

水文地質構造評価のための地形解析システムの開発

西 琢郎 本多 眞
(技術研究所) (技術研究所)

Development of a Geographical Analysis System for Evaluating Hydrogeological Structures

by Takuro Nishi and Makoto Honda

Abstract

This paper describes a computer aided geographical analysis system for evaluating hydrogeological structures. The system was developed to reduce the labor needed to create the various kinds of thematic maps that engineers use to make synthetic judgments. The system consists of four modules that analyze various types of geographical features, and two modules that input, process, and output the data. All of the modules run on a personal computer.

The geographical analysis system extracts lineaments, calculates ground surface inclinations, extracts watersheds, and creates contour maps of the groundwater level. Altitude data for the stream head and spring source can be included to improve accuracy of the groundwater level analysis. Free GIS software is used to input, process, and output the data, so the system has less stringent computer requirements.

概 要

水文地質構造の評価を行う際の判断材料となる各種地形解析図をコンピュータを用いて作図・出力し、図面作成の省力化・コスト削減を図ると共に、解析結果に地質・水理・水文データを重ねて表示することにより、技術者の総合的な判断を補助することを目的とした地形解析システムを開発した。

本システムは、地形解析を行う複数のモジュールと、データ表示等を行うモジュールからなる。これらのモジュールは全てパソコン上で作動する。

地形解析モジュールは、リニアメント抽出、地形傾斜量計算、水系抽出、地下水位コンター作成の4つからなる。特に地下水位コンター作成モジュールでは、沢源頭や湧水点位置データを追加することが可能であり、初期の概略評価から、調査の進展に伴って推定精度を向上させることが可能である。またデータ表示等はフリーのGISソフトを用い、作動環境の汎用性を高めている。

§ 1. はじめに

山地部における主要な地下水である岩盤地下水の流動状況や賦存量の評価にあたっては、水みちとなりうる亀裂系や風化層の分布、地下水位の分布、水系分布などの水文地質構造の評価が重要である。水文地質構造は、対象とする地域の地質特性・水理物性から評価され、詳細な地質調査やボーリング調査によって明らかにされるが、山地部においては通常、ボーリング結果などの既存資料に乏しい。このため、新しく対象地域が設定された際には、詳細な調査に先立って、地形解析や地質概査によって地質構造を推定し、湧水や河川状況などと合わせて水文地質の概略評価が行われる場合が多い。

地形解析は、一般には地形図や空中写真などの判読によって行われる。すなわち、地形等高線の形状やステレオ撮影された空中写真の立体視で読み取られる地形的特徴から地下構造を推定する。ここには、評価者の高度な専門的知識が要求されると共に、評価の基礎となる各種の図面（例えば水系図など）の作成に多くの時間を要することになる。

一方、近年、数値地形標高モデル（DEM：Digital Elevation Model）が、国土地理院などを通じて広く普及し、比較的詳細な地形情報（10mや50mグリッドの標高値）が安価に入手できるようになってきた。これにより、DEMデータを用いた地形解析も一般的になってきている^{1, 2)}など。

本論では、岩盤地下水に対する水文地質構造評価に

あたり、各種の地形解析図面を作成し評価者の判断を補助するツールとして開発した地形解析システムの内容、地形解析手法の理論、解析例について報告する。

§ 2. 地形解析システムの内容

2.1 システム全体構成

本システムは、地形データとして DEM データを用い、パソコンにより地形解析データの作成、各種解析の実施、解析結果の表示を行うもので、DEM データの加工・表示・保存等を行うモジュールと、地形解析を行う複数のモジュールからなる。図-1 にシステムの全体構成を示す。

データ加工・表示・保存等を行うモジュールは、パソコン上で起動するフリーウェアの GIS ソフト (Linux 版 GRASS³⁾) を用いており、作動環境の汎用性と開発に関するコストダウンを図った。また地形解析を行うモジュールは、既存プログラムを改良したものやプログラムへの入出力を制御するシェルプログラムからなる。

地形解析の内容は、①リニアメントの抽出、②傾斜量計算、③水系図作成、④地下水位分布図作成の 4 項目である。リニアメント抽出は地下の断裂系に関する情報を得ることを目的とし、傾斜量は地形角度および起伏から地下の岩盤の風化状況や岩質等に関する情報を得るものである。また、水系図作成では、谷地形を

連ねた水系図と尾根地形を結んだ分水界図を作成し、対象域の水収支検討の基礎情報とする。これらの地形解析の結果を、単独あるいは複数を重ね合わせて表示し、地質図やその他の既存資料も参照して水文地質構造の評価を行うことになる。

以下に、各解析内容について述べる。

2.2 地形解析モジュールの内容

2.2.1 リニアメント抽出モジュール

直線的に発達した谷や傾斜変換線 (地形傾斜の急変点を結んだもの) からなる線状の地形を地形学ではリニアメントと呼んでいる⁴⁾が、このリニアメントは断層による岩盤のずれが地表に現れたものと考えられる場合がある。したがって、リニアメントを抽出することにより、地下の亀裂系の位置と方向に関する情報が得られる。本システムにおけるリニアメントの抽出は、DEM データを用いて作成した地形陰影図を画像処理する方法を主に用いる。

ここで行う画像処理は、後述するエッジ強調であり、画像の陰影が明瞭な部分 (すなわち、深く切れ込んだ谷や地形傾斜の急変点など) を強調するものである。さらに本システムでは、エッジ強調した画像を白黒 2 階調へ変換して強調結果をより鮮明にすると共に、光源位置を変化させた陰影図による抽出結果を重ねて表示させている。このような画像処理による地形情報の抽出は、従来の航空写真や人工衛星画像によっても可能である⁵⁾が、これらの画像はある限られた時間の自

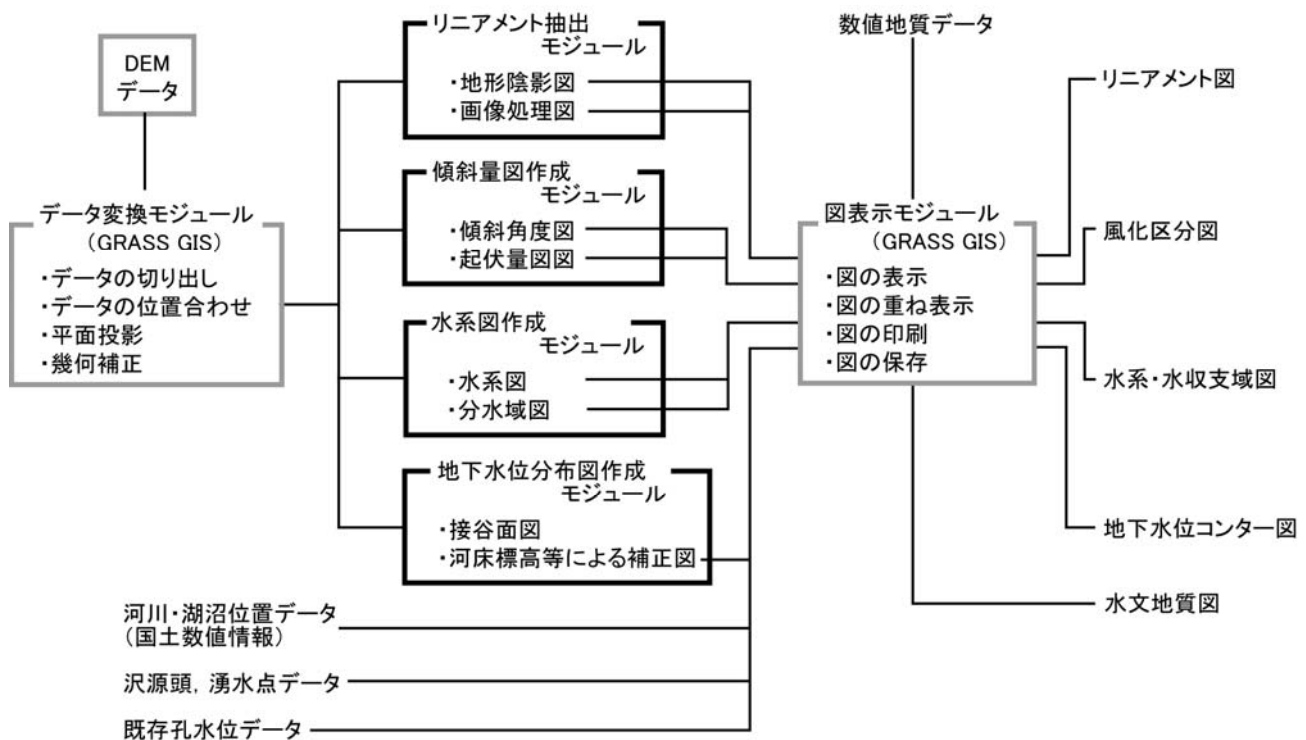


図-1 地形解析システム全体構成

然光に基づくため、影の向きなどが限定されている。この点、DEMを用いることによって、通常はありえない方向の光源による陰影図も作成可能となり、単一の光源位置によるエッジ強調の偏りが低減される。

2.2.2 傾斜量図作成モジュール

地形傾斜量としては、地形傾斜角および起伏量を計算する。

地形傾斜角を決める要因には様々なものが考えられるが、一般に山地部においては斜面崩壊などによる急崖の形成のほかに、基盤岩の硬さが反映されている場合が多い。岩の硬さは岩種による相違だけでなく風化度合いによっても変化することから、基盤岩の岩種が同一な場合は、地形傾斜角から岩盤の風化度合いに関する情報が読み取れる。また、起伏量は河川による開析度合いを示す指標となり、山地の場合は山体の形成時期や基盤岩の岩種に応じた差別侵食の結果など地下の地質状況が反映される。さらに、起伏量の小さい緩傾斜部は地下水への浸透が促進されやすい涵養地帯、逆に急傾斜部は地表水の流出地帯となりやすく、緩傾斜部から急傾斜部への変換点では地下水の湧出が生じやすい、など水文状況に関する情報を得ることが可能となる。

本システムにおいて地形傾斜角を求める方法は、角度を求める点を中心とした8近傍(中心点を含む3×3のグリッド点)から最小二乗法により平面を近似して角度を計算する方法を用いている。また、起伏量は各グリッド点に対する接峰面標高と接谷面標高の差を求めることにより計算する。接峰面は対象としている地域の山頂や尾根頂などの地形的高所を連ねた仮想的な地形面で、接谷面は同様に地形的低所を連ねた面である。それぞれの面の標高値は、値を求める点を中心とした任意のn×nのグリッド範囲内の最高標高もしくは最低標高を抽出するグリッド法にて計算する。

2.2.3 水系図作成モジュール

本システムでは、水系図を作成するための地形的分水界の抽出と水系の抽出には、GRASSの標準機能を用いている。GRASSでは水系の抽出に最小コスト理論による経路探索アルゴリズムが用いられており⁶⁾、ある対象点とその近傍の点の高度差を水の流れに対するコストと考え、これを最小とする(最も水が流れやすい)経路を選択するものである。

2.2.4 地下水位分布図作成モジュール

地形情報から地下水位分布を推定する方法として、地球統計学的手法である外部トレンド型クリギング⁷⁾を応用した推定手法を開発した⁸⁾。この手法は、DEMデータから求めた接谷面を地下水位分布の平均的なトレンド(傾向)と仮定し、これに河床部や沢源頭の標高値などを加えることによってトレンドを補正するも

のである。本手法による地下水位推定の概念図を図-2に示す。

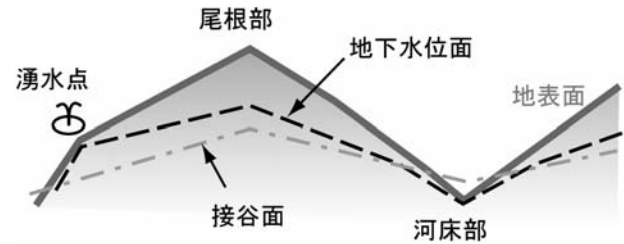


図-2 地下水位面推定の概念図

接谷面は、前述したようにある対象地域の地形的低所を連ねた仮想的な地形面である。一般に、山地部においては谷の河床が最も低地となるため、接谷面は対象地域の河床標高を概ね代表した面とみなされる。河床では一部の谷を除けば基本的には河水が流れており、地下水面の一部が地表に現れている地点と考えてよい。したがって、河床の標高を連ねた接谷面は、第一近似として地下水面の一部を連ねた面とみなしうる。しかし、DEMデータから接谷面を推定する際には、前述したように任意のグリッド内の最低標高を代表値とするため、必ずしも河床の標高を抽出するわけではない。そこで、河床標高や沢源頭標高の実測値を用いて推定値を補正するのである。また、岩盤亀裂からの湧水点のように、接谷面で推定された地下水位面よりも上方に地下水位があることを示すデータが得られる場合は、推定値を湧水点標高まで戻すことによってトレンドを補正する。

§ 3. 地形解析の理論

3.1 画像処理によるリニアメントの抽出

DEMを用いた地形陰影図では、各グリッド点における地形傾斜角度・方位と光源(太陽)の位置から反射光の強度の比が求められる。

$$\cos \beta = \cos \theta \cos \Delta + \sin \Delta \cos(A - \phi) \quad (1)$$

ここで、 $\cos \beta$: 反射光強度比、 θ : 光源からの入射角、 Δ : 標高データから算出したその画素位置における地面の傾斜角、 A : 光源方位角、 ϕ : グリッド点における地面方位角である。

リニアメントの抽出は、この反射光強度が急変する点(エッジ)を空間フィルタリングによって強調することにより行う。空間フィルタリングは、対象とするグリッド点に対して、適当な範囲での空間フィルターを対象点に被せ、周囲の点の値を反映させた近傍演算

処理を行いながら徐々に移動することによって行われる⁹⁾ (図-3)。空間フィルターの形式には様々なものがあるが、グリッド点の値の変化を偏りなく抽出するものとして、2次の偏微分であるラプラシアンフィルターが一般的に用いられる。

ある座標 (i, j) における値 $f(i, j)$ に対する2次偏微分は、

$$\nabla^2 f(i, j) = \Delta_x^2 f(i, j) + \Delta_y^2 f(i, j) \quad (2)$$

であるが、これをデジタルデータに当てはめるために4近傍演算による離散近似値を求めると、

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(i, j) = & [f(i+1, j) - f(i, j)] - [f(i, j) - f(i-1, j)] \\ & + [f(i, j+1) - f(i, j)] - [f(i, j) - f(i, j-1)] \\ = & [f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1)] - 4f(i, j) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。式(3)は対象となるグリッド点の値に対し、上下左右の点の値の和と対象点の値を4倍したものの差を意味している。また、斜め方向の値も考慮した場合は、対象点の8近傍の値の和と対象点の値を8倍したものの差を取るようになる。

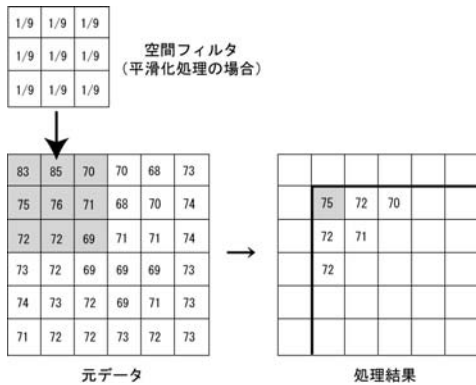


図-3 空間フィルタリングの概念図⁹⁾を基に加筆修正

3.2 地下水位推定手法

数少ない地下水関連データから広域の地下水位分布を求めるために、ここでは前述したように地球統計学(Geostatistics)¹⁰⁾の手法の一つである外部変数トレンド型クリギング(Kriging with external drift⁷⁾)を用いている。

いくつかの観測点で地下水位が得られるとき、地下水位分布の空間的なばらつき(不確定性)をモデル化したものを空間構造(spatial structure)といい、空間統計学では確率場(random field)と呼んでいる。

ある位置 \mathbf{u}_0 での地下水位の不確定性は、単純に確率変数(random variable)として、 $Z(\mathbf{u}_0)$ と表すことができる。確率変数とは平均値や分散に基づく確率分布にしたがって得られる変数である。これに対して確率変数 $Z(\mathbf{u}_0)$ の \mathbf{u}_0 を領域全体に拡張して、確率変数の集合として任

意位置 \mathbf{u} における不確定性を $Z(\mathbf{u})$ と表したものが確率場である。

確率場 $Z(\mathbf{u})$ は一般に、平均値(トレンド)の空間的な変化を考慮して、次式のようにトレンド成分 $\mu(\mathbf{u})$ とランダム成分 $\varepsilon(\mathbf{u})$ の和としてモデル化される。

$$Z(\mathbf{u}) = \mu(\mathbf{u}) + \varepsilon(\mathbf{u}) \quad (4)$$

ここで、ランダム成分 $\varepsilon(\mathbf{u})$ の特性は二次までのモーメントで表され、次式のように平均値0、共分散が2点間の距離ベクトル \mathbf{h} の関数として表される定常確率場である。

- 一次モーメント(平均値関数):

$$E[\varepsilon(\mathbf{u})] = 0 \quad (5)$$

- 二次モーメント(共分散関数):

$$E[\varepsilon(\mathbf{u}) \cdot \varepsilon(\mathbf{u}')] = C(\mathbf{h}) \quad (6)$$

またトレンド成分 $\mu(\mathbf{u})$ は通常、位置座標 \mathbf{u} の関数として次式のようにモデル化される。

$$\mu(\mathbf{u}) = \sum_{k=0}^K b_k f_k(\mathbf{u}) \quad (7)$$

ここで b_k は未知パラメータである。地下水位分布の場合は、地形起伏に起因するトレンドを有していることが想定されるため、任意位置 \mathbf{u} における地表面レベルを関数 $g(\mathbf{u})$ として表し、これを外部変数とした以下の線形関数トレンドモデルを用いる。

$$\mu(\mathbf{u}) = b_0 + b_1 g(\mathbf{u}) \quad (8)$$

ここで b_0, b_1 は回帰係数である。

このように定義した確率場のモデルを観測データに基づいて同定する手法について、ここでは最尤法(maximum likelihood)による推定法を示す。

いま、ある時刻の地下水位観測データ $\mathbf{z} = \{z(\mathbf{u}_1), \dots, z(\mathbf{u}_n)\}^T$ が与えられたとき、観測データの共分散行列を \mathbf{C} とする。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C(0) & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) & \dots & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_n) \\ C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) & C(0) & \dots & C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_2) & \dots & C(0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

観測データの分布がガウス分布に従うと仮定すれば、 n 個の観測データから得られる同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\theta)$ は次式で与えられる。

$$p(\mathbf{z}|\theta) = (2\pi)^{-n/2} |\mathbf{C}|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu})\right\} \quad (10)$$

ただし、 $|\mathbf{C}|$ は \mathbf{C} の行列式を表す。ここで $\boldsymbol{\mu}$ は観測値のトレンドベクトル $\{\mu(\mathbf{u}_1), \dots, \mu(\mathbf{u}_n)\}^T$ で、パラメータ θ と同時に推定する。

式 (10) は、パラメータ θ の関数と見なせば尤度関数である。すなわちこの尤度関数を最大とするパラメータ $\hat{\theta}$ が、最適な推定値（最尤推定量）となる。計算上は、次式の負の対数尤度を用いて最小化問題として、ガウス-ニュートン法などの最適化手法を用いて最小化する。

$$L(\theta) = -\ln p(\mathbf{z} | \theta) = \frac{n}{2} \ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln |\mathbf{C}| + \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}) \quad (11)$$

この確率場のモデルを基にして、線形回帰手法を用いることで観測値の得られていない地点の地下水位を予測することになる。既存観測地下水位や沢源頭標高など、地下水位データが位置 u_1, u_2, \dots, u_N において N 個得られているとする。このとき任意位置 u_0 における地下水位のクリギング推定値は、次式のように観測データの重み付き線形和で表される。

$$\hat{H}(u_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i H(u_i) \quad (12)$$

ここで λ_i は N 個の地下水位データ $H(u_i)$ に対する重み係数である。

また、地下水位関連データとしては、亀裂からの浸出点など、その標高以上に地下水位が確認できることを示すデータが存在する。このような情報については、一旦その位置において地下水位の推定を実施し、推定水位が標高以下となった場合にその位置の地下水位を標高値としたデータを加えるという、フィードバック解析によりデータの補正を行っている。

§ 4. 解析例

4.1 解析概要

ここでは、本システムによる出力例として、国土数値情報 50m メッシュデータを用いた解析例を示す。解析対象としたものは、花崗岩を基盤岩とする山地（約 $10 \times 6.9 \text{ km}$ ）で、リニアメント抽出図、傾斜角区分図、水系図、地下水位コンター図を作成し、地下水流動方向を推定した。

4.2 解析結果

4.2.1 リニアメント図

北西、北、北東、東南の4方向から光源を当てて作成した地形陰影図から、ラブラシアンフィルターによってエッジを強調し、2階調処理により強調点をさらに明瞭にした図作成した。これを陰影図に重ねがきしたものを図-4 に示す。この図より、図右側 1/3 の領域ではほぼ南北方向に長く伸びる谷地形が顕著であるのに対し、それ以外の領域では、北東-南西系と北

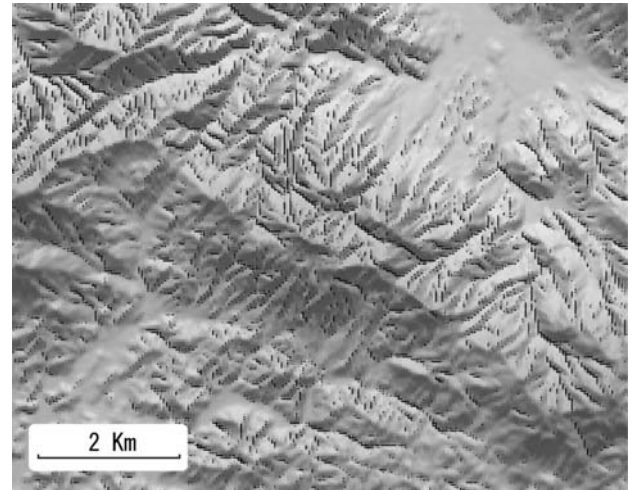


図-4 エッジ強調によるリニアメントの抽出（黒点：強調されたエッジ）

西-南東系の谷が卓越する傾向が明瞭に読み取れる。

4.2.2 傾斜量図

図-5 に傾斜角度区分図を示す。この図より中央の分水嶺（点線）より北側の斜面において傾斜角が大きい地域が広く分布し、分水嶺の南側および図の右上にでは傾斜角度が小さい地域が広いことがわかる。実際の踏査結果では、傾斜角の大きい分水嶺北側では風化深度が浅く新鮮な岩盤が露出していることが見出され、図の右上の領域では花崗岩の結晶が粗粒で風化深度が深いことが確認されており、傾斜量が風化深度の指標となりうることを示している。

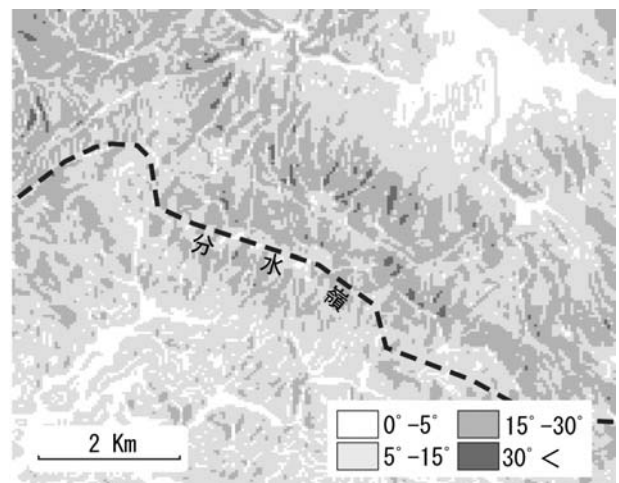


図-5 傾斜角度区分図

4.2.3 地下水位コンター図

図-6 に分水界図、図-7 にグリッド法による接谷面のコンター（点線）と、これを谷線標高により補正したもの（実線）を示す。図-7 から、谷標高で補正した地下水位コンターはグリッド法の接谷面より全体に

高くなり、この事例ではグリッド法の接谷面は地下水位の評価としては過小評価となる傾向を示していることが推定される。

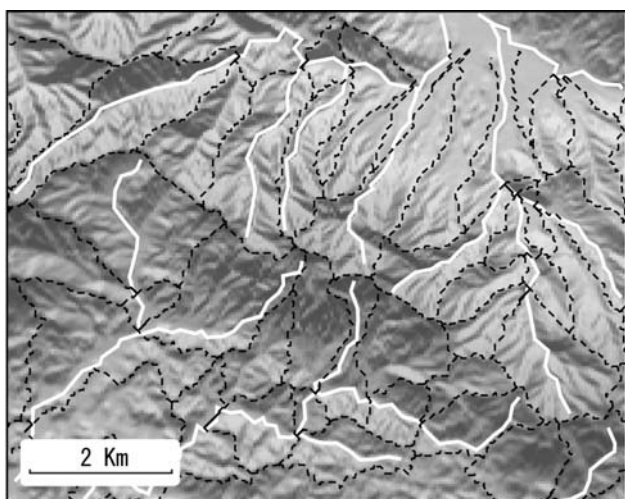


図-6 水系図 (点線：分水界、白線：河川)

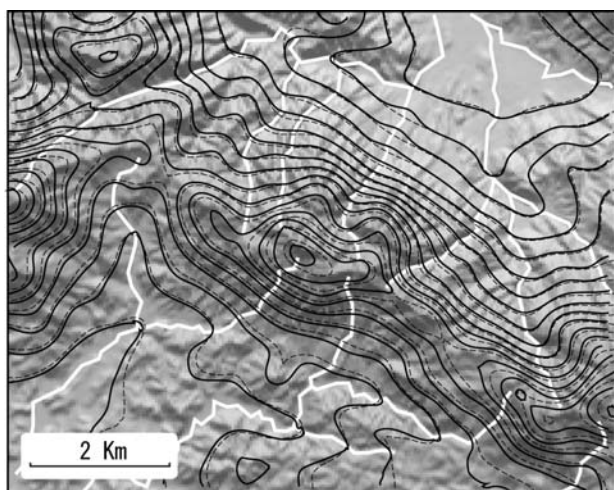


図-7 地下水位コンター図 (点線：接谷面、実線：河床標高により補正したコンター)

図-8 に上記の図から推定される地下水流動方向を示す。地下水は、基本的には地下水位コンターに直交する方向に流れると想定し、リニアメントの方向性を勘案して推定した。この図では分水嶺北側に北西-南東方向に伸びるリニアメントがあり、地下水面の形状からもこの方向への流動が生じうると推定された。

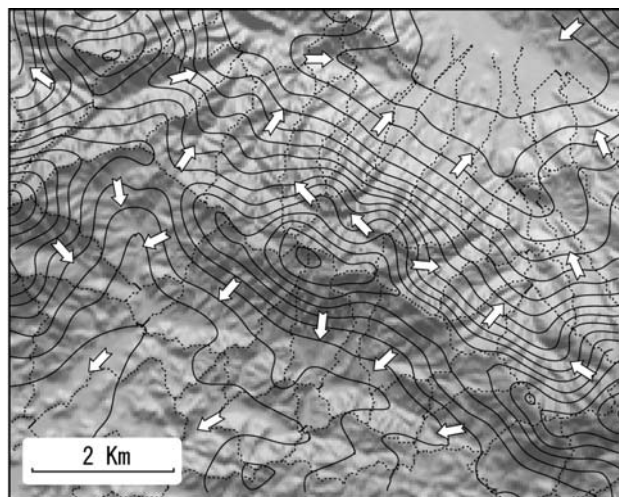


図-8 地下水流動方向推定図 (矢印：流動方向、黒線：地下水位コンター)

§ 5. おわりに

DEM データを用いパソコンによって各種の地形解析を行い、水文地質構造評価を総合的に行うシステムの内容を報告した。今後は、地下水位分布推定において、尾根付近の地下水位を補正する方法を考案することが課題である。

<参考文献>

- 1) 宇根 寛、小室勝也：“詳細地形データによる変動地形の表現”，月刊地球，号外 No. 28，pp.22~29, 2000.
- 2) 川畑大作、岡田篤正、竹村恵二：“50m メッシュ DEM 陰影図による活構造の抽出”，情報地質，Vol.11, No.3, pp.183~188, 2000.
- 3) GRASS Development Team: “GRASS: Introduction”, <http://grass.baylor.edu/>
- 4) 地学団体研究会編：“地学辞典”，pp.1384, 1996.
- 5) 岩下 篤、須藤 昇、三澤良文、前田耕平、坂田敏文：“リモートセンシング画像解析による活構造地域の断層マッピング”，東海大学紀要 海洋学部，No.48, pp.175~192, 1999.
- 6) Ehlschlaeger, C.: “Using the A^T search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation data”, Proc. International Geographic Information System Symposium, pp.275~281, 2002.
- 7) Galli, A. and Meunier, G.: “Study of a gas reservoir using the external drift method”, In Matheron, G. and Armstrong, M. eds., “Geostatistical Case Studies”, pp.105~120, D. Reidel Pub. Co., 1987.
- 8) 西 琢郎、本田 眞：“水文地質構造評価のための地形解析システムの開発”，日本応用地質学会研究発表会講演論文集，pp. 31~32, 2003.
- 9) 長谷川均：“リモートセンシングデータ解析の基礎”，pp.74~77, 古今書院, 2002.
- 10) 地球統計学研究委員会訳編：“地球統計学”，p.266, 森北出版, 2003.