

10. 地形情報を用いた地下水面推計の試み

○長谷川怜思 (八千代エンジニアリング)・山本 晃 (同)・吉田広人 (同)・
菊池英明 (同)・富樫 聡 (産業技術総合研究所)・内田洋平 (同)

1. はじめに

2014年7月から「水循環基本法」が施行、翌2015年には「水循環基本計画」が策定され、自治体を主体に地域の関係者が連携しながら、一体的かつ総合的な流域マネジメントが推進されている。このような背景のもと、地下水の保全と持続可能な利用を目的に、地下水のモニタリングやマネジメントを行う地域が増加している。

一方、2020年の水循環基本計画改定時には、「水循環系は自治体を越えた広域課題となることが多く、水循環の収支や挙動の実態がつかみにくいこと」、「活動に対する十分な人員と予算確保が難しいこと」などの課題も明らかとなっている²⁾。なかでも、地下水流動系の実態把握に際して重要な地下水面等高線の作成には、既存井戸、湧水や地下水観測孔などの限られた地点で、それらの一斉測水時の観測水位を根拠として等ポテンシャル線を描く必要があり、一連の作業に膨大な時間と費用を要する。故に、調査面積が広大である場合や、民地への立ち入りに制限があるような地域では、地下水面等高線を描くことが困難で、未だ地下水面の分布が明らかでない地域も存在する。

そこで筆者らは、現地の地形・地質・水文特性から広域の地下水面分布を、客観的かつ合理的に把握する解析手法の確立を目指し、地形情報を用いた地下水面分布の推計を試みた。ここではその解析事例の一部を紹介する。

2. 地形の浸食と谷密度

地形は地球表面上における起伏で、形態 (Form)、構成物質 (Material)、形成作用 (Process)、形成年代 (Age) の主に4つの属性を有している。また、地形は気候による外的営力を受けながら、風化・浸食・運搬・堆積サイクルのなかで絶えず変化している。

起伏量に差異を生じる要因は、地盤を構成する地層や岩石の性質が異なることに帰着し、浸食に対する抵抗性の違いが、起伏量に現れる。谷の発達形態は、構成物質の力学的強度ではなく透水性に強く制約されていることが Suzuki et al(1985)によって示されている。これによると、透水性が高く強度が大きい(硬い)地山では、起伏量が大きく谷密度の低い地形となり、透水性が低く強度の小さい地山では、起伏量が小さく谷密度の高い地形を形成する³⁾ (図-1参照)。

したがって、現在の地形を詳細に読み取ることで、その土地の地層・岩石の性質や外的営力である水の流れの履歴を把握することができる。また、地形には様々な要素が含まれるが、山間、台地や低地の谷底には通常水流が存在し、地形の構成物質を絶え間なく浸食・削剥している。常時流水が認められない場合でも、流域内に浸透した水は重力の作用にともなって、地表水や地下水として

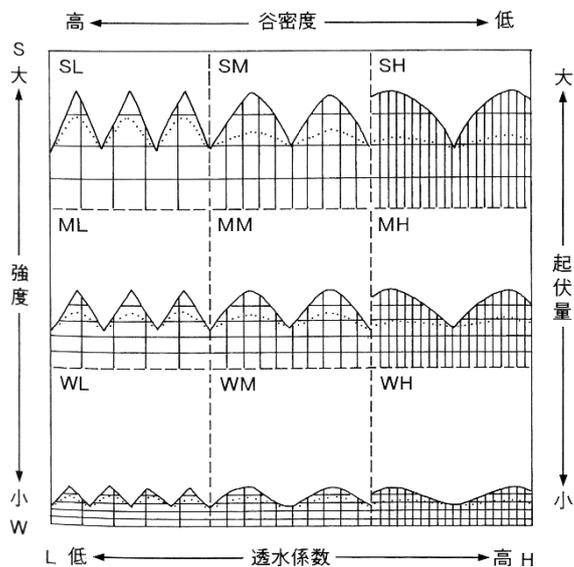


図-1 基盤岩の強度と透水性を示す模式図⁴⁾

流動し、谷はこれらの水を流域外へと排水させる役割を担っているため、地下水のフラックスは恒常的に存在しているはずである（図-2 参照）。

モンスーンアジアのような湿潤地域では、地下水面の形状は概ね地形面に調和的な形態を有していることが知られている。地形面の起伏に応じて地下水面が形成されるため、地下水面の水理ポテンシャル分布にも変化が生じ、その結果ポテンシャル差によって地下水が流動する^{5,6)}。

故に、地形は地下水流動系の上部境界条件となる地下水面のおおよその形状を決定し、器にあたる地質は系の内部における水のフラックス分布に影響を与えている⁷⁾。日本国内における基本的な水の循環系は、降水・降（融）雪→地下水→河川水となり、平常時や渇水時における河川水の大部分はもとをたどれば地下水によって賄われる（図-2、図-3 参照）。この基本的な流動場は山地、台地・丘陵地や低地でもほぼ変わらないため、谷の分布から大局的な地下水の流動場を想定することが可能となる。

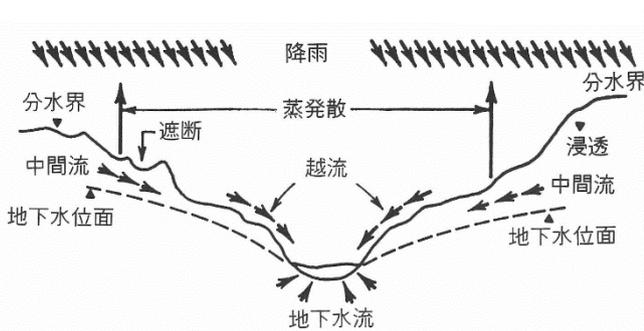


図-2 基本的な水循環系の概念図⁸⁾

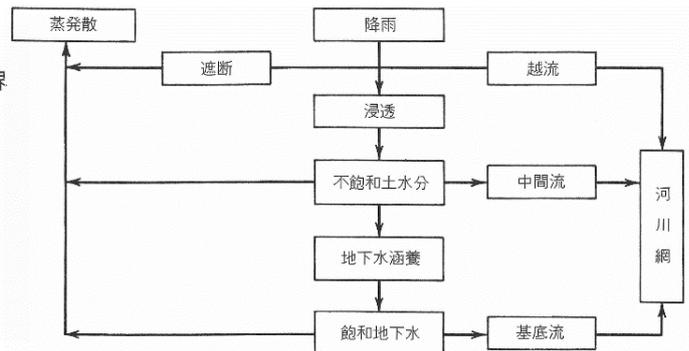


図-3 水循環系の構成要素と水の移動経路⁸⁾

3. 高解像度 DEM を用いた地下水面の推計手法

3.1 源頭地形に着目した水系網図の作成

地形図から谷の部分だけを抜き出し、その平面的な分布状態を表現した図を水系網図と呼ぶ。地下水が湧出して河川となる源頭付近では、図-4 に示すような微地形が認められる。このうち、麓部斜面(i)と谷底面(k)との境界付近では、恒常的に地下水が湧出している。地中から湧出する地下水流や豪雨時の表面流は、時に流量を増減しながら地面を穿つように浸食するため、斜面は後方へと開析されて、より深い谷を形作っていく。

本研究では、国土地理院から公開されている数値標高モデル（DEM：Digital Elevation Model）から、恒常的な地下水湧出が想定される源頭地形を判読し、ESRI 社製の ArcGIS ならびに水文解析ツールを用いて、地形の最大勾配から水系網図の作成を試みた。図-5 は、山間地域にて本手法を用いた結果を示す。本図から、作成した水系網図が谷底の位置と整合している様子を確認できる。

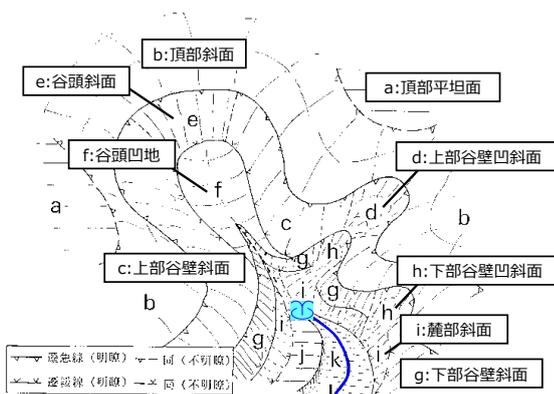


図-4 源頭付近における微地形要素⁹⁾

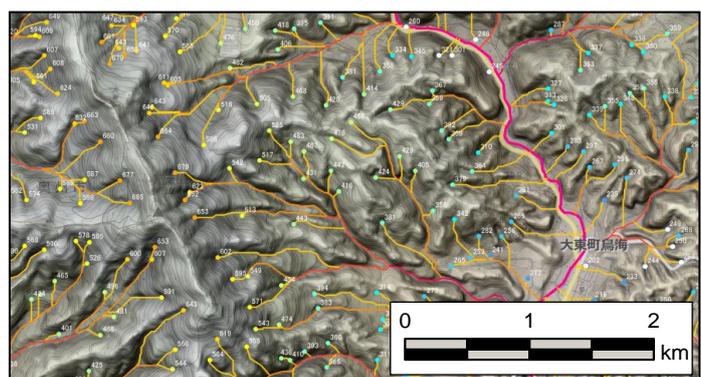


図-5 作成した水系網図の一例¹⁰⁾

3. 2 水系網接谷面による地下水面分布の推計

自然地理学の分野では、地形形成の初期段階から現在までの浸食量を定量的に評価する手法として、一般に接峰面法が用いられている。これは、大小の谷が刻まれた山地を大風呂敷のようなカバーで上から覆った際に、細かな谷の起伏を取り除いた仮想の地形面を表現している（図-6 参照）。接峰面は浸食によって谷が刻まれる以前の原地形に近い面と考えられ、これを図化したものを接峰面図（Summit level map）という。接峰面図作成にあたっては、地形図上に方眼（1辺が数 km）用紙を重ねて、各方眼内の最高標高点を 1 点抽出し、隣接する最高標高点群から新たに等高線を描く手法が用いられている¹¹⁾。

一方、各方眼内の最低標高点を用いたものを、接谷面図（River level map）と呼び、本図は谷底の面的な高度分布を把握することができるため、大局的な傾斜変換線等を解析する際の一助となる。先にも述べた通り、河床では一部の谷を除けば基本的には周辺から地下水が湧出して河水が流れており、地下水面の一部は地表に現れている。したがって、地域の地形・地質・水文・気象特性を色濃く反映した水系網図から接谷面図を作成できれば、地下水面の一部を連ねた面に近似した大局的な地下水面の分布を推定することが可能となる。

そこで本研究では、図-7 に示す作業手順に則して水系網接谷面図を作成し、これを既知の地下水面等高線図と比較することで、地下水面分布と読み替えることが可能かどうか検証を行った。

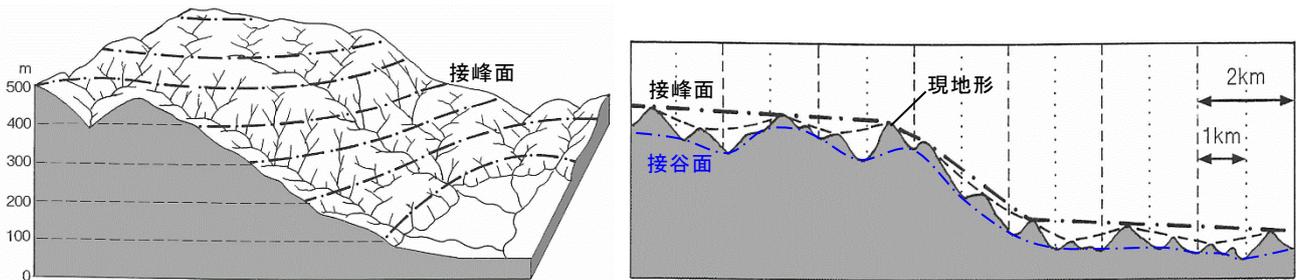


図-6 現地地形と接峰面・接谷面との関係を示す概念図¹¹⁾

文献より引用の図に一部加筆

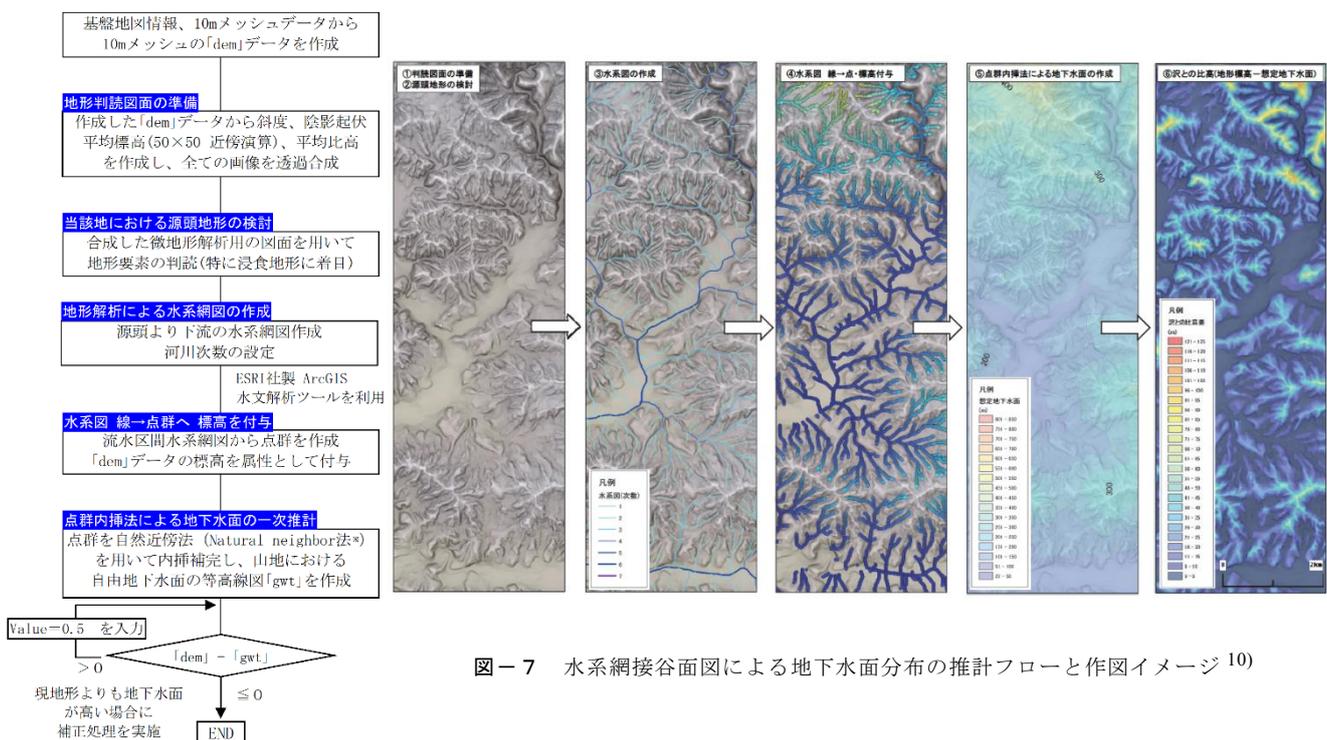


図-7 水系網接谷面図による地下水面分布の推計フローと作図イメージ¹⁰⁾

4. 地形量から推計した源頭の精度検証

4. 1 山間地における推定源頭の精度検証

ここでは、基盤地図情報 10m メッシュ標高データによる源頭分布の検証結果について報告する。本調査対象地は、東北地方南部北上山地に位置し、標高 100~800m 程度の丘陵・山地に広く白亜紀に貫入した花崗岩体が分布する地域である。検証に先立ち DEM データから水系網接谷面図を作成し、その上端を推定源頭と見立てて発生させたポイントに DEM 標高を付与した。現地検証にあたっては、なるべく定常の地下水状態を把握できるよう平成 28 年 11 月を選定し、踏査時には事前に推定した源頭を 105 地点で目視にて確認し、モバイル GPS と 1/25,000 地形図を併用して実源頭標高を記録した。図-8 は、推定源頭と実源頭の標高関係を視覚化したものである。本調査結果では、両者の標高差が±30m の範囲に全体の 71.4%がプロットされ、本解析手法が地下水の湧出地点を比較的よく捉えていることが確認された。一方で標高差が 70m 以上と大きく乖離した 3 地点については、追加踏査の結果から、特殊な地質構造が伏在している地点であることが判明した。

これらの結果から、小起伏に富む山間地では地形データのみから地下水の湧出地点を、ある程度の精度で推定できることが裏付けられた。

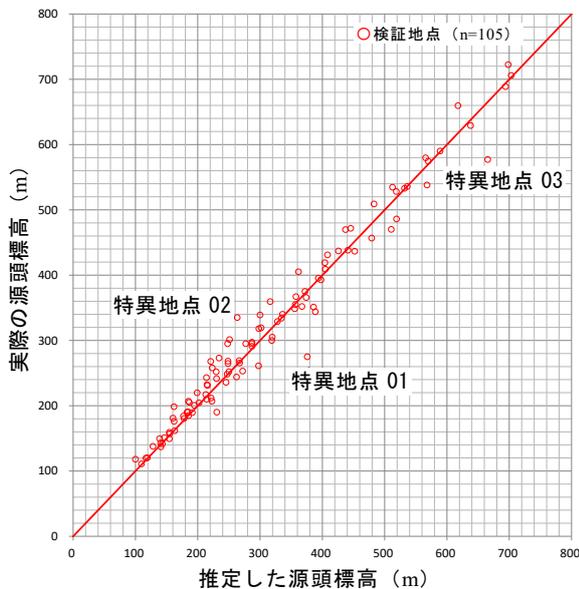


図-8 現地踏査による源頭検証結果¹⁰⁾

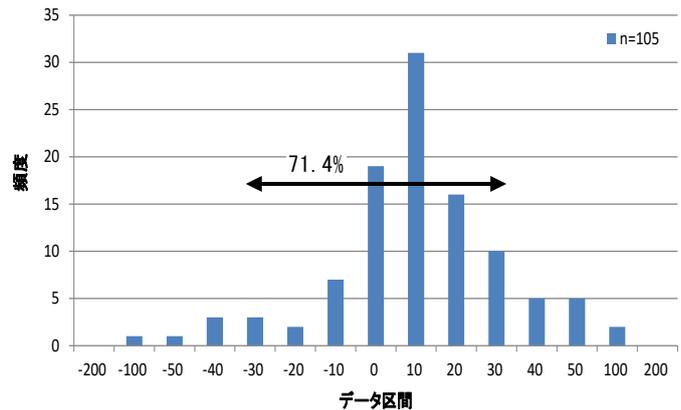


図-9 推定源頭と実源頭との標高差頻度分布¹⁰⁾

標高差は(推定源頭標高-実源頭標高)にて算出

4. 2 測水結果に基づく既往地下水面等高線図との比較検証

ここでは、考案手法により作成した水系網接谷面図を、地下水面等高線図として読み替えることが可能かどうかを検証するため、井戸や湧泉の測水結果から得られた既往地下水面等高線図との比較を行った結果を報告する。検証データに用いた DEM は、基盤地図情報 10m メッシュ標高データである。本検証では、山間地以外における地下水面等高線の再現精度を確認するため、井戸や湧泉の測水結果から地下水面等高線図が作成されている地域として、八ヶ岳西麓の火山麓扇状地と、九州地方筑後川流域に位置する扇状地を比較対象に選定した。

八ヶ岳西麓の火山麓扇状地の検証結果を図-10 に、筑後川流域における扇状地の検証結果を図-11 に示す。水系網接谷面図はいずれの結果とも、既往の地下水面等高線図の形状と概ね調和しており、等高線の間隔(動水勾配)もほぼ一致している。一方、扇状地内に基盤岩の高まりが存在する

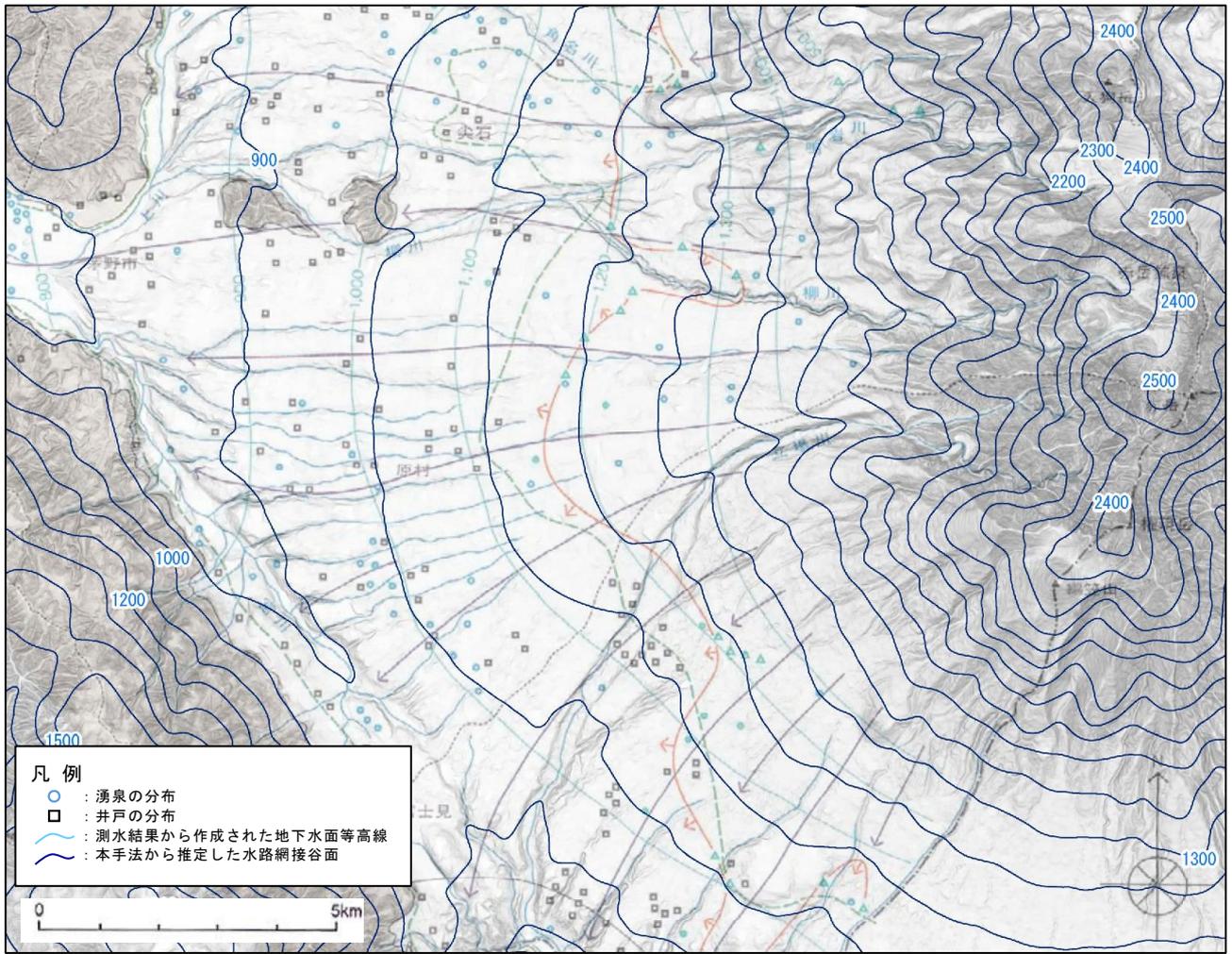


図-10 火山麓扇状地における本手法の適用事例

測水結果から得られた地下水面等高線¹²⁾と、水路網接谷面図との比較

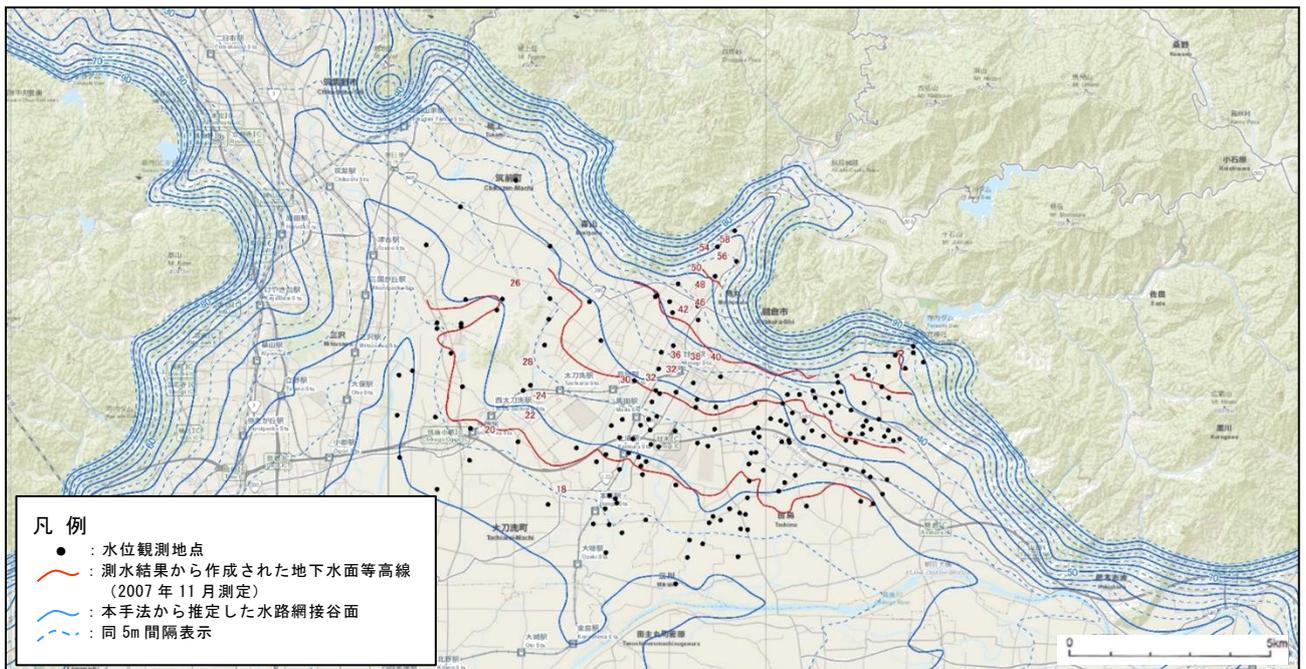


図-11 複合扇状地における本手法の適用事例

測水結果から得られた地下水面等高線¹³⁾と、水路網接谷面図との比較

ような地域では、測水結果と乖離していることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究では、国内複数地域を対象として、高解像度 DEM を用いた地形解析により、地下水面分布の推計を行った。現時点では全国で同一精度を有する基盤地図情報 10m メッシュ標高データを用いて解析を実施したが、水系が未発達地域や一部に難透水基盤が露出するような地域には本解析手法が適さないという課題も確認された。なお解析結果にて、実測値との乖離が認められた部分については、より高解像度の標高データや、別の解析手法を併用することで改善できる可能性もあるため、今後も引き続き国内の複数地域を対象として研究を行う予定である。

客観的かつ合理的な解析に基づく本手法は、水循環の実態解明に対して十分な人員と予算確保が難しい地域でも適用可能であることから、流域における地下水流動の理解や、広域的な地下水流動場の評価等への活用が期待される。

参考文献

- 1) 内閣官房水循環政策本部 (2015) : 水循環基本計画.
- 2) 内閣官房水循環政策本部 (2018) : 水循環基本計画の見直しに向けて.
- 3) Suzuki, T., Tokunaga, E., Noda, H. and Arakawa, H. (1985): Effects of rock strength and permeability on hill morphology.
- 4) 日本応用地質学会 (2000) : 山地の地形工学, 古今書院.
- 5) József Tóth (1962) : A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada.
- 6) Hubbert, M. K., The theory of groundwater motion, J. Geol., •8 (8), 785-944, 1940.
- 7) 榎根 勇 (1989) : 河川と地下水, 地学雑誌, 98-2, pp.42-51.
- 8) 大西有三 訳 (1995) : 地下水の科学 I, 土木工学社.
- 9) 恩田ほか (1996) : 水文地形学-山地の水循環と地形変化の相互作用, 古今書院.
- 10) 長谷川怜思・磯村 敬・吉川修一・富樫 聡・堀内瀬奈・緒方 陸 (2017) : 高解像度DEMを活用した花崗岩分布域の水文調査事例, 平成 29 年度日本応用地質学会研究発表会講演予稿集.
- 11) 鈴木隆介 (1998) : 建設技術者のための地形図読図入門 第 1 巻 読図の基礎, 古今書院.
- 12) 熊井久雄 (1994) : 八ヶ岳山麓の地下水, アーバンクボタ 特集「八ヶ岳」, No.33, pp.40-47.
- 13) HASEGAWA S., Oishi A., Miyazaki S. (2010) : Hydrogeology and water balance in R.Chikugo-gawa Plain, Fukuoka Prefecture, Japan. International Association of Hydrogeologists Selected Papers, 215-232.