

(S3-14) 水資源の適正管理と持続可能な利用にむけた地下水流動場の可視化技術

○長谷川怜思¹、山本 晃¹、井川尚之¹、原 昌成¹、鷲見浩司¹、坂元寿幸¹¹ 八千代エンジニアリング

1. 背景および研究目的

地下水は地盤を構成する重要な要素であるとともに、良好な水質と安定した水温等優れた特性を有する貴重な地域資源である。2014 年に「水循環基本法」が施行され、自治体においても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事例が増えている。特に最近では、大規模災害発災時のライフライン遮断に備えた災害用井戸を学校、公園や地域の避難場所に設置するなど、有事を見据えた地下水利用が着目されつつある。水資源の適正管理と持続可能な利用のみならず、人間活動に由来した特定有害物質の浸透・拡散防止措置を適切に行う際も、地下水流動や地域水循環の実態把握・モニタリングが肝要である。

しかしながら、地下水の大局的な分布を地下水面等高線として可視化するには、既存井戸、湧水や地下水観測孔などで一斉測水を実施し、これら観測水位に基づい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。加えて、立入制限があるような地域では、地下水面等高線そのものを描くことが困難であり、いまだ地下水面の分布すら明らかになっていない地域も国内に多数存在している。

筆者らはこれらの制約条件や課題を解決すべく、高解像度の DEM を用いて客観的かつ合理的に広域の地下水面分布を把握する解析手法の確立を目指し、地下水流動場の可視化を試みてきた^{1~4)}。

2. 地下水流動場を規制する地形

地下水は全水頭（ポテンシャル）の高い部分から、低い部分へと流動し、このポテンシャル分布は、Hubbert (1940)や、Toth (1962)らの鉛直二次元断面モデルによって、①地下水面の形態が地形面の形態によって近似でき、②地形的な高まりでは深さとともに水頭が減少し、谷底では深さとともに水頭が増加することで、③加圧層が存在しない場合にも地下水が自噴することが表現されている^{5~6)}。

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)といった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おり、地盤を構成する地層や岩盤特性は、浸食に対する抵抗性の違いとして起伏量に現れる。

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できると考えられる。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・削削している。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、地下水の流れが恒常的に存在している（図2 参照）。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ポテンシャル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し、その可視化を目的とした Flow System for Water Resources Management and Sustainable Use

HASEGAWA Satoshi¹、YAMAMOTO Akira¹、IGAWA Naoyuki¹、HARA Masanari¹、WASHIMI Koji¹
and SAKAMOTO Nobuyuki¹ (¹YEC)

連絡先：〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 八千代エンジニアリング（株） 長谷川怜思

TEL 03-5822-6376 FAX 03-5822-2799 E-mail st-hasegawa@yachiyo-eng.co.jp

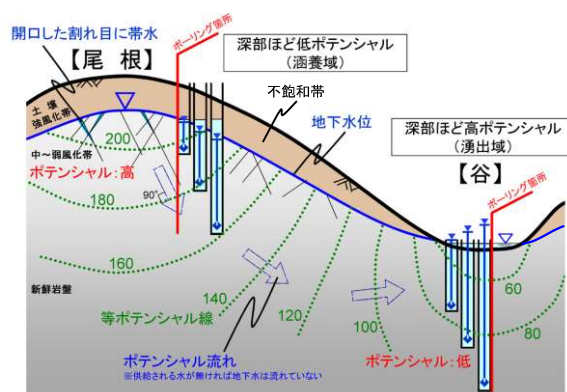


図1 山地における地下水のポテンシャル分布

Hubbert(1940)⁵⁾を参考に作成

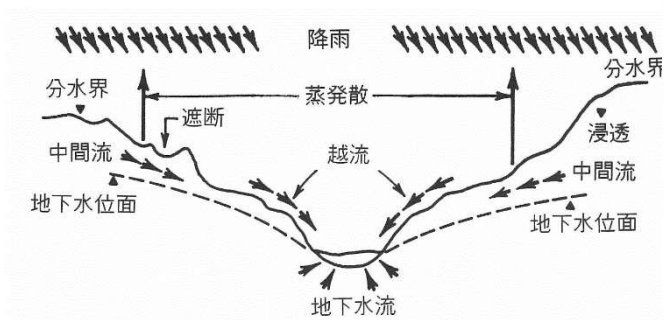


図2 基本的な水循環系の概念図⁷⁾

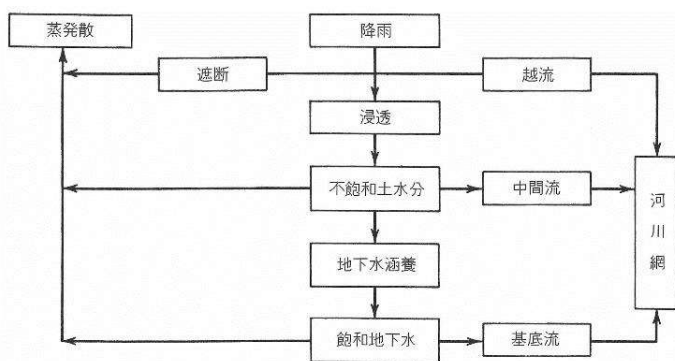


図3 水循環系の構成要素と水の移動経路⁷⁾

3. 高解像度 DEM を用いた地形解析と結果検証

3.1 源頭地形に着目した水系網図の作成

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ことが多い。

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し、その上端を推定源頭と過程した(図5参照)。

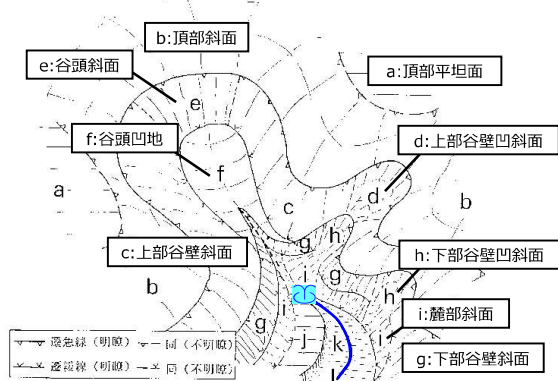


図4 源頭付近における微地形要素⁸⁾

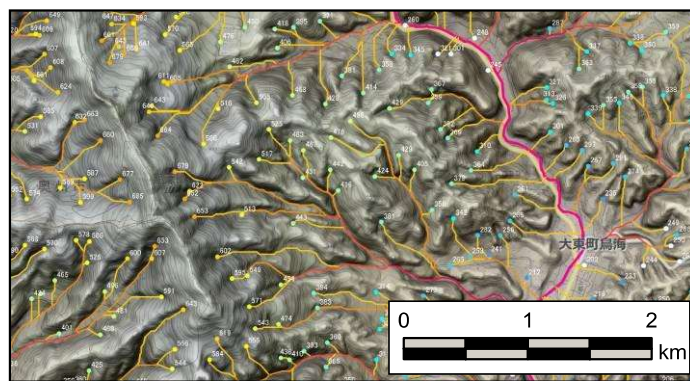


図5 作成した水系網図の一例²⁾

3.2 山間地における推定源頭の精度検証結果

ここでは、白亜紀に貫入した花崗岩体(東北地方南部北上山地の標高100~800m程度の丘陵・山地地域)において、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。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。

本検証結果では、両者の標高差が±30mの範囲に全体の71.4%がプロットされ、本解析手法にて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²⁾(図6参照)。

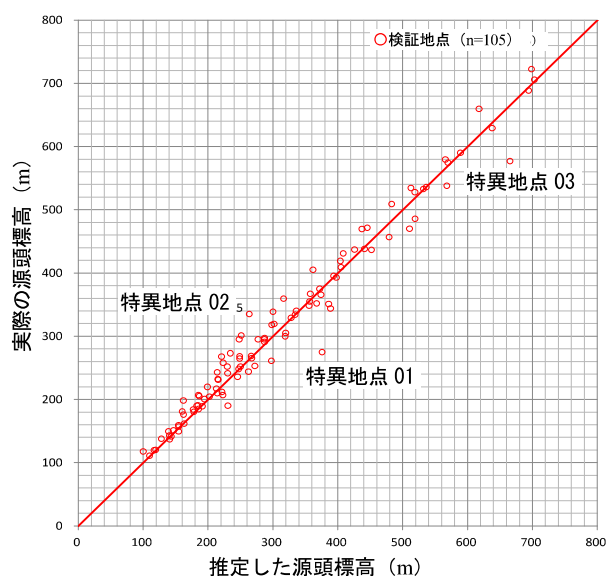


図6 現地踏査による源頭検証結果²⁾

3.3 水系網接谷面による地下水面分布の推計

自然地理学分野では、大局的な浸食量を定量的に評価する手法として、接峰面法が一般に用いられている。接峰面は、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たものである(図7参照)。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、地下水面の一部を三次元的に連ねた面に近似することで、大局的な地下水面の分布を推定するとの考え方に基づいて地形解析を行った。

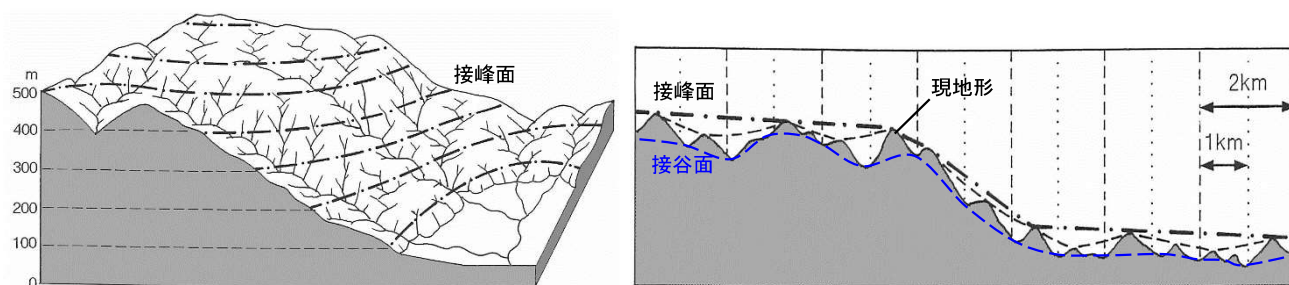


図7 現地形と接峰面・接谷面との関係を示す概念図⁹⁾

文献より引用の図に一部加筆

長谷川ほか(2020)では、基盤地図情報10mメッシュ標高データの水系網から接谷面図を作成し、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検証を行った。国内複数地域を対象とした検証結果から、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との結果を得ている³⁾。

4. 本手法を複数地域に適用するための課題と解決手法の検討

4.1 本手法を複数地域に適用するための課題

長谷川ほか(2020)³⁾で確立した手法は、水系網を用いた地形解析を前提としており、浸食が及ばない地域や大規模な河道改修が為された地域では、地下水面の推計精度が低下するという弱点を有している。例えば、関東平野の荒川と多摩川に位置する武蔵野台地の様に、江戸時代初期以降に玉川上水をはじめとした上水・農業水利を目的とした人口水路網が張り巡らされた地域では、本手法をそのまま適用することは困難であった。

4.2 課題解決に向けた工夫点

武蔵野台地およびその近傍では、段丘崖や台地を刻む谷頭から湧水が認められ、台地上に設けられた浅井戸を対象として、古くから地下水面等高線図が描かれている。特に細野(1978)、角田(1986、2012)らにより、武蔵野台地およびその近傍における不圧地下水の精緻な地下水面等高線図が描かれている^{10~12)}。

地下水位は気象、利水・揚水量や土地被覆の条件等によって絶えず変化するが、地下水面の分布は地形に支配されており、大局的な流動場(上下流方向)は年間を通じて逆転することはないと考えられる^{5~7)}。そこで長谷川ほか(2022)では、地形解析手法による推計精度が低い地域について、既知の地下水面等高線図のデータを参照することで、地下水面等高線図の高精度化ならびにシームレス化を図った⁴⁾。

5. 地域間の繋がりを意識した地下水流動場の可視化

水資源の適正管理と持続可能な利用をめざすには、多種多様なステークホルダーが対等な立場で参画し、協働して課題解決にあたる合意形成の枠組みが必要である。一方で、科学的なファクトを従前のとおり示すだけでは、理解不足や認識の違いが生じる可能性があり、そのことが要因で合意形成に至らない場合も多い。

そこで本研究では、地下水面等高線図から粒子追跡法により等ポテンシャル線に直交する流線網図を作成し、現地形、地下水面等高線、市町村境界および、既知の湧水地点を重ねた地下水流動場を可視化したマップとして示した⁴⁾(図8参照)。

図8に示す地下水流線網は、あくまで地下に浸透した水が地下水面に到達した後の流動経路を可視化したものであり、不飽和帯における鉛直浸透や、帯水層の構造に沿った地下水流動までは図化できていない。しかしながら、地下水の主たる流れを流線として表現することで、地下に浸み込んだ水の流動経路と湧水との関係性や、浅層の地下水がやがて河川水へと姿を変えて循環していく様子を、誰もが直観的に理解することができる。

地下水や表流水の流線網を描く手法としては、これまで水循環解析モデルによる浸透流解析が用いられてきた。しかしこの手法では、膨大な時間や費用を要すことに加え、限られた調査結果に基づく水文地質構造の解釈や、現況再現にむけた各種パラメータの設定など、必ずしも地域の実態を正確に再現・予測することはできず、解析結果から得られた地下水面等高線図や地下水・表流水の流線網図には不確実性を含んでいる。

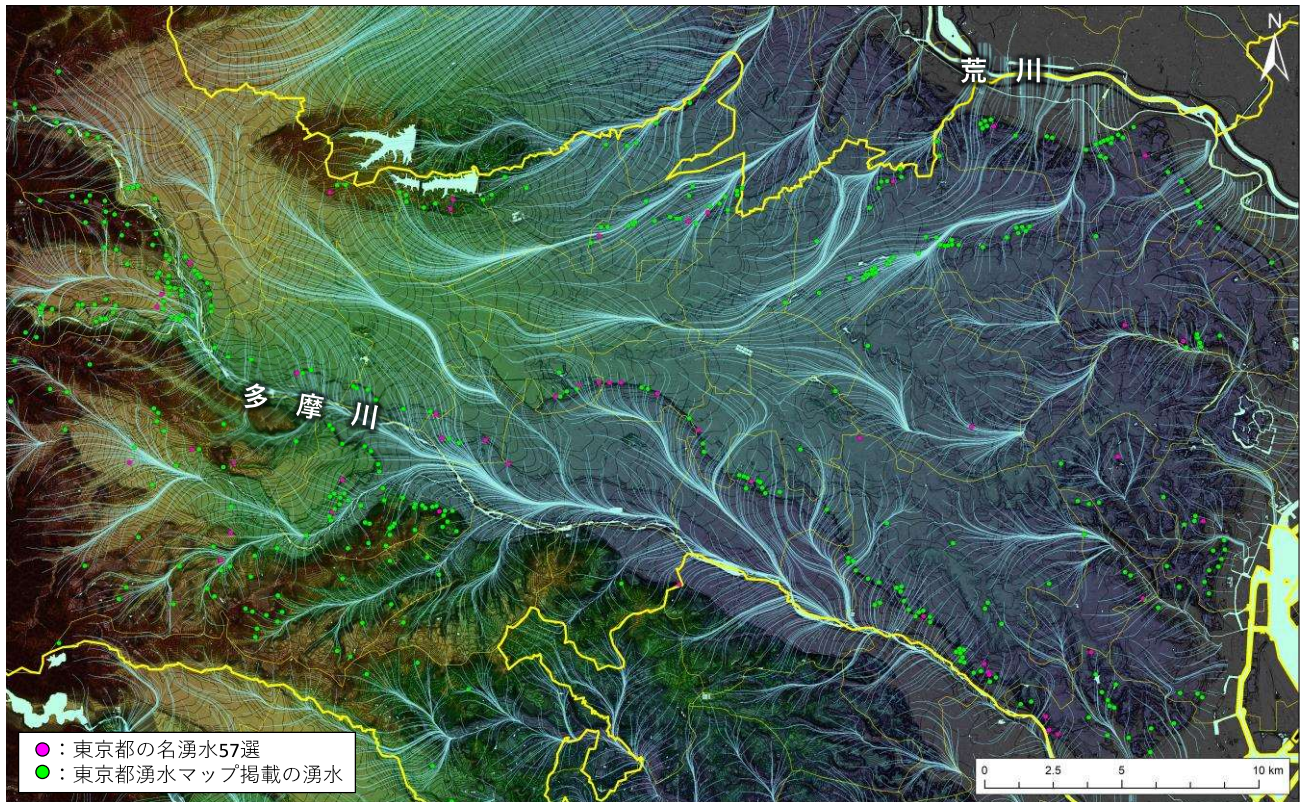


図8 武蔵野台地を中心とした浅層地下水の流線網図⁴⁾

一方、地下水位の観測結果や、地域の現地形に基づいて地下水の流動場を可視化する本手法では、水文地質モデル等の構築過程を経ずに地下水面等高線図や流線網が得られるため、経済的な負担軽減にも寄与できる。

6. まとめと今後の展望

本研究で報告する一連の地下水可視化手法は、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や、現地調査前の概略検討時においても適用可能であり、地下水流動場の理解や、多様なステークホルダー間における合意形成の場への活用も期待される。

参考文献

- 1) 長谷川怜思・山本 晃・原 昌成・西山浩平(2015): 高解像度DEM を活用した周辺水環境への施工影響解析, 日本応用地質学会 平成27年度研究発表会講演論文集, pp.175-176.
- 2) 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, 日本応用地質学会 平成 29 年度研究発表会講演論文集, pp.269-270.
- 3) 長谷川怜思・山本 晃・吉田広人・菊池英明・富樫 聡・内田洋平(2020): 地形情報を用いた地下水面推計の試み, 日本地下水学会 2020 年秋季講演会講演予稿集, pp.36-41.
- 4) 長谷川怜思・緒方 陸・佐藤 怜・井川尚之・吉田広人・鈴木広美・佐々木理弦, 杉江美織(2022): 適正管理と持続可能な利用にむけた地下水流動場の可視化技術, 日本応用地質学会 令和4年度研究発表会講演論文集, pp.69-70.
- 5) Hubbert, M. K. (1940): The theory of ground water motion. Journal of Geology, 48, 78-944.
- 6) Toth, J. (1962): A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. Journal of Geophysical Research, 67, 4375-4387.
- 7) 大西有三 訳(1995): 地下水の科学 I, 土木工学社.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 細野義純(1978): 武蔵野台地の地下水, 「日本の水収支」, pp.174-188. 古今書院.
- 11) 角田清美(1986): 秋留台地の地形と不圧地下水, 駒澤地理, (22), pp.202-227.
- 12) 角田清美(2012): 日野台地の地形と自由地下水, 駒澤地理, (48), pp.47-62.