、最近の空中写真を用いた場合のように作業を進めることができなくなる。さらに、標定のための GCP を取るために当時の地形図を用いたとしても、評定に用いることができる程度の座標値を得ることができないなど、最悪の場合には写真上の位置と地形図上の位置の対応が取れないということも考えられる。このような場合には取れる GCP にも制限が生じてしまい、たとえ DEM が得られたとしてもその精度は低いものになってしまう。

### 4. 今後の展望

以上のように、衛星画像や空中写真から作成される DEM についての利点と欠点を述べてきた。それでは、水文地形学的手法とリモートセンシング・DEM 的手法を統合すると、どのような効果が期待できるであろうか。前述したように、水文地形学的手法は狭い範囲ながらも時空間的に解像度の高い観測が可能で、しかも水文現象と地形形成との間のプロセスを論ずることが可能である。一方、リモートセンシングや DEM を用いた地形解析の手法は、衛星ないしは航空機による観測であるため、比較的広範囲の現象を一度に把握することができる。これはいうまでもなく、現象の同時性を把握できるということにほかならない。しかも、観測が定期的に行われているため、データを一定の間隔で取得することが可能という反復性も兼ね備えている。

これらの長所を融合することができれば、衛星・航空機による広範囲を、水文地形学的なモデルで現わすことができ、しかも衛星画像などの反復性を利用して、多時期にわたるモデリングが可能になる。これには、現在の状況をモデル化できるということと共に、過去の衛星画像や空中写真を用いることにより、過去の状況も時系列でモデル化できるということも含まれる。

日本国内では第二次世界大戦直後の米軍撮影による空中写真があるため、これを用いれば、戦後直後の自然環境を復元することが可能になる。また、この時期の地形が高度成長期以降の大規模改変より前の、いわば元地形を表していると考えれば、迅速図や絵図などに表現されている土地利用などの情報を用いることにより、近世以降の自然環境を比較的高精度に復元することが可能になるだろう。これは環境変化を考えるうえで重要な情報を与えてくれる。

また、衛星画像を用いて各時期の DEM を作成すれば、広範囲に渡る比較的速度の速い地形変化、例えば土壌侵食や砂丘の移動などを定量的に捉えることが可能になる(図 4)。これはいわば、地形のモニタリングということに

ほかならず、現在広く行われている植生変化や砂漠化のモニタリングのように、最近の環境変化を知り、今後の変化を予測して対策をたてるための有用な手法になると言える。

#### 参考文献

- Band, L. E. (1986): Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, 22, pp. 15-24.
- Nakayama, D. (1997) : The definitions of stream heads on DEMs and their effects on stream numbers and length, *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 32, pp.15-26.
- Nakayama, D., et al. (1999): The detection of soil erosion area using satellite image derived DEM, *Japan-Korea Geomorphological Conference* , Chonju, August.
- Nogami, M. (1995): Geomorphometric measures for digital elevation models, *Z. Geomorph., N. F., Suppl.*, 101, pp.53-67.
- 恩田裕一, 奥西一夫, 飯田智之, 辻村真貴編(1996) : 水文地形学, 古今書院, 267p.
- 中山大地(1999a) : 資料紹介 GTOPO30(アメリカ地質調査所発行 30 秒グリッド数値地形モデル), 法政地理, 30, pp. 45-48.
- 中山大地(1999b) : 遺伝的アルゴリズムを用いた DDM 作成アルゴリズムの開発, GIS - 理論と応用, 7, pp.27-35.
- 中山大地(1999c) : DEM からシミュレートした流路網と手作業により抽出した流路網の対比, 法政地理, 29, pp.28-37.
- 中山大地, 隈元崇 (1999): ステレオ SPOT 画像よりえられる DEM の精度について—活断層研究への応用—, '99 年日本 ARC/INFO・ERDAS ユーザ会, 1999 年 11 月.
- 村井俊治(1999) : 空間情報工学, 日本測量協会, 217p.

注: 本稿は 1999 年 12 月のシンポジウムにおける話題提供の要約である。