

地質調査

2025

第1号

(通巻165号)

Japan Geotechnical Consultants Association

編集／一般社団法人全国地質調査業協会連合会

巻頭言

≫ 地下水を識る喜びと憂い

岡山大学名誉教授 西垣 誠

総論

≫ 地下水の奥深さ — 科学から文化まで —

日本大学文理学部地球科学科 教授 竹内 真司

小特集 地下水の奥深さ — 科学から文化まで —

≫ 「水のサステナビリティの実現」に向けた
サントリーグループの取り組み

..... 川崎 雅俊

≫ 秦野名水を守り育てる
地下水マネジメント

谷 芳生

≫ 地下水にまつわる伝承や信仰

..... 河野 忠

≫ トレーサーにより
地下水の履歴を読み解く

..... 辻村 真貴

≫ 地下水の資源特性とガバナンスの動向

..... 遠藤 崇浩

教養読本

≫ 地下水の本、いろいろ

..... 五藤 幸晴

やさしい知識

≫ おいしい水の要件

..... 藪崎 志穂

基礎技術講座

≫ 続・水文調査に関する基礎技術

..... 富森 さとし

Hybrid表面波探査に先進のGeoSEIS **geo5**

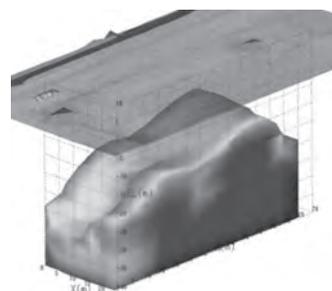
GeoSEIS-24、-48は、浅層反射法探査、屈折法探査、表面波探査の他、**テークアウトケーブルを用いて最大48成分の三次元微動アレイ探査にも適用可能な先進のサイスマグラフィックです。**



GeoSEIS-24



GeoSEIS-48



3次元微動アレイ解析例

- ☑ 微動アレイ探査時の連続収録時間は60分(2msecサンプリング時)
- ☑ 微動アレイ探査時、全成分の波形(波動)をリアルタイムにLCD上で確認可能
- ☑ SDカードに収録されたデータはPC上で任意の時間長に分割後、SEG-2に変換
- ☑ 既にご使用のGeoSEISにファームウェアの追加で微動アレイ探査機能を付加可能
- ☑ リアルタイム感覚の高速応答性を実現した快適なノイズモニター
- ☑ 直射日光下でも鮮明な超高輝度カラーLCDを採用
- ☑ 24bit、50KHz(20μsec)の高速・高分解能AD変換機能を搭載
- ☑ GeoSEISには、他に4成分型GeoSEIS-4、PS検層専用のGeoSEIS-PS、96成分型のGeoSEIS-96を用意

株式会社 ジオファイブ

URL <http://www.geo5.co.jp/>

〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-453-2

TEL 048-662-9175 FAX 048-662-9176

Email sales@geo5.co.jp

■業務内容■

計測機器販売 : 地質調査機器・非破壊検査機器

計測機器レンタル : 地質調査機器・非破壊検査機器

計測業務 : 3D-RADAR計測業務 他

計測機器設計製作 : 各種計測機器の設計製作

巻頭言	地下水を識る喜びと憂い 岡山大学名誉教授 西垣 誠 …… 1
総論	地下水の奥深さ -科学から文化まで- 日本大学文理学部地球科学科 教授 竹内 真司 …… 13
小特集	■ 地下水の奥深さ -科学から文化まで- 「水のサステナビリティの実現」に向けた サントリーグループの取り組み 川崎 雅俊 …… 18 秦野名水を守り育てる地下水マネジメント 谷 芳生 …… 22 地下水にまつわる伝承や信仰 河野 忠 …… 26 トレーサーにより地下水の履歴を読み解く 辻村 真貴 …… 32 地下水の資源特性とガバナンスの動向 遠藤 崇浩 …… 36 地下水の本、いろいろ 五藤 幸晴 …… 41 おいしい水の要件 藪崎 志穂 …… 47 続・水文調査に関する基礎技術 富森 さとし …… 49 高品質ボーリングとボアホールカメラ観測を用いた 岩屑なだれ堆積物に対する地質構造調査事例 大山 朝之 …… 57 宮水 ～灘酒をささえる天与の霊水～ 末廣 匡基 …… 61 東北大学 東北大学総合学術博物館 高嶋 礼詩 …… 63 北松型地すべりにおける地形と地質 (長崎県) 永井 宏樹 …… 65
養教読本	地層処分事業と地質調査の展望 (後編) 西崎 耀, 廣田 翔伍, 吉村 公孝 …… 67
やさしい知識	地質調査の機械等損料 相澤 隆生 …… 73
基礎技術講座	
私の経験した現場	
大地の恵み	
各地の博物館巡り	
各地に残すべき地形・地質	
研究所からの報告	
寄稿	
地質だより	■ 令和6年度「応用地形判読士資格検定試験」, 「地質リスク・エンジニア認定試験」の合格者の決定 …… 76 ■ 全地連「技術フォーラム2025」の開催について …… 76 ■ 国土交通省「設計業務等標準積算基準書」の改定について …… 77 ■ 全地連資格制度 令和7年度の検定試験および登録更新の 実施概要について …… 77 ■ 講習会の開催情報 (令和7年度) …… 78 ■ 全地連「新マーケット創出・提案型事業」参加企業募集のご案内 (VIBRES® コンソーシアム二次募集) …… 79

既刊情報

下記の「地質と調査」は、次の URL または QR コードから、どなたでもご覧いただけます。

全地連の機関誌「地質と調査」

https://www.zenchiren.or.jp/jgca_geo-se/



● 掲載概要

2000 年第 1 号 (通巻 83 号) ～ 2005 年第 4 号 (通巻 106 号) → メインテーマのみ

2006 年第 1 号 (通巻 107 号) ～ 2013 年第 1 号 (通巻 135 号) → 【会告】を除くすべてのページ

2013 年第 2 号 (通巻 136 号) 以降 → すべてのページ

※ Web 掲載版の「地質と調査」はカラーで閲覧いただけます。

● 最近の発刊

通巻	発行年月	メインテーマ
155 号	2020 年 4 月	小特集：AI で地質調査はどう変わるのか
156 号	11 月	小特集：防災・減災 - 豪雨災害の被害軽減に向けて -
157 号	2021 年 4 月	小特集：地図データの活用
158 号	11 月	小特集：物理探査が拓げる地質調査
159 号	2022 年 4 月	小特集：堆積物の科学
160 号	11 月	小特集：DX
161 号	2023 年 4 月	全地連創立 60 周年記念号
162 号	11 月	小特集：地質の愉しみ方 - 食と旅と地質 -
163 号	2024 年 4 月	小特集：アウトリーチ - 地学の魅力を広げる新たな展開 -
164 号	11 月	小特集：鉱物と宝石 - 身近な地質とのかかわり -
165 号	2025 年 4 月	小特集：地下水の奥深さ - 科学から文化まで -

次号予告

地質調査 2025 年 第 2 号 (通巻 166 号) 内容 (予定) 令和 7 年 11 月発行予定

小特集テーマ：生成系AIとの付き合い方

* 編集方針により小特集テーマは変更となる場合があります。

地下水を識る喜びと憂い

にしがき まこと
西垣 誠*

Key Word

液状化, 斜面安定, 地下水計測, 汚染, 地盤陥没, 土砂災害対策

1. はじめに

地質と調査の小特集「地下水分野の奥深さ - 科学から文化まで -」に、各分野のエキスパートの方々に執筆していただくことになった。その巻頭言を科学的なことしか考えていない人間が担当することになった。たいへんな仕事になった。今、考えられる範囲で、地下水に関する現状について、論述させていただく。普通、巻頭言は1ページくらいであるが、編集担当者の「書ける所はどんどん書いてください」との言葉に甘えて、思うがままに記述させていただいた。

地下水を論じるには、降雨、表流水、蒸発散を明確にする必要がある。この地下水と表流水を対象としている水文学に関しての成書として、Brutsaert, W. による「Hydrology: An Introduction」が2005年にケンブリッジ大学出版会から出版され、その後の新たな知見を加えた第2版が2023年に出版されている¹⁾。地表面の水、地表面下の水に分離して節を設けているが、両者連結についても詳細に論述されている。この成書の和訳本が、2024年に杉田倫明による「水文学 [原著第2版]」²⁾として出版されているので、地下水の本質を学びたい人は、是非精読してほしい。

このように「地下水について学ぶ本」については、今回の小特集では五藤幸晴氏が論じていただくので、ここでは深堀しないが、地盤工学会から2008年に出版された「地下水を知る」の「第7章 展望」に、これからの地下水に関する課題について列挙させていただいた³⁾。

また、地下水を守ることと、地下水を育てる書として、2013年に「育水のすすめ」を出版させて

いただいた⁴⁾。いかに地下水を育てるかは、山間部の水田面積が年々狭くなっている状況では、日本に追って大きな問題だと危惧している。また、地下水の中に表流水や揚水してきた水を涵養して、地下水を育てる確実な技術が確立されていない。

地下水が地中を流動すると、地中の細粒土も移動する。この現象を定量的に評価しようとする研究が、最近なされるようになってきた。これは、本当に嬉しいことである。さらに、地下水を公水にできる水循環基本法が2015年に施工された。一日でも早く、この狭い日本の地下水全体を管理してもらえることを祈っている。

それでは、地下水にどんな利点や価値があるのかと問われると、それは「地下水を知る」の書の中にあるので、各人勉強をしてほしい。最近、日本人の長寿の秘訣は、日本人が軟水を飲んでいるからかもしれないと教えていただいた。しかし、硬水のペットボトルの水を好んで飲んでいる人も多い。このように硬水を常飲していると動脈硬化になりやすいという人もいるが、それが正しいかどうかはよくわからない。

日本人の人口は減少しているので、これからは、それほど飲料水は必要ないかもしれない。しかし、世界中の人口はどんどん増加しているので、「長寿の国の水」を世界に発信しても良いかもしれない。

地下水に関する項目を整理すると、表-1、図-1のようになる。ここではこれらについて論述させていただく。

*岡山大学名誉教授

表-1 地下水に関する項目

(a)	水文学・水循環
(b)	地下水の定量的な取り扱い
(c)	地下水と地盤安定
(d)	地下水環境保全
(e)	地下空間貯留
(f)	地中処分
(g)	その他

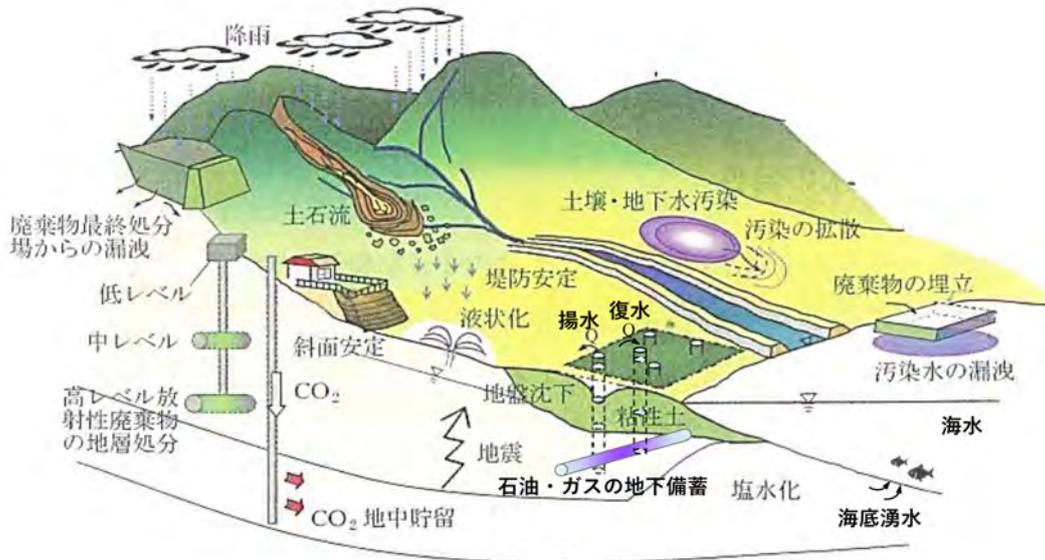


図-1 地下水に関する物理的事項^{文献4)}に加筆

2. 水文学・水循環

地下水の源は、降雨、河川水と海水である。この源である降雨パターンが、最近、異常気象によって変わっていることにより、地下水への降雨涵養流量が減少しているのではないかと心配している。異常気象の線状降水帯による豪雨がいくらあっても、地下水に降水が浸透することができるとは考えにくいので、これからは、豪雨の水をいかに処理して、必要な水量を貯留するかが、これからの大きな課題になると考える。世界の人口が増えている中で、飲料水源として期待される地下水流量が減少してくるのは、きわめて重要な問題である。

3. 地下水の定量的な取り扱い

3.1 復水の処理

建設工事では、地下水をどのように定量的に取り扱うかが、工事の安全に大きく関わってくる。

施工することは今日、地盤内を掘削して、地下水を低下させるか、止水して地下に建物を設置する工事のトラブルはなく、それほど困難にはなっていない。ただ、地下水を低下させるために揚水した水の処理として、同じ帯水層に復水する際の復水井戸周囲の目詰まり対策については、まだ確実な手法は確立させていないのが現状である。

この復水の課題は2つある。1番目は、揚水してきた地下水の中にある細粒土を安価に、かつ速やかに除去する技術が確立されていないことと、揚水した帯水層に復水する際にどの程度の水位を維持して復水すれば良いかを決定するだけの対応が取れていないようである。

2番目の課題は、帯水層に復水すると、当然、帯水層内の細粒土が移動して、帯水層内で目詰まりが生じて復水効率が悪くなっていく。この現象を避ける技術もまた、確立されていない。

地下構造物建設による地下水の流動阻害対策に関しては、千葉外環道の地下工事での対策のように、現在ではほとんど解決していると考えている。

しかし、流動障害を防ぐために設置した人工的な流動保全システムの日詰まり等の劣化防止対策としての施設の洗浄技術については、まだ一般的には解決されていない。近年、このような施設の日詰まりを洗浄する対策として、マイクロナノバブルによる洗浄システムによる技術開発の報告がなされている⁵⁾。

3.2 地下水の数値解析

四半世紀前の「地質と調査」の特集で、地盤解析技術と地盤のモデル化の中で、各種の浸透流の問題の解析を、はじめに一覧表で整理させていただいた⁶⁾。その表はここでは示さないが、地下水を定量的に取り扱う業務の方は勉強をしてほしい。

地下水の挙動を定量的に解析する手法は、コンピュータの進歩によって3次元モデルの作成が容易になり、解析時間も短くなり、解析結果も3次元で表現できるようになって、きわめて便利になっている。

ただ、その結果が妥当であるかの判断は、現状のモデルでの解析結果と原位置での観測結果との比較が必要である。しかし、広域での長期の地下水位観測結果があまりないので、解析結果の妥当性が評価できないことがある。また、地質モデルが作成されても、数値解析に必要な浸透に関する物性値の原位置での調査方法もそれほど進歩していないのが現状である。これは非常に大切なことである。さらに解析に用いる観測井内の水位が、地盤内のどこの水位を計測しているのかがよくわからない。その水位が、液状化を予測するための地下水位か、トンネル掘削工事の地下水位計測かは、それぞれの目的が異なるので、何のためのモニタリングかを明確にして、観測井を設置してほしい。

特に、複数の帯水層を貫入した場合には、新しい技術であるフローメーター試験で、観測井内の各帯水層の透水係数、初期地下水位（水圧）、地下水の電気伝導度、温度を得ることが可能になっている。この結果、各帯水層の初期地下水位の値が異なっている場合は、各帯水層間の地下水の観測孔内の移動をプラスして、各帯水層の水位（水圧）を観測すべきである。

4. 地下水と地盤安定

4.1 地下水中の平野部での建設工事

帯水層内の地下水位（水圧）を低下することに

よる地盤沈下の予測は、現在ではきわめて簡単に数値解析することが可能となっている。地下水位を低下させないで掘削地の周囲を止水して、地下水を動かさないで工事を進めている。特にトンネル工事のシールド工法は、現在では、いろいろな所で地盤陥没等のトラブルが生じている。今後は、これに関しての技術を開発してほしい。

4.2 地下水と斜面安定

地下建設工事で地下水があるかないかが一番厄介な課題である。一般に、地下に地下水があるかないかは、地上の植生からある程度判断ができる。たとえば、地表に松の木がある所は、地下を掘削していてもあまり湧水がない。一方、杉林等の下には、十分な地下水がある可能性がある。また、斜面に竹林等がある所には、十分な土中水があると判断されるとも言われている。また、地図を開いて竹林等の好水性植物間を結ぶ線上に破碎帯があるとして地盤内を推定する方法も提案されている⁷⁾。

現状では、LP（レーザープロファイラ）によって山の植生を無視して直接地山の地形がわかり、斜面の危険度も予測できる時代になった⁸⁾。そのようなデータから、降水量、下流の沢水の流量等のデータを収集すると、降水量の何%が地下に浸透しているかがある程度予測できる。日本では、平均すると降水量の約35%の水が蒸発散していると考えられている。したがって、対象としている地域の地山の地表面層の浸透特性にもよるが、降水量の30%程度の水が地下に浸透していると一般的には推定されている。しかし、この浸透は地盤内の透水性にも依存するので、真値はわからない。

対象としている流域の地下の様子を知るには、ボーリング調査をするしか手法が無かったが、近年、物理探査技術の発達により、地下の地層の状況を常時微動アレー探査や、光ファイバセンサーを地中に埋設した結果から、数十cmピッチでの地下の地層の予測が可能になってきている⁹⁾。

この表面波探査法の延長の光ファイバーによる地盤内の探査技術であるDAS（Distributed Acoustic Sensing、分布型音響センシング）により、医学で用いられているCT検査や超音波検査、そしてMRI検査と同じように、地盤内の可視化が可能になりつつある。この地盤内の新しい物理探査技術の妥当性を確認するために、平野部ではボーリング探査が実施される時代への変化しようとしている⁹⁾。

一方、斜面内の新しい探査技術の妥当性の探査

のため、新しい技術として、軽重量コーン貫入試験装置（LWCPT, Light Weight Cone Penetration Test）を高速道路協会の補助金を得て開発した¹⁰⁾。ボーリング調査を斜面で実施することは極めて高価である。したがって、CPTを実施した。その結果、常時微動アレー探査やDASはきわめて有力であることがわかった¹¹⁾。また、このLWCPTによって、斜面内でも簡単に地下水の観測孔を形成できることがわかったので、多くの斜面内の水位データを得る方法が開発されてきている。

平地と比較して斜面内の深さ毎の水位は、涵養側は地質が均質であっても地下水位は深くなる。一方、地下水が流出している法尻では、同じ場所でも観測井が深くなるほど地下水位が高くなることが多いことが知られているが、花崗岩の場合は、亀裂性の弱風化層の方が、風化層であるマサ土層の地下水位より地下水位が高いことに、よく遭遇する。この場合も、このことを知って各深度での地下水を計測してほしいが、一般には、そこまで考慮されずに観測井内の水位として、斜面安定が検討されている。本当にこれで良いのかと心配している。

豪雨によって斜面崩壊の対策として、シラス斜面内に極超微粒子のセメントミルクを注入する対策も提案されている¹²⁾。このように斜面内全体を固化する対策では、必ず斜面の植生と斜面内の排水を考えて実施する必要があるので、一層、斜面内の可視化技術が進歩してほしい。

4.3 地震による地下水位の高い斜面の崩壊

地震による土砂斜面崩壊が生じて、人命を失っている。今日ではLPにより森林の地山の状況が推定できるようになっている。その地山の状況を地質に関する専門家が検討すると、ある程度の危険性は推定できる。しかし、地山内の状況を推定する物理探査技術であるワイヤレスの加速度計による斜面内の探査や、地中に光ファイバセンサーをDASとして埋設するだけで、斜面内の危険度が3次元予測できる手法についても研究されようとしている。このように斜面内部の様子が推定できるようになると、その中の地下水の状況も推定しやすくなる。

地下水が高い所を探査するには、斜面にボーリングマシンを運び上げて、ボーリング調査を実施した後、観測井を設置する必要がある。しかし、この手法では斜面内の何カ所に観測井を設置する必要がある。これはきわめて高価な調査になってしまう。これに対して、斜面内の絶対重力を計測

すると、地表からの物理探査によって斜面内の地下水の変動を調査する研究を応用することも考えられる¹³⁾。

地震による斜面崩壊は地震がどの方向に作用したかによっても変わるので、斜面内の状況がわかれば、いろいろな方向からの地震を考えて事前に検討しておく、大地震がくる以前に斜面の安全度が評価できる。

地震による斜面崩壊の調査報告は多いが、ではその後、それに対してどのような対策をするべきかについての研究はあまり多くない。地震によって崩壊した斜面を修復する時に、斜面内の地下水位を低下させることによって、2024年1月の能登地震での崩壊報告の中に、斜面の法尻にフトンカゴ（ジャカゴ）を設置して、地震に対する対策として効果があったとの嬉しい報告があった。この水平ドレーンとフトンカゴ対策が目詰まりをして排水機能が低下して、斜面内の地下水位が上昇することに対してのモニタリングをして、排水施設の洗浄までの一連の検討をして、そのルールを確立することを願っている。

4.4 地震による地下水の高い所での液状化対策

(a) 止水工と地下水位低下のための揚水対策

止水工と地下水の揚水対策についても、液状化対策では対策対象領域の外周に矢板を打設して地下水を液状化しないレベルまで低下させる対策を実施されているきわめて有効な対策である。しかし、止水している矢板の寿命は、矢板の厚さにも依存するが、100年先までの耐久性はないのではないかと考えられる。また、打設した矢板のどこが劣化しているかのモニタリング技術もまだない。せめて、矢板の表裏の地下水位差をモニタリングするためにDAS等の光ファイバセンサーを設置して、矢板の劣化度をモニタリングするしかないと考えられる。

矢板の止水より地山材料とセメントミルクを混合して止水壁を形成するTRD工法（Trench Cutting Re-mixing Deep wall Method）の止水材料に、2000年以上の耐久性のあるジオポリマー材による壁を設置しておく、一世代だけではない長期の液状化対策が可能になると考えられる。今後はこのような長期的な時間を考えた費用対効果を検討してほしい。

(b) 地盤改良

液状化する可能性のある砂地盤に、極超微粒子（2～4 μm）セメントミルクを注入する液状化対

策は、鉄鋼スラグを粉砕して、東京の江戸川砂（粒径 20 μm ）等に注入して液状化対策にも開発、提案されている¹⁴。この技術は、家屋の下全体の地盤を固化できる技術であるが、極超微粒子セメントの製造においてスラグを極限まで粉砕する際に大量のエネルギーが必要なためか、研究に対しては国際的に高い評価を受けているが、まだ一般的には適用されていない。しかし、液状化が発生して国民の生命や財産が奪われることと比較するならば、すぐにでも実施すべき対策と考えられる。さらに、この極超微粒子セメントミルク注入工法は、液状化が生じる地盤に対しての地下水位を低下させる領域の止水壁としても適用できる。

液状化対策と砂層の水位を低下させても、近くに粘土地盤があれば、地盤低下することがある。地盤内の地質構造が詳細にわかっていないので、このようなことが生じやすい状況であるが、観測井内の水位が降雨によってどのように反応するかのデータから、粘性土層の存在が判断できるので、長期の地下水のデータは貴重なデータと考えて評価してほしい。

4.5 豪雨災害と地震対策

異常気象によって、豪雨が増えている。しかし、年間降水量はあまり変わっていないことがある。このような降雨パターンでは、豪雨時の表流水のうち、一部が地下に浸透するだけで、多くは表流水として流下してしまう。したがって、降雨による地下水への涵養流量は減少してくると考えられる。したがって、その対策として豪雨の降水を一時的に流域全体で貯水するシステムが必要になってくる。その対策として、雨水浸透マス¹⁵の設置がある。千葉県では雨水浸透マス施設がよく普及していると聞く。これは、非常に良いことである。日本中の他の地区でももっと対応をしてもらいたいと思う。

また、豪雨による洪水対策として各家庭での対応としては、各空地の地下にコンクリートの豪雨水の一時貯水を実施していただき、この貯水した水を雑用水として利用してくれると、下水道への流出水量が減少してくるのではないかと考えられる。低地に家を建設するのであれば、豪雨時は建物の地下に洪水シェルターを設置しておくのも、ひとつの対策である。

地震対策として、USGS（アメリカ地質調査所）では、西海岸のサンアンドレアス断層に水を注入して、人工的に地震を起こしている。岩盤内にたまっているエネルギーを人為的に放出して、大地

震が発生しないようにする研究をしている。これからは、高齢者が増え、避難できない人がどんどん増えてくるので、プレート型地震に対しても、根本的な研究をしてほしい。

地盤と地下水と地震災害が問題であって、地震が来て、斜面に亀裂ができた所の対策をしていないうちに豪雨が来ると、当然、斜面崩壊が生じやすくなる。この時は、斜面内の地下水をいかに発生されないかのために、どれだけ水平排水施設を斜面内に配置して、斜面内の「地下水」を低下させておくかが、いちばん大切である。

透水性の悪い土質の斜面から地下水を排水することはきわめて困難であるので、「重力」だけに頼らないで、粘性土層からの間隙水を電子レンジの原理でマイクロウェーブを利用して斜面内の間隙水を処分するように「電気」の力で排水することも可能ではないかと考えている。

4.6 地下水流動が原因による盛土の経年劣化現象

人工的な盛土は、降雨や盛土内の地下水の移動によって盛土を形成している骨格の間隙を地下水が流動することによって、盛土内の細粒土が移動する現象が生じる。この現象は盛土内の地下水位低下の飽和状態の所で生じる現象である。飽和状態であると、地下水が浸透することによって、盛土内の土粒子に浸透水圧が作用して、盛土内を比較的自由に動ける細粒土が下流へと移動する。

このように多孔質体中を地下水が移動することによる多孔質体内の細粒土が移動する現象は、古くより土中の内部浸食（internal erosion）として研究されてきた¹⁵。これは非常に重要な研究であると考えている。

細粒子が下流に移動すると、上流部での透水係数が大きくなり、下流部の透水係数が小さくなるため、盛土内での動水勾配が大きくなって、下流部にいっそう大きな浸透水圧が作用する。

盛土の下流部に排水のためと設置したフィルター材は、盛土の骨格を構成する粒子をフィルター内に流出させない粒径の基準に基づいて設置している¹⁶。したがって、盛土の骨格を構成している土粒子はフィルター材内には流出してこない。しかし、細粒土の土粒子はフィルター内に侵入してくる。この細粒土がフィルター内に堆積してくると、フィルター材は目詰まりをして、盛土内の地下水位が上昇して、盛土の安定度が減少してくる。また、地震時での盛土崩壊が生じやすくなる。

残念であるが、盛土のフィルター材に流入してきた細粒土の現状のモニタリングや、経時的に洗

浄する対策が、まだ基準にはなっていない。これは、地下水と土構造物の関係であり、今後の大きな課題と考えられる。

4.7 豪雨による斜面崩壊に対する崩壊予測解析に 対しての必要事項

豪雨による斜面安定について、2024年7月の地盤工学会での研究発表会で、いろいろな研究が発表されている。このような中、室内実験によって斜面安定を再現している研究がある。

一般に、崩壊現象を数値解析で再現して、その解析手法の妥当性を検証することは、解析手法を研究している研究者の必修事項である。しかし、その検証がなされていない研究発表もある。室内での実験は、鉛直2次元実験でなされていることが多い。そこで実験された結果を数値解析で再現するには、数値解析に必要な以下のデータが必要である。

(a) 実験に用いた材料の異方性飽和透水係数

室内実験モデルを構築するには、一定の密度に締め固める必要がある。その際にモデルの材料の巻出し厚をいくらにするかは、大きな課題である。この厚さは、浸透のモデルと締め固める装置の規模にもよるが、当然であるがモデルに用いる土によってもこの厚さは異なる。

室内実験では、水平にモデルを締め固めるため巻出し厚を50cmにして、その材料をモデルの密度まで締め固めることが一般的である。仮に各層の最終の厚さが30cmと決めて締め固めた結果、30cmの層内の密度の分布がどのようになるかについても、一元モデルの供試体を試作して検証しておく必要がある。

この一次元の供試体は、目標の層厚の2倍以上の供試体にして、2層の結合面に対して、すでに締め固めた面の何cmまでの深さまで締め固め影響を回避するためにレーキング(Raking)すれば良いかを、供試体の密度分布を求めて検討する必要がある。

一般に、一層内の密度は、層の上下の密度が大きくなり、中間部の密度が小さくなっていく。同じ土材料でも、密度が大きいところほど透水性が低くなる特性があるため、室内で締め固めて作成した斜面のモデルは、鉛直と水平方向では異方性の値となることを考えておく必要がある。

それぞれの透水試験は定常の透水試験で十分である。ただ、降雨浸透実験ではモデル内にトラップされる空気量が多いため、絶対飽和($S_r=100\%$)の透水係数の値より小さな透水係数で浸透が進行

していく。供試体の土のpF曲線(水分特性曲線)によって、浸潤中の飽和度は異なっていく。

土の中には空気があり、真空中での浸透より複雑な挙動をすることを理解して、数値解析の結果と浸透モデル実験の結果を比較してほしい。

(b) 不飽和状態での土の浸透特性

不飽和土の浸透特性には、不飽和土の体積含水率(θ)によって変化する透水係数(k/θ)の関係を室内試験で求める必要がある。

不均質な斜面の力学特性を原位置で予測する技術は、まだ確立されていないが、今日では、豪雨によって崩壊する可能性のある場所に対しての物理探査によって、探査された弱部を対象にCPTを実施する時に、たとえば、CPTの先端が転石にあたった場合でも、これは転石に遭遇したと判断して、CPT試験することにあまり躊躇しないで実施することができる良さがある。

4.8 不均質な地盤内の地下水の水ミチ流動探査法

地盤内は平面的にも深度方向にも複雑で、ボーリング調査から点の地層データを得ても、その中の高透水層がどこまで広がっているかについての予測には、複数のボーリングデータが必要となる。また、そのように平面的な帯水層の中のどこを主に地下水が浸透してきているかについては、まだよくわからない。これに対して地中の「水ミチ」を探査する技術が開発されている。

この地盤内の平面的な水ミチ探査法として「多点温度検層」が提案されている¹⁷⁾。この調査法は、きわめて簡単な地盤の地中温の変化を長期計測するだけで、地下水の流動があるかどうかを判断できるシステムである。この水ミチが判明すると、地下水の流動保全において、どこを最も大切にすることがわかるので、きわめて重要な探査であると考えている。実際にこの技術を適用して京都の西山裾での高速道路の工事で、西行法師が好んだ勝持寺の地下水流動を保全させていただいた。いずれもっと迅速な計測でもっと深部の「水みち」をDASによる計測方法も開発されると期待している。

4.9 地盤陥没と地下水

地下で地下水によって何が起きているのかが良くわからない。地下水位が上昇して、盛土内が飽和になり、盛土内の細粒土が下水管等の損傷穴に土砂が移動して、それを繰り返していくと地盤陥没が生じると考えられる。

このようなことが起こらないようする対策とし

て、以下の項目が考えられる。

- (1) 地盤の支持率が低い所は、下水道管の基礎をガス溶融スラグと水ガラスによりジオポリマー材で地盤改良をする。
- (2) 下水道管を亜硫酸ガスなどで劣化しないように、下水道管内の換気をする。
- (3) 下水道管の盛土の締固めを十分に作る。
- (4) 下水道管の上部の盛土内に陥没が生じていないかどうかをリアルタイムでモニタリングするために、下水道管を敷設すると同時に光ファイバセンサーによって、その周囲の地盤内の状況をリアルタイムで計測する。

最近、DASシステム網を国土全体に設置すると、国土の地盤内の変動や密度等の変化がリアルタイムでモニタリングすることが可能になることがわかる。計測したデータをコンピュータの中に蓄積していくことによって、従来のような地層のリスクを考えなくても、将来の変状が推定できるようになる。地盤内の状況を、現状でも0.2mピッチで可視化できるだけでも嬉しいことである。この技術を国土全体に拡張するかどうかは、国民がそれを求めるかどうかになっている。

現状の医学では、ミリ単位のがん細胞を取り除くことができるようになってきている技術と比べると、まだまだあると考える人もいるかもしれないが、とにかく現在の日本では老人の人口がどんどん増え、異常気象によって土砂災害の規模がどんどん大きくなっているため、事前対策を検討するための荷重のデータをどうするかが定まらない状況である。

これに対処するためには、災害が起こる前に災害の対策をしたところか、豪雨時にどのような挙動をしているかをモニタリングして、そのデータから対策が十分であったかどうかを判断するデータの集録が必要と考えられる。

ここでは、災害対策も当然であるが、時々刻々と劣化していくので、その状況をモニタリングして、次なる対策ができるような社会になっていきたいものである。

5. 地下水の環境保全

世界中で目に見えない地盤内に汚染物質を投棄したり、漏洩させて、貴重な土壌地下水汚染が発生した。地下水がどのような状況で浸透しているかを判定させることがきわめて困難であるため、地盤内の汚染状況はすべてボーリングを実施して、

汚染土、汚染水を処理して多くの場所での地盤浄化が実施された。

しかし、まだ日本中のいたる所で、浄化が進んでいない所を、鋼矢板で止水しているだけの現場もある。鋼矢板は年々腐食していくので、いずれどこかで汚染物質が漏洩してくる可能性はある。したがってこのような腐食の進行をこれからはモニタリングして、漏洩する前に追加の対策をしてほしいと祈っている。

汚染地下水を浄化する新しい技術として、地中バクテリアの力を借りて浄化する技術がバイオレメディエーションとしてあるが、その技術を一層発展されて、バクテリアの能力を一層活性させるために地下水温を20℃近くにして浄化する技術も開発されている¹⁸⁾。この浄化技術は、建物の地下で実施され、地上は普通に生活している状況で浄化できる技術である。

建設工事中に湧水した水が汚染している場合には、鉱山跡地からの湧水と同様に、その湧水を未来永劫に浄化対策する必要があるため、建設対象現場に対しては、その地下水の水質に関する調査は極めて重要であると考えてほしい。ただ、ヒ素を含んだ地下水等の安価な処理方法についての実務への適用例も示されている¹⁹⁾。

地下水に関係する土壌地下水汚染については、あまり社会的には騒がれていないが、浄化の状況がどの程度保てるかについては、常にモニタリングを継続するべきだと考えている。2024年6月上旬に米国コロラド州のデンバーで、有機フッ素化合物(PFAS等)に関する会議が開催された。日本からの参加者は数人だけであったようだ。

今、憂っていることは、コンクリートや鋼矢板によって押し込められたり、流れを制御されている汚染された地下水が、地下の見えない所で漏洩することによって、再び土壌地下水汚染が勃発するのではないかとということである。このようなことが起こらないように、自分達の周囲の地下水の「水質」に関しても、常にモニタリングするような社会であってほしい。

6. 地下空間貯蔵

地下空間に空洞を掘削して、石油やLPガスを有事のために備蓄する国家事業がなされた。石油に関しては、岩手県久慈、愛媛県菊間、鹿児島県串木野で実施されている。LPガスに関しては、愛媛県波方、岡山県倉敷に15年前から備蓄している。

地上備蓄では、東北地震では津波で大災害が生じた。しかし、久慈基地（石油備蓄）では、地上施設は大被害を受けたが、地下備蓄は大丈夫であった。この備蓄基地の石油やLPガスの漏洩は、地下水を地下貯蔵タンクに流入することによって防止する「水封式」システムで実施している。地下水があるから安全に貯蔵できているため、地下水位の管理は常に実施している。

倉敷備蓄基地では、深度180mの基地内の100カ所における水圧を光ファイバセンサーでモニタリングしており、設置して10数年になるが、センサーは今も健全に稼働している。

7. 放射性廃棄物の地中処分

放射性汚染物質を地中に、その汚染度が減衰するまでの10万年近く処分するプロジェクトが、世界中で実施されている。フィンランドではこの事業が進んでいる。スウェーデン、スイス、フランスでも地下処分サイトが決定されようとしている。原子力発電所から出てくる高レベル放射性廃棄物がその対象である。日本では、地下300m以下に処分するように、国の基準がある。きわめて最先端の科学であるが、地下深部まで鉛直にどれだけ掘削できるかの実証試験が、岐阜県の花崗岩（結晶片岩）のサイトで実施された。また、北海道の幌延では、堆積岩の中でも現在実証試験を実施している。

安全にどのように処分していくかについて、世界中の国々と協同して実施している。まだ、日本のどの場所で本当に処分するかについては決まっていないが、地盤内の可視化技術や、光ファイバー等を用いた長期間のモニタリングシステムが開発されてきて、どんどん進歩した状況で処分できそうである。

地層処分でいちばん大切なことは、汚染物質がどこまで移動するかを確実にすることである。地下水がほとんど動かない所では、移流よりも拡散による物質移動になり、10万年という時間で地表まで汚染物質が流出してくることは考えにくい状況と考えている。しかし、火山、地震のある日本列島であるが、火山の近くへの処分を避けている。また、地震によって地下の処分物質が動くことはほとんど起こりえない現象と考えている。地下深部での地下水の挙動をどのように予測して推定するかについての、科学的、技術的妥当性の検証ができればと考えている。

8. その他

8.1 地下水と漁業との関係

地下水によって生じる海底湧水は、栄養塩を多く含んでいるため、沿岸の漁業に役立っている。一例として、富山湾の海底湧水は、黒部川の水と比較すると、リンが約2倍で、窒素は約5倍濃度が高いとの報告がある²⁰⁾。

この海底湧水に関しての詳細な情報は何もない。この湧水のおかげで植物性プランクトンが育ち、食物連鎖で大量のエビが育ち、魚が育つ。したがって、周囲の山の木を育てて魚を得ることになっている。その中で、地下水と湧水がどのような関係にあるかをもっと詳しく調査したいものである。

8.2 地下構造物の耐久性の診断システムと

その維持管理のための手法の確立

地下水低下工法のために矢板を打設して、地下水をポンプアップして、地下水位を低下させる工法が、液状化対策として実施されてきている。ここでの課題は、矢板による止水によって周囲の地下水位の対象領域への地下水の浸入を、未来永劫防げるかである。

一般に矢板のその両面からの腐食は、年間に0.1mm程度であると考えられている。仮に、矢板厚さが20mmであれば、100年間と期待できる。しかし、人間の寿命が100年近くになると、土構造物の耐久性が100年では短すぎるかもしれない。しかし、矢板の腐食速度は周囲の地下水の水質によっても異なってくる。したがって、矢板がどの程度腐食進行しているかをモニタリングする必要がある。

地中の鉄構造物の耐久性としては、鋼管パイプがある。羽田空港の新しい滑走路は、盛土と鋼構造橋梁になっている。この鋼構造に関しては、電気防食対策がなされている。一方、地中の鋼構造物の腐食対策や、リアルタイムでのモニタリングシステムの実施については、ほとんどなされていないと考えられる。

液状化対策としての地下水低下工法でのもう一つの課題は、降雨浸透による地下水位の上昇である。すなわち、地表面からの降雨浸透流量をいかに少なくするかである。降雨浸透を少なくするために地表面をアスファルトやコンクリートで被覆する対策がある。これに対しては、それなりの効果は期待できるが、そのような被覆ができない植生域では、降雨の浸透をコントロールすることは極めて困難である。地表面に凹凸をつけて表面排

水を確実にして、地下への降雨の浸透流量を少なくする方法が考えられる。しかし、それでも地表面層の浸透は防げない。

この地表面の透水係数を小さくするため、地表面にベントナイトを散布して、地下水の補給流量を少なくする方法が考えられる。このような対策をしても、雑草は繁茂するので、その管理は別途必要である。地表面の環境を考慮した地下の水分の管理対策には、まだまだいろいろな課題が残っている。

8.3 河川堤防基礎の漏水対策

河川堤防基礎のボーリングやパイピング対策として、河表に矢板も打設する対策は一般的になされている。この場合の対策は、地下の水みちが明確でないので、ボーリング等の事象が現れた場所から45°の角度での直線を河表まで引いて、河表の堤防の法尻範囲に矢板を打設する手法が実施されている。これは、河川からボーリング箇所までの水みちを明確にするには、堤防下での地下水の3次元的な流動を明確にすることはまだ難しいので、このような簡単な手法で矢板の打設範囲を決定しているのが現状である。

地盤内を地下水が流動すると、それによって自然電位が変化する現象を適用しての水みち探査手法も考えられているが、まだこの手法は一般に適用されていない。

地表の電気探査より河川からの流入箇所を特定する手法も実施して、河表からの河川水の流入箇所を特定する方法もある。ここでも地下水が河川の中のどこから浸透してくるかはまだよくわかっていない現状である。

8.4 地下水の排水とそのシステムの浄化

最近、地下水の排水工法がどのように進化しているかについて論述させていただいた²¹⁾。その中で、原位置での地下水探査法は、まず、最初にフローメーター法による地下水探査をして、複数の帯水層の浸透特性を調査して、各帯水層の水位、水圧を計測するために、孔内の多点での計測が必要であることを述べている。

揚水した地下水をどのように元の帯水層に復水するかについても記述しているので、勉強してほしい。さらに、地下水位を長期で排水する水平行の目詰まりを洗浄するため、マイクロナノバブルによって洗浄する手法についても述べている⁵⁾。

9. おわりに

地下水の何を知って喜んだのか、また、地下水の何を憂いているかを、以下にまとめる。

(A) 嬉しいこと

- (1) 豪雨による地下水による斜面安定の予測が可能となりつつあるという状態まで、地盤内の可視化ができるようになってきていること。
 - (a) 岡山大学の半田山で2018年に斜面崩壊が生じた。それから6年間、斜面の勾配が30度以下の斜面崩壊が生じた場所の周囲の地盤内の地層構造がわかるようになった。
 - (b) 斜面内の構造がわかると、豪雨がくる前に危険な斜面が判明し、事前に対策ができる。
 - (c) 斜面内の地下水を水平ボーリングで排水し、崩壊可能性がある所に極超微粒子セメントか極超微粒子ジオポリマーを注入して、地質を強化する対策が可能になってきた。
 - (d) 対策した場所の経年的な劣化に対しては、DASを使うことによってリアルタイムでモニタリングできることがわかった。
 - (e) 斜面内の地下水を常に排水しておく、地震がきても斜面が崩壊しにくいことが、2024年の能登地震でわかった。
 - (f) 地盤内の排水施設に生じる目詰まり現象に対して、マイクロナノバブルを用いて排水管の孔内側も孔外側も洗浄できる可能性が判明してきた。
- (2) 平野部での地盤の液状化対策
 - (a) 行政は、地震によって液状化する地域をハザードマップで示してくれている。
 - (b) 広範囲の液状化対策をするために、対象領域の周囲の止水で対策できることが専門家にわかり、地下水を低下する対策がなされるようになってきた。
 - (c) 個人住宅の基礎に極超微粒子の鉄鋼スラグセメントを注入することが可能になった。
 - (d) この成果をイギリスの土木学会で発表して、テルホールド賞を受賞され、国際的に最も高い評価がなされた。
 - (e) 伊豆大島の三原山の火山灰と水ガラスとを混合すると、2000年近くの耐久性があるジオポリマー材料ができることがわかった。これによって危険な斜面を強化できることがわかった。
 - (f) 火山灰、ゴミ熔融スラグや石炭灰は、水の中

で極超微粒子に粉碎することは、鉄鋼スラグより簡単であることがわかった。

- (g) 残る課題は、水ガラスのコストをいかに低下させるのかの課題であることがわかった。

(3) 地下水の熱利用の可能性について

- (a) 大阪の梅田北のヤードで、地下水の熱利用(ATES)についての実験を実施して、揚水した地下水を同じ帯水層に復水すると、地盤沈下がほとんど生じないことがわかった。
- (b) 従来まで地下水揚水規制があった梅田北ヤードが、環境省により、地下水熱利用に関しての特区内にいただいた。日本中の過去の過剰揚水によって地盤沈下した所でも、同じように地下水の熱利用ができることがわかった。
- (c) オープンチャンネル方式での地下水熱利用における課題は、復水周囲の目詰まりが生じることがわかった。
- (d) この目詰まり現象は、揚水した地下水に含まれる細粒土を復水井に復水してしまうために生じることがわかった。
- (e) その対策として、復水井からの地下水をいろいろな技術で浄化する必要がわかった。
- (f) 揚水に含まれている細粒土を、復水する前に効率よく除去する対策が、日本ではまだ確立されていないことがわかった。
- (g) 揚水の細粒土を連続して除去するイスラエルのシステムを、久慈の石油国家備蓄基地で適用して、岩盤内への注水では、ほとんど目詰まりしないことを確認できた。
- (h) 揚水井からの水を帯水層内に復水するときに、復水井内の水位(許容注入水位)をどの程度にするかが、まだ明確になっていないことがわかった。
- (i) この許容注入水位を原位置でどのように計測すれば良いかがある程度判明した。
- (j) 揚水井内の水位低下を段階的に低下させ、どのような粒径の細粒土が揚水に含まれているかを電子顕微鏡で連続して計測して、細粒土の含有が少なくなるまで、揚水井内の水位をさらに低下させ、上記のモニタリングを繰り返して、復水井内の井戸の周囲の帯水層内の細粒土を復水する前に除去する手法で、どこまで地下水を低下できるかを決定する事前調査が必要であることがわかった。
- (k) 復水井内の水位低下の値に安全率を考慮した水位低下値を定めて、その水位低下の値

を、許容注入水位として、復水井内の水位を上昇させて注水すると、復水井周囲での帯水層内での目詰まりがある程度回避できるのではとの新しい案を提示することができた。

- (1) 帯水層で揚水すると、揚水井の周囲の地下水水位が低下するため、井戸周囲の帯水層内の細粒土が除去できないため、揚水井内の水压を低下させるために揚水井内の空気圧を減少する手法を提示することができた。
- (m) 揚水井内の水位の上下によって帯水層内の細粒土が移動する現象の内部浸食(Internal Erosion)に関する研究者が、近年の地盤に関する学会発表会で増加していることを知ることができた。

(4) 土壌地下水汚染現場での浄化対策

- (a) 古い地下水循環浄化対策に対して、トリクロロエチレン等での帯水層内の汚染現場でのバクテリアを用いた新しい洗浄システムが確立されてきた。
- (b) この浄化対策をさらに効率化するために、地下水温を20℃程度まで上昇させ、バクテリアにエサを追加して与えると、浄化に必要な日数が半分近くになることがわかった。
- (c) この新しい浄化システムは、地上の建物を移動させなくても、地下の地盤を浄化できることがわかった。

(5) 地下水の挙動の予測

- (a) 地下水挙動に関する予測解析に3次元での飽和不飽和領域を含む数値解析が一般的になってきている。
- (b) 国交省の計測で、岡山の高梁川での堤防内での水位、水压を光ファイバセンサー(FBG等)で10年近く連続して計測可能であることがわかった²²⁾。
- (c) また、同じ堤防で堤防内の不飽和水分量の変動は、誘電率変化で計測して、光ファイバケーブルにより、国交省河川工事事務所からリアルタイムでモニタリングできることを確認できるようになってきた。
- (d) これらのデータを初期データとして、河川堤防内に浸透してくる降雨や河川水の挙動も、3次元で予測することが可能になった。
- (e) 今後は、これらのデータから線状降水帯が発生した時に河川堤防の安全性を、リアルタイムで予測することが可能になった。
- (f) また、一方では、堤防内や堤防基礎の浸透に

よる危険度を予測するための公開された力学分野の解析ソフトがないことがわかった。

- (6) 地下水位の高い日本で、有事のためのエネルギー備蓄を実施しているサイトで、石油備蓄基地では30年近く、LPG備蓄基地では10年近く、「水封式」で地下水の力を借りて備蓄できることがわかった。
- (7) 日本地下水学会が2024年10月に地下水の事典を出版した²³⁾。この事典の中に最新の地下水に関する事項が網羅されているので、地下水に関心のある方々は、座右の書として一冊持っておられると便利である。
- (8) 地下水に関する国際的なフレームとして、IUGG (The International Union of Geodesy and Geophysics, 国際測地学・地球物理学連合) の下部組織として IAHS (International Association of Hydrological Sciences, 国際水文学会) と IGC (International Geological Congress, 万国地質学会議) があり、IGC の下部組織の IAH (International Association of Hydrogeologists) がある。他の多くの学会・協会があり、2025年9月15日からオーストラリアのメルボルンでの国際会議が計画されている。数年後は日本での開催が計画されているので、多くの研究者が参加してほしい。
- (9) 2026年度には「防災庁」が設置されることになる。「災害対応の在り方を新たなステージに引き上げ、人命と財産を最優先に防災立国を確立する」を政府が決定した。この組織によって地下水が原因となる土砂災害や液状化災害を、災害が起こる前(事前防災)に本気で対応することになっていることは、嬉しいことである。

(B) 憂いごと

(1) 豪雨による斜面安定の予測

- (a) 斜面内への降雨の浸透の予測には、斜面内の間隙水と間隙空気の手動を考慮した数値解析手法が、まだ一般に公開されていない。
- (b) 日本中の斜面内に DAS によるモニタリングシステムがまだ普及していない。
- (c) 斜面内の不飽和浸透特性を計測する技術が確立されていない。

- (d) 斜面の植物も含んだ斜面安定を計測した例がない。
- (e) 斜面強化のための斜面内のジオポリマーを注入した事例もまだない。
- (f) 安価な斜面内の地下水の排水システムが確立されていない。
- (g) 斜面安定を長期間モニタリングした例があまりない。
- (h) 斜面内の排水施設の劣化度に関するモニタリングがなされていない。

(2) 地盤の液状化対策

- (a) 液状化対策のための地下水低下工法のための揚水電力に、新しい太陽光発電システムが使われた例がまだない。
- (b) 地下水位低下のために、対象領域の周囲を鋼矢板で止水した鋼矢板の劣化を、リアルタイムでモニタリングした事例もまだない。
- (c) 鉄鋼スラグセメントで実際の家屋の下に注入して地盤強化した事例もまだない。

(3) 日本全土での堤防内のモニタリングを

- (a) 日本中の堤防内の地層構成のデータがない。
- (b) 堤防の河裏の排水システムの目詰まりのモニタリングや、その対策のドレーン層の洗浄技術がまだ確立されていない。

(4) 地下水技術者の育成

- (a) 日本中の中高の教育の中で、地学教育の場が少なくなっている。
- (b) 日本中の大学講義で、地下水に関する講義の場がどんどん減少してきている。
- (c) 異常気象で地下水への降雨の浸透に関する現地データを収集された事例はほとんどない。
- (d) 地下水の教育の中に、地下水が移動すると、地山や盛土、切土内の細粒土が移動して、経年的に土の中が変化してくることを、あまり教育されていない。

(5) 若者への教育

また、若者への真の教育とは、若者に「夢」を持たせることと考えている。できるだけ大きな夢を持ち、35歳くらいまでにその大きな夢の車輪を動かそうとしていくことが重要である。夢の車輪が大きければ大きいほど、その動きは最初はゆっくりであるが、一度動き出すとすぐには止まらないで長い時間動き続けていく。それに対して、小さな車輪は簡単に回せるが、すぐに止まってしまう

うと、昔教えられた。そのような教育があまりなされていない。

(6) 叙事詩的な地下水

地下水の様子について語ると、叙事詩的になる。その最たる文章に、先日遭遇した²⁴⁾。その文章の中に、京都の地下水の水位がここ20年で減少しているとの次のような記述があった。

「それから井戸を覗く。水に映る私の顔がどんどん遠くなっていくのが心細い。」

京都の地下水は、半世紀以上前、京都の南北の地下鉄が建設されるときに勉強をさせていただいた。なぜ地下水位が低下するのかと考えると、以下の事象が考えられる。

- (a) 地下鉄の中への漏水流量が増加している。
- (b) 南北線の北の方で、地下鉄が東西に建設されているので、北からの地下水を自然的に下流に流下するために特別な施設を設置した。その施設が目詰まりによる老朽化で、地下水の流動が減少しているのか。
- (c) 下流での地下水を利用している水ビジネスで、揚水流量が増加したためか、日本の文化の中心である京都の地下水がどのようにになっているかは、一般に報告されないのだから、この地下水の挙動がわかるシステムがどこかにあってほしいものだ。このように何もモニタリングしていない日本の名水が、これからどのようにになっていくのが心配だ。

謝辞

本本文を執筆するにあたり、以下の方々にお力をいただきましたので、ここに記して謝辞とさせていただきます。

- (1) DASによる地盤内の可視化について、鹿島建設(株)の今井道男氏、瀬尾昭治氏、大日本ダイヤコンサルタント(株)の山内真司氏。
- (2) 物理探査結果の妥当性の確認について、(株)ウエスコの井上真氏、岡山地下水の西村輝氏。
- (3) 最近の土壌地下水汚染の浄化について、(株)竹中工務店の清水孝昭氏、中島明宏氏、国際航業(株)の中島誠氏。

(参考資料)

- 1) Brutsaert, W., Hydrology: An Introduction, 2nd Edition, Cambridge university press, 2023.
- 2) Brutsaert Wilfried 著, 杉田倫明訳, 水文学 [原著第2版], 共立出版, 2024, p.576.
- 3) 地盤工学会編, 地下水を知る, p.224, 2008.

- 4) 西垣誠, 瀬古一郎, 中村裕昭, 育水のすすめ, 技報堂出版, 2013, p.175.
- 5) 科野健三, 保志篤, 熊谷茂一, 川俣和久, 西垣誠, マイクロ・ナノバブルによる集水井横ポーリング集水管外閉塞物除去に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.19, No.3, p.285-303, 2024.
- 6) 西垣誠, 浸透流の解析技術と地質のモデル化, 地質と調査, 通巻83, pp.19-25, 2000.
- 7) 田中茂, 集中豪雨による斜面崩壊の本質的検討, 施工技術, 第5巻, 第11号, pp.14-21, 1972.
- 8) 木村 隆行, 八野 祐二, 吉川 猛, 伊達 裕樹, 松井 章弘, 西垣誠, AHP法を用いた14人の熟練地質技術者による不安定斜面の評価, 地盤工学会中国支部論文報告集 地盤と建設, Vol.42, No.1, p53-?, 2024.
- 9) 山内泰知, 杉本芳博, 高岡宏之, 瀬尾昭治, 今井道男, 吉村雄一, 西垣誠, 西村輝, 斜面上に埋設された光ファイバー DAS計測を用いた表面地探査によるS波速度構造の推定, 地盤工学会, 第58回地盤工学研究発表会, 2023.
- 10) 西垣誠, 井上真, 斜面崩壊規模の予測のための軽重量サウンディング試験機(LWCPT)の開発, 高速道路と自動車, 第64巻, 第11号, 2021年11月号, pp47~50, 2021.
- 11) 井上真, 山内真司, 西垣誠, 小西千里, 根本雅夫, 西村輝, 橋徹, 微動探査および軽重量サウンディング試験機を用いた崩壊地のS波速度帯の抽出, 地盤工学会 第58回地盤工学研究発表会, p11-11-3-02, 2023.
- 12) 西垣誠, 金沢智彦: セメント系注入材の注入によるしらす斜面崩壊防止対策に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, pp.213-224, 2011.
- 13) 福田洋一, 服部晃久, 奥野淳一, 青山雄一, & 土井浩一郎, 国立極地研究所での重力変化について, 測地学会誌, Vol.68, p.1-13, 2022.
- 14) 小泉悠, 田中俊行, 竹内仁哉, 金沢智彦, 西垣誠: 極超微粒子セメント注入材による砂質土地盤への注入工法の開発, 材料, Vol.61, No.1, pp.52-57, 2012.
- 15) Reddi, L.N., Lee, I.M. and Bonala, M.V.S., Comparison of internal and surface erosion using flow pump tests on a sand-kaolinite mixture, Geotechnical testing journal, 23(1), 116-122, 2000.
- 16) 日本道路協会, 道路工-盛土工指針-(平成22年度版), pp.165-166, 2010.
- 17) 竹内篤雄, 自然地下水調査法, 近未来社, p.201, 2017.
- 18) 山崎祐二, 古川靖英, 中島朋宏, 稲葉薫, 清水孝昭, 西垣誠, 田小維, 鈴木市郎, 小林剛, 井上大介, 池道彦, 加温原位置バイオレメディエーションによるクロロエチレン類汚染地下水浄化, 土木学会論文集 G(環境), Vol.78, No.2, p.49-60, 2022.
- 19) 濱田浩志, 接触酸化法を用いた第一鉄添加によるトンネル湧水中からのヒ素除去, 第51回地盤工学研究発表会, 1066, 2016.
- 20) 八田真理子, 張勁, 佐竹洋, 石坂丞二, 中口譲, 富山湾の水塊構造と河川水・沿岸海底湧水による淡水フラックス, 地球化学, 3Vol.9, No.3, p.157-164, 2005.
- 21) 西垣誠, 科野健三, 地下水排水工法の課題と対策, 基礎工, 2021年6月号, pp.2-6, 2021.
- 22) 立石亮, 片山輝彦, 佐藤毅, 野口直人, 阿部貴史, 西山哲, 西垣誠, 豪雨時における高梁川の堤防内水位の挙動について, 第54回地盤工学研究発表会, C-07, 0104, 2019.
- 23) 日本地下水学会, 地下水の事典, 朝倉書店, p.601, 2024.
- 24) 千宗室, 京都の露地まわり道(184), 水の町, ウェッジ, ひととき, 第25巻, 第2号, pp.7, 2025.

地下水の奥深さ — 科学から文化まで —

たけうち しんじ
竹内 真司*

K
Key Word

地下水, 湧水, 水循環, 可視化, 地下水流動, 水理地質構造モデル,
帯水層モデル, 粒子追跡解析, 地下水保全, 合意形成

▼1 はじめに

地球上に存在する水の量はおよそ14億 km^3 とされており、このうち約97.5%は塩水、約2.5%は淡水とされている。さらに淡水の内訳は、水河等が約1.76%、地下水は約0.76%、河川・湖沼等の水が0.01%とされている¹⁾。淡水のうち約7割は水河等のため、すぐに利用可能な淡水のほとんどは地下水ということになる。このことから地下水資源が貴重であることが分かる。地下水は古くから日常生活に必要不可欠なものである。地下水は土地の所有者が敷地内で自由に汲み上げることが可能なため、大量な汲み上げにより周辺の井戸や湧水を枯渇させ、地域によっては地盤沈下などの地下水障害を引き起こすことがある。また、水が原因となる紛争もしばしば発生している^{2) 3)}。国内では、これまで民法第207条により土地所有権と地下水利用が関連づけられており、取水制限がかけにくい状況があったものの、近年では多くの地方公共団体が独自の条例等を制定し、無秩序な地下水の汲み上げに歯止めをかけようという動きもある。

2014年7月に施行された水循環基本法では、水の公共性や健全な水循環への配慮、流域の総合管理など5つの基本理念が謳われている⁴⁾。また本法の下で策定された水循環基本計画では、地下水の適正な保全及び利用として、地下水に関する情報の収集や保存、適正な保全や利用に関する協議会等の活用、取水制限、さらには代替水源としての利用などが盛り込まれている⁵⁾。このように持続可能な地下水の保全と利用を推進するための仕組みは整備されてきてはいるものの、地下水の涵養から流動そして流出における過程は直接目で見ることができない。そのため、現地調査やコンピュータシミュレーション等

により地下水の流動場を推定し、見える化するための技術開発が続けられている。これは、水循環基本計画（令和6年8月改定）の中の、持続可能な地下水の保全と利用を推進するための地下水の挙動等の実態把握の一つとして挙げられている「可視化」に相当すると考えられる。自分の足元を流れる地下水が、どこから来て、どこに向かうのかを理解することにより、持続可能な地下水の保全と利用の意識の向上につながることを期待される。

また、地下水は湧水という形で全国各地に存在し、人々の心の安らぎの場を提供している。また場所によっては神社のご神体として信仰の対象や心の支えにもなっている。このように、地下水は科学的な側面と文化的な側面を持ち合わせ、生活に密接に関連した存在である。

そこで本稿では、目に見えない地下水の文化的側面と科学的側面について事例とともに概観したい。

▼2 地下水の文化的側面

地下水は目に見えないものの、地下水が地表に湧き出した湧水は全国各地に存在する。環境庁（現、環境省）は1985年に名水百選を選定し、さらに2008年には「平成の名水百選」を選定した。これらには河川水や用水も含まれるが、ほとんどが湧水や地下水である。また、公益社団法人日本地下水学会は、同学会の学会誌「地下水学会誌」に掲載されている「訪問記 名水を訪ねて」の中から80地域を選定し、2023年に「図説 日本の湧水 - 80地域を探るサイエンス -」⁶⁾を刊行した。この中には、東京都の明治神宮境内にある「清正井」が紹介されている。ここは、淀橋台（下末吉面）を下刻する谷頭湧

* 日本大学文理学部地球科学科 教授

水であり、渋谷川の源流のひとつとなっている。都内でも有数の湧水であり、近年ではパワースポットとして多くの人々が訪れる場所になっている^{6),7)}。一方で、特異な水利用の例として岐阜県の郡上八幡の「水舟」と呼ばれる水槽がある。これは山裾の湧水をパイプによって導水し、木製やコンクリート製の水槽を2～4段階段状に重ねたもので、上段は飲み水に、中、下段はすすぎ水や洗い水として利用されている^{6),7)}。本書にはこのほか全国各地の湧水地点がオールカラーで掲載されており、一読の価値がある。なお、上述の「図説 日本の湧水」には掲載された湧水の水質データがシュティフダイヤグラム（ヘキサダイヤグラム）として掲載されているほか、主要溶存成分もQRコードからアクセス可能となっており⁶⁾、研究者にも利用価値が高い。

次に水文化の継承という観点からいくつか事例を挙げてみたい。一つは、京都伏見の酒造りに利用されている「御香水」（ごこうすい）である⁸⁾。これは桃山丘陵からの伏流水が湧出した地下水で、当地では酒造りに使う地下水として早くから重要性が認識されていた。地下水の保全に関しては、これまでに地下鉄工事や都市化にともなう水枯れが想定され、大規模な地下水脈の調査や解析が行われてきた。酒造組合が組織する「伏見地下水調査委員会」は1979年（昭和54年）京都市に要望書を提出し、その結果、伏見地区の地下鉄工事では設計・施工者と協議し、地下水を保全するための全面的な協力を得ることとなった。現在では5年ごとに蔵元の井戸の使用状況や揚水量、水質などを確認している⁸⁾。このように地域の人々にとって地下水が貴重な水資源との認識が共有され、地下水保全の意識が高まっている。もう一つは福井県大野市の人材育成事業である。同市は湧水が豊富で、地元では「清水」（しょうず）と呼ばれている。約440年前にこの清水を城下町に引き込む町割りが現在も残っている。かつては湧水の枯渇に直面したものの、地下水対策審議会を設置や地下水保全基金の設置等によりその危機を乗り越えた。そして、これまで培った知見等を基に、様々な方法で水に関する知見や研究成果を内外に発信している。これにより、水問題に取り組む人材の育成が行われている⁸⁾。

3 地下水の科学的側面

地下水の科学的側面として、地下水の流れの特徴とその流動場を推定する方法について事例を交えて紹介する。

地下水の流れの駆動力は幾つかあるが、最も一般

的なものは動水勾配である。これは、地下水位の勾配が低い方向に流下するというものである。実際には、標高に基づく重力ポテンシャル（位置ポテンシャル）と地下水面より下の水圧に基づく圧力ポテンシャルの和としての地下水ポテンシャル（水理水頭）の勾配で流動することになる。Tóth⁹⁾は等方均質な帯水層中で地形の起伏によって生じる地下水面が駆動力となって形成される地下水流動を解析的に解いた結果から、広域流動系と局所流動系、その間の中間流動系が存在することを示した（図-1）。

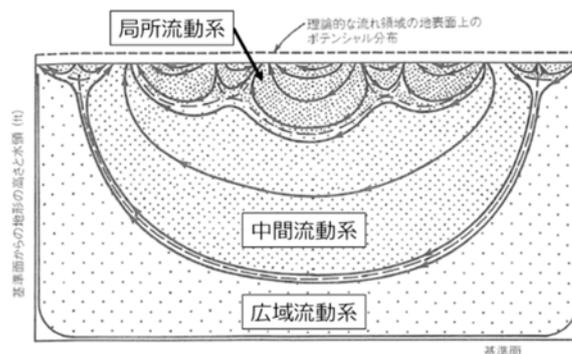


図-1 Tóth⁹⁾による地下水の流動系（大西¹⁰⁾に加筆）

地下水流動を理解するうえでは、対象領域の深度や広さを考慮して、上述の三つの流動系のうち、どの流動系が対象となり得るのかを念頭に調査や解析を行うことが必要である。なお、実際の地質環境は、帯水層や難透水層が互層を形成していたり、亀裂性岩盤の場合は割れ目が含まれたりすることから不均質であることの方が多い。このため、対象領域ごとの特性を把握することが必要となる。以下では、一般的な現地調査から解析に至る手順を簡単に紹介するとともに、水理試験の結果に基づく流動場（帯水層の概念モデル）の推定事例や地下水流動の可視化事例を紹介する。

地下水流動を理解する一般的な手順としては、①目的（何を明らかにするのか）の設定、②既往文献の調査、③調査計画の立案、④現地調査、⑤水理地質構造モデルの構築、⑥地下水流動解析、⑦解析結果の妥当性の評価が挙げられる。このうち、⑤の水理地質構造モデルは、地質構造の三次元分布を表現した地質構造モデルに水理試験で得られた水理パラメータ（透水係数や間隙率など）を各地質要素に割り当てたモデルを指す。⑦の評価においては、評価指標としての物性値（水頭や地下水年代など）についての解析結果と実測値に大きな隔たりがある場合は、不確実性が大きいと考えられる手順まで戻り、追加の調査や水理地質構造モデルを修正することと

なる。近年では調査→解析→評価を何回かくり返して段階的に理解度を向上させる“繰り返しアプローチ”の有効性も示されている¹¹⁾。

ここでは、④現地調査のうち、ボーリング孔での揚水試験結果から流動場を推定する方法について紹介する。地下水学の分野ではしばしば、定流量での揚水試験により水位低下量の時間変化データを取得し、Theisの方法¹²⁾やJacobの方法¹³⁾により透水係数等を求める方法が行われる。また、石油工学などの分野では、揚水試験で得られる水位低下量と時間変化曲線(以下、圧力変化)の時間微分(derivative)を両対数グラフ上にプロットすることで流動場を推定する方法がある(図-2)。この方法では、水平に広がる被圧帯水層を対象に実施された揚水試験の初期には、圧力変化と時間微分曲線が両対数グラフ上で1:1の直線として現れる。この時間帯ではボーリング孔内の水を優先的に汲み上げる「井戸貯留」と呼ばれる現象が生じている。さらに揚水を続けると、図-2の1:1の直線が二つに分岐し、ここからおおよそ1.5対数時間経過すると帯水層中の地下水をくみ上げる「放射状浸透流」の時間帯が現れる。この時間帯では、時間微分曲線がグラフ上で概ね水平な傾き(傾き:0)を示す。さらに時間が経過すると、時間微分曲線は上向きあるいは下向きの傾きを示すことがある。これは、帯水層の境界の影響が現れているとされる。揚水過程の試験では上向き傾向を示す場合は、不透水境界に達したと判断される。すなわち、不透水境界では境界外側からの地下水の供給が減少するため、圧力変化量(水位低下量)が大きくなり、その結果、時間微分値が大きくなる。一方、時間微分曲線が下向き傾向を示す場合は、定水頭境界に達したと判断される。この場合、境界部には、河川や湖沼などが存在し、その水位に応じた地下水が供給されることから、水位は一定に保たれるため、時間微分値はゼロに近づくこととなる¹⁴⁾。

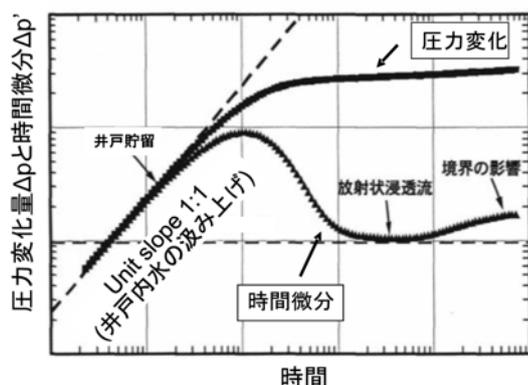


図-2 揚水試験時の圧力変化と時間微分の両対数軸プロット (Horne¹⁴⁾を改訂)

Renard et al. (2009)¹⁵⁾では、被圧帯水層モデルのほか、二重空隙モデルや漏水性(周辺層から地下水供給がある状態)の帯水層モデルなど様々な帯水層モデルを診断プロット(Diagnostic plot)の特徴として整理している(図-3)。このような診断プロットを基に帯水層モデルを推定することにより、図-4に示すような井戸周辺の流動場を概念化することが可能となる。さらにこの時間微分曲線から透水量係数(透水係数×層厚)に換算する手法も提案されている¹⁹⁾。この手法を用いて、一本のボーリング孔で実施された複数の水理試験結果から得られた時間微分曲線を同一のグラフ上にプロットすることにより、透水性亀裂の連結性を推定することが可能となる。図-5は著者らが、瑞浪超深地層研究所のボーリング孔沿いの割れ目帯(深度約405~460mの約50m区間)中で検出された4か所の透水性亀裂を対象に実施した揚水試験で得られた時間微分曲線を透水量係数に変換したものである²⁰⁾。ボアホールカメラで判断された4か所の亀裂の走向傾斜はほぼ同系統であり、透水量係数は時間の後半で約2.0E-5(m²/s)で一致した。この結果は幅約50mの割れ目帯全体の透水量係数とも一致していることから、割れ目帯を構成する透水性亀裂が互いに連結していることが推定された²⁰⁾。この方法はボーリング孔周辺の流動場を概念的に理解する上で有効な手法と考えられる。これを複数のボーリング孔に適用することで、調査領域内の広い範囲の流動場の理解につながることを期待される。

このように概念化された流動場や原位置での調査(上述の手順④)結果を組み合わせることにより、水理地質構造モデル(手順⑤)が構築される。構築された水理地質構造モデルを基に地下水流動解析(上述⑥)が実施され、その結果として水圧分布や水圧分布に従って移行する粒子の軌跡などが可視化される。なお、地下水流動解析の詳細については、地下水の事典²¹⁾の第V編などを参照されたい。

図-6には筆者らが福島県南相馬市周辺を対象に実施した地下水流動解析による水圧分布から、粒子の移行経路を表現した粒子追跡解析の結果である。西側の山地部から涵養した全ての粒子が東側のため池に流出する結果が得られた。地下水流動解析結果の妥当性(上述⑦)は、粒子追跡解析で推定された粒子の移行時間と地下水年代との比較や、逆粒子追跡線解析(逆方向に粒子の移動を解析し、涵養地点などを推定する手法)から推定される湧水の涵養地点の標高と、当該湧水の水素・酸素安定同位体分析から推定される涵養標高との比較などによって確認される。なお、地下水流動解析は、追加調査やモニ

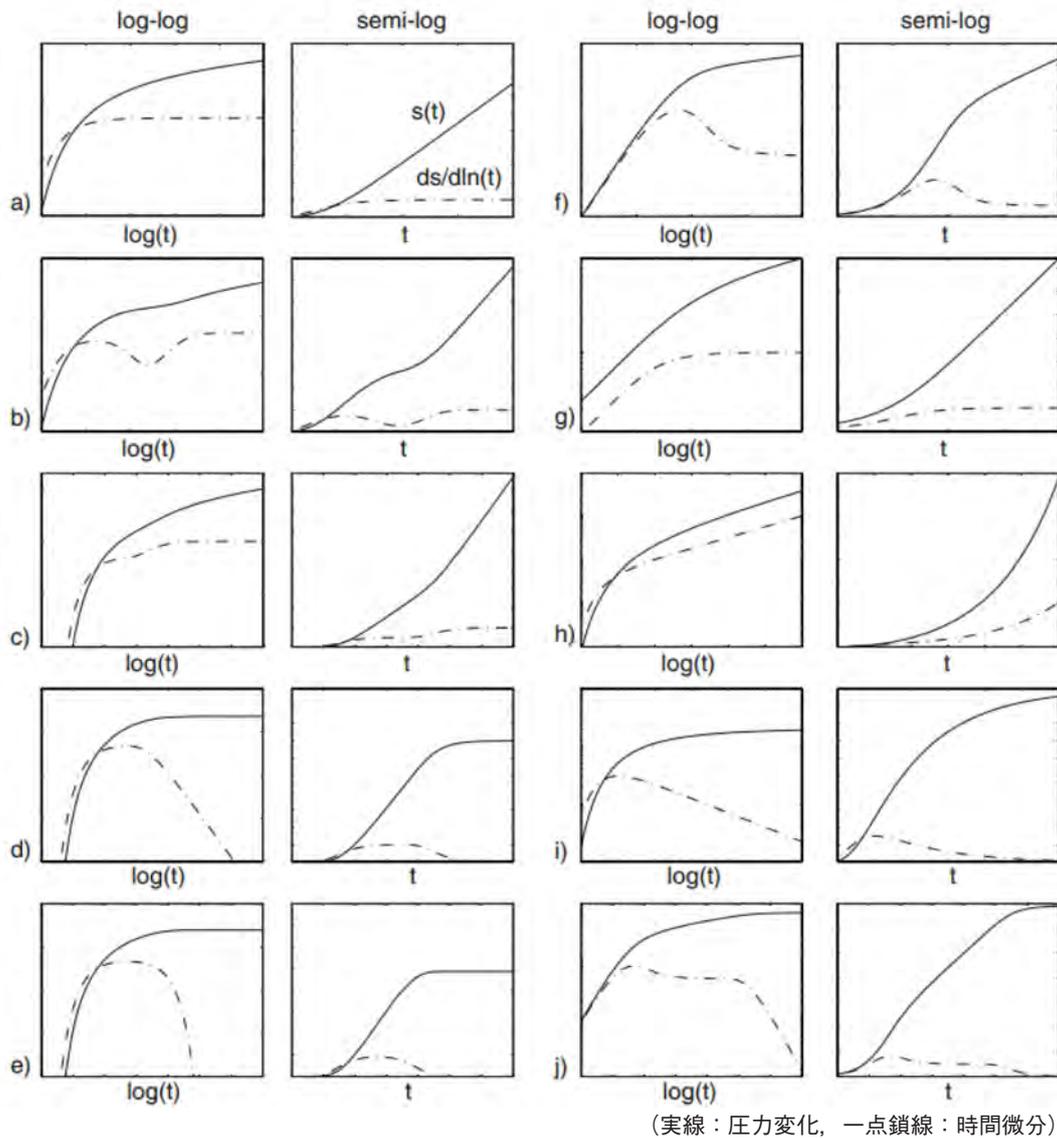


図-3 代表的な帯水層モデルと診断プロットの特徴 (Renard¹⁵⁾)

- a) 被圧帯水層モデル, b) 二重空隙被圧帯水層モデルまたは不圧帯水層モデル,
 - c) 不透水境界が存在する被圧帯水層モデル,
 - d) 定水頭境界が存在する被圧帯水層モデル, e) 漏水性帯水層モデル,
 - f) 井戸貯留とスキン効果を考慮した被圧帯水層モデル, g) 鉛直亀裂モデル,
 - h) 流れの次元*が2よりも小さい帯水層モデル,
 - i) 流れの次元*が2よりも大きい帯水層モデル,
 - j) 定水頭境界が存在する帯水層モデルと井戸貯留の複合影響,
- (*流れの次元については Barker¹⁶⁾, Doe¹⁷⁾, 地盤工学会¹⁸⁾などを参照のこと)

タリング等の情報が追加されることによって結果が変わることもあり得るため、継続的な更新が望ましい。

4 まとめ

地下水や湧水は人々に安らぎを与え、場所によっては信仰の対象ともなっている。また、地域によっては地下水を水道水源として利用したり、食料品な

どの製造に利用しており、日常生活と切り離せないものとなっている。その地下水や湧水がどこから来ているのかを科学的に調査し、可視化する技術も日進月歩で進展している。まさに地下水は、文化的側面と科学的側面を持ち合わせて、人々の生活に根付いている。ここで紹介したような手法などに基づいて、見えない地下水が可視化された結果を、住民や自治体職員をはじめとする関係者が容易に共有でき

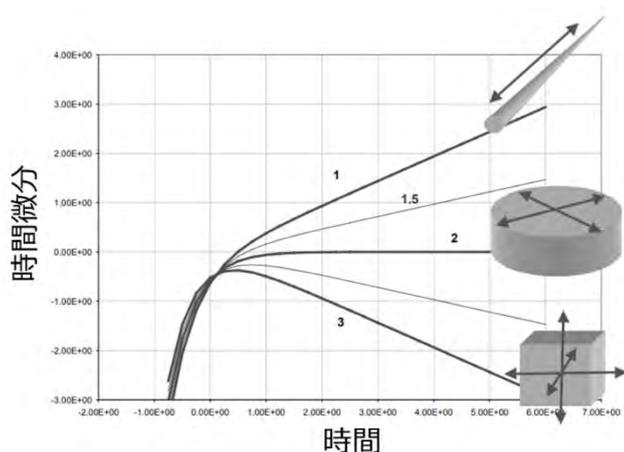


図-4 流れの次元と時間微分の概念図 (Doe¹⁷⁾ を改訂

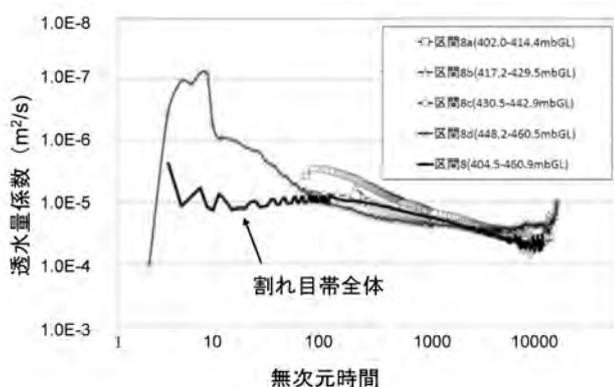


図-5 複数亀裂の透水量係数の時間変化²⁰⁾

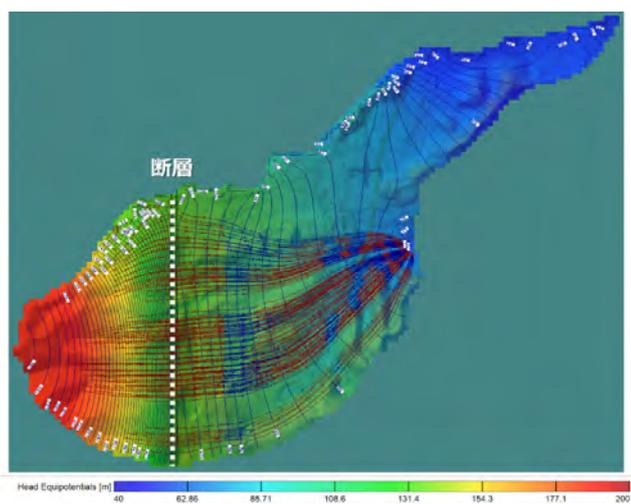


図-6 粒子追跡解析の例

る仕組みが構築され、地域の地下水の保全と適切な利用に対する合意形成が広く醸成されていくことを期待したい。

〈参考文献〉

- 1) 環境省:「図で見る環境白書, 第4章, 第1節1 地球上の水」(平成22年版)
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h22/html/hj10010401.html>
 (2025年1月18日現在)
- 2) 中山幹康:「国際流域での水の分配をめぐる係争と協調」, 「地学雑誌」, pp.43-51, 2007
- 3) NHK:「国際ニュースナビ, 水がないと生きられない…」資源の奪い合いは石油から水へ
https://www3.nhk.or.jp/news/special/international_news_navi/articles/feature/2023/03/23/30336.html
 (2025年1月18日現在)
- 4) 内閣官房水循環政策本部事務局:「水循環基本法の概要」,
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/mizu_junkan/about/pdf/03_kihonho_gaiyo.pdf (2025年1月18日現在)
- 5) 水循環政策本部:「水循環基本計画」
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/mizu_junkan/pdf/20240830kihonkeikaku_honbun.pdf
 (2025年1月18日現在)
- 6) 日本地下水学会編:「図説日本の湧水」, 朝倉書店, 2023
- 7) 日本地下水学会編:「地下水湧水の疑問50」, 成山堂書店, 2020
- 8) 環境省水大気環境局 土壤環境課 地下水・地盤環境室:「地下水保全事例集(第二版)~地下水保全と持続可能な地下水利用のために~」
<https://www.env.go.jp/content/900539382.pdf>
 (2025年1月18日現在)
- 9) Tóth:「A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins」, Geophys. Res., 68,4795-4812. 1963
- 10) 大西有三監訳:「地下水の科学Ⅲ」, 土木工学社, 2009
- 11) 三枝博光ほか「超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書」, JAEA Research 2007-043, 2007
- 12) Theis, C.V.:「The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage」, Trans. Am. Geophys. Union, Vol.16, pp.519-524, 1935.
- 13) Cooper, H.H.J., and Jacob C.E.:「A generalized graphical method for evaluating formation constants from pumping test data」, Trans], Am. Geophys. Union, Vol.27, pp.526-534.
- 14) Horne R.N., :「Modern well test analysis」, second edition, Petroway, Inc., 1995
- 15) Renard, P., Glenz, D. and Mejias, M.:「Understanding diagnostic plots for well-test interpretation」, Hydrogeology Journal, Vol.17, pp.589-600, 2009.
- 16) Barker, J. A.:「A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock」, Water Resour. Res., v. 24, 1796-1804, 1988.
- 17) Doe T., :「Generalized dimension analysis of build-up and pressure interference tests」, SKB IPR-02-70, 2002.
- 18) 地盤工学会:「診断プロットを活用した原位置透水試験の解析方法」, 地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説(2017年度版)]
<https://www.jiban.or.jp/wp-content/uploads/2017/10/4-05-2.pdf>
 (2025年1月18日現在)
- 19) Enachescu C. Frieg B. and Wozniwicz J.,:「A new visul synthesis tool for transient test data」, NGWA Conference, Portland, Maine, USA, 13-15 September, 2004.
- 20) 戸谷成寿, 竹内竜史, 竹内真司:「単孔式水理試験データの時間微分プロットを用いた亀裂性岩盤の水理地質構造の推定」, 日本地下水学会 2009 年春季講演会講演要旨
- 21) 日本地下水学会編:「地下水の事典」, 朝倉書店, 2024

「水のサステナビリティの実現」に向けた サントリーグループの取り組み

かわさき まさとし*
川崎 雅俊*

K
ey Word

水循環, 水文学, 流域, Alliance for Water Stewardship,
Collective Action

1 はじめに

水は人々の生命や生活を支える上で貴重な資源であり、サントリーグループの企業活動の源泉です。水は再生可能な資源であり、地球上からなくなることはありませんが、人間が利用できる淡水は地球上に存在する水の約0.01%にすぎません。

一方で、世界人口の増加や開発途上国の経済成長、気候変動などにより、世界規模での水資源問題が発生しています。2050年までに、世界で約50億人が深刻な水不足に見舞われるとの予測もあります¹⁾。この世界的な水不足には多くの問題が絡んでおり、例えば、水は飲用や生活用水としてだけでなく、食料の生産にも多く使われています。

私たちはグループ環境基本方針の最上位に「水のサステナビリティの実現」を掲げ、バリューチェーン全体を視野に入れて、自然界における水の健全な循環に貢献するためのさまざまな取り組みを進めています。この取り組みの詳細は、サントリーのホームページ²⁾を閲覧いただくことで、最新の情報を確認いただくことができます。その為、本稿では、サントリーグループの取り組みを網羅的に紹介するのではなく、本特集にあわせ、サントリーグループのものづくり拠点を中心とした、地下水を適切に利用する為の取り組みに焦点を絞り、ご紹介したいと思います。

2 水のサステナビリティ実現に向けた 地域の水循環理解

サントリーグループはグローバルに事業を展開する企業として、また水に生かされ、水を生かす企業として世界が抱える課題に真摯に向きあい持続可能

な社会に向けて貢献していかねばなりません。そこで、私たちは環境基本方針に基づき、世界各地の水課題の解決に貢献する取り組みの展開に向けて、サントリーグループ『水理念』を策定しました(図1)。この理念のもと、事業活動を展開する世界各地の水資源の状況に応じた取り組みの開発、推進を行っています。この水理念で最初に謳っているのが、「水循環を知る」です。GHG (Greenhouse gases) 等の課題と違い、水資源に関わる課題はきわめて地域性が高い課題です。その中でも、地下水に関わる課題は、関わる要因が極めて不均一な場にあります。その為、水のサステナビリティを実現する上で、地域の水循環を科学的に理解することは、その後のアクションを計画実行する上で、非常に重要な事と認識しています。そして、その地域の水循環を科学的に理解する為の組織として、水科学研究所を設けております。

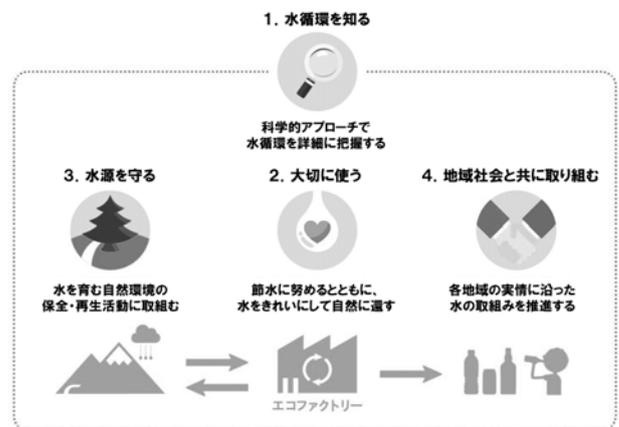


図1 サントリー水理念の概念図

水科学研究所は、2003年に創設されたサントリー

*サントリーホールディングス株式会社 未来事業開発部 課長 / Water Scope 株式会社 代表取締役社長

グループ内の研究機関です。水科学研究所では、水文学を基盤に、水源を育む森と水の研究をはじめ、国内外の水資源の研究、さらには総合酒類食品企業として水における健康や嗜好に関する研究など、「自然界の水」から「生体内の水」まで包括的な理解のための研究と知見の普及を進めています³⁾。水文学は、「地球上の水、その発生、循環、分布、物理的および化学的性質、そして物理的および生物学的環境との相互作用、さらに人間活動への応答などを扱う科学」と定義されています⁴⁾が、水科学研究所が扱う分野も、「サントリーグループが関わる」という一言を付け加えるだけで、水文学がカバーする非常に幅広い領域を取り扱っております。ものづくり拠点で利用する地下水に関わる水循環を理解し、事業に実装していくためには、自然科学的な水循環過程の理解のみならず、自社の水利用や周辺地域での水利用、土地利用の変化等の人為的なプロセスの理解、さらにそれらの変化がもたらす事業、社会的影響等を知ることが必要です。全球の水循環と比べれば、サントリーグループ、特にものづくり拠点が関わる水循環は大きいものではありませんが、水文学の定義にある幅広い視点が必要であることには変わりはなく、このような視点に立った研究活動を推進している点がユニークさの一つと考えています。

▣ 3 ものづくり拠点の取り組み

「水循環を知る」「水文学」というキーワードを示している事から、私たちがものづくり拠点の敷地内（以下、サイトスケールと呼びます）のみならず、流域スケールを重視していることをご理解いただけるかと思えます。もちろんサイトスケールの地下水の動態を軽視している訳ではありません。ものづくり拠点が持続的に地下水を利用する上では、サイトスケールから各井戸スケールまで、場の理解に基づく設計施工から維持管理まで一貫した取り組みが重要なのは言うまでもありません。地形、地質等の文献調査から始まり、電気探査等の物理探査、水質水文調査、試掘ボーリング等を経て得られたデータを元に、工場建設予定地から井戸掘削用地の選定、そして井戸や水処理工程の設計施工、維持管理体制の構築を、サントリー独自の指標と基準に基づき実施しております。これらの活動を、各ものづくり拠点で推進する実行責任者として、サントリーでは、「用水管理者」制度を設けております。用水管理者は、製造ラインに安全安心な水を豊富に安定的に供給する為に、設備を充足化させるだけでなく、場内ルールの整備や人材育成、社内外コミュニケーション

のハブ機能等、非常に幅広い役割を担っております（図2）。

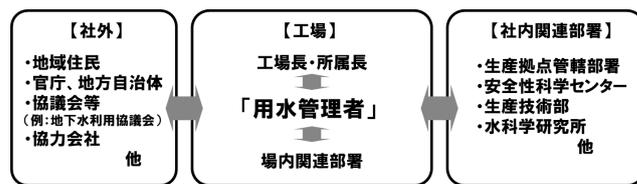


図2 用水管理に関わる工場内外の関係先と用水管理者の位置づけ

質・量ともに満たされた水がない場合の影響範囲や重篤性を考えると、用水管理は、サントリーの最終製品の品質を万全にするための最も重要な源流管理と捉えております。また、「水と生きる」をコーポレートメッセージとするサントリーとして、ものづくり拠点での水への向き合い方は、わたしたちの事業活動の姿勢をお客様に示す象徴としても捉えております。このような考えの元、日々の管理に取り組んでおります。

▣ 4 流域スケールへの展開

水循環基本法の制定等を通じ、地下水も含めた水循環がサイトスケールにとどまらないのは共通認識になりつつあるかと思われます。一方で、水の循環自体は、大気・海洋も含めた全球スケールの事象であり、地域性が高い水の課題に対して具体的な活動を行う為には、何らかの境界を定める必要があります。サントリーでは、地形・地質情報等を元に、ものづくり拠点が利用する水源の上流域を設定し、その流域内で水源涵養機能の向上と生物多様性の再生を目的とした「天然水の森」と呼ぶ活動を推進して参りました⁵⁾。

一方、このような流域スケールで、責任ある水利用の達成に向けた活動を推進する重要性がグローバルでも認知度が高まり、Alliance for Water Stewardship（以下、AWSと呼ぶ）と呼ばれる国際認証が開発されました。AWSでは、5つの主要なアウトカムの達成を目指し、5つのステップで活動を推進することを求めています（図3）。このステップの最初に、「情報の収集と理解」があります。ここで求められる最初の要求事項が、物理的範囲の特定です。この範囲には、サイトスケールと流域スケール、両方の特定が求められます。特に、流域については、ガイダンスでも別途解説が設けられており、認証取得者が水利用に関するリスクを見逃さな

AWS ウォーター・スチュワードシップ国際規格の構成

AWS 規格の枠組みを構築する 5 つのステップ:

1. 情報の収集と理解
2. コミットメントと計画策定
3. 実施
4. 評価
5. 対話と情報開示

各ステップは、取り組むべきいくつかの基準で構成されており、それぞれの基準には順守すべき 1 つ以上の指標がある。指標には、最低限の要件を表す「コア」指標と、より高いレベルのウォーター・スチュワードシップの状態を達成し、継続的な改善を促進するための「アドバンス」指標がある。これらのステップは概ねこの順序に従って履行されるが、それを厳密に守る必要はなく、特定の基準や指標に関連する活動は並行して行われる場合もある。



本規格の実施を通じて、サイトとそのサイトが定義した物理的範囲に対して 5 つの主要なアウトカムを達成することを目的としている:

- 適切な水資源ガバナンス
- 持続可能な水収支
- 適正な水質
- 水資源に関連する重要区域
- すべての人へ安全な水と衛生設備、衛生環境を提供 (WASH)

規格のそれぞれの基準には、それらの基準を履行することで貢献が見込まれるアウトカムのシンボルマークが付けられている。

図 3 AWS が求める達成したい 5 つのアウトカムと、その達成に向けた 5 つのステップの概念図⁷⁾

いよう、また不必要な活動を行うことがないよう、専門家の助言も踏まえながら設定することを推奨しています⁶⁾。

このような、物理的範囲の特定から始まり、適切なアクションを計画、実行に移す方法論が、先に紹介したサントリーグループ『水理念』と親和性が高いと考えられたことから、サントリーグループでは、2018年に「サントリー天然水 奥大山ブナの森工場」(鳥取県)で、日本で初めてとなる AWS 国際認証取得を行いました。また、2023年には、サントリー九州熊本工場で AWS 国際認証でも最高位である「Platinum」認証を取得する等、活動を進めております。

5 地域社会の水サステナビリティ実現に向けて

AWS 国際認証の「Platinum」認証では、企業内部における取組だけでなく、地域社会への積極的な働きかけ等が求められます。これは、単独企業の活動だけでは流域の水リスク低減は達成できず、地域のステークホルダーと共に実施する事が必要という考えに基づきます⁷⁾。このような活動を、Collective Action と呼びます。サントリーグループでも様々な活動を展開しておりますが、本稿では熊本の事例をご紹介します。

サントリー九州熊本工場は、熊本県嘉島町に位置しております。嘉島町を含む阿蘇外輪山西麓から熊本平野およびその周囲の台地に広がる熊本地域は地下水に恵まれており、熊本地域の重要な社会基盤の一つとして、住民の生活や企業活動を支えています。この熊本地域において、サントリーでは水循環モデルを構築し、気候変動影響等を踏まえた将来予測によって、自社事業に対するリスク評価を行ってまいりました。一方、熊本地域では、新規の大規模な地下水利用の発生や、これまで実施してきた涵養施策の限界等の課題があり、水循環モデルを活用することで、熊本地域の地下水の持続性確保に向けた、これからの政策提案やモニタリングを軸とした今後の定常的な活動計画策定ができるのではないかと、といったアイデアが生まれました。そこで、熊本県や熊本大学嶋田名誉教授立ち会いの元、公益財団法人くまもと地下水財団とサントリーグローバルイノベーションセンター株式会社水科学研究所で共同研究を行いました。その結果、熊本地域の地下水の持続性確保には、水田への灌漑により発生した地下水涵養が重要であることが定量的に評価されました(図 4)。従来、熊本地域における地下水の持続性確保に向けた施策は、地下水の揚水量と涵養量のバランスを確保する、という考えの元で行われてきましたが、その前提条件として、農業等の土地利用を守ることの重要性も示されました。今後の政策等への反映が期

待されます。そして、この活動は、OECDの水ガバナンス原則に則った水課題解決の地域事例集にも掲載され、国際的にも認知度が高まりつつあります⁹⁾。

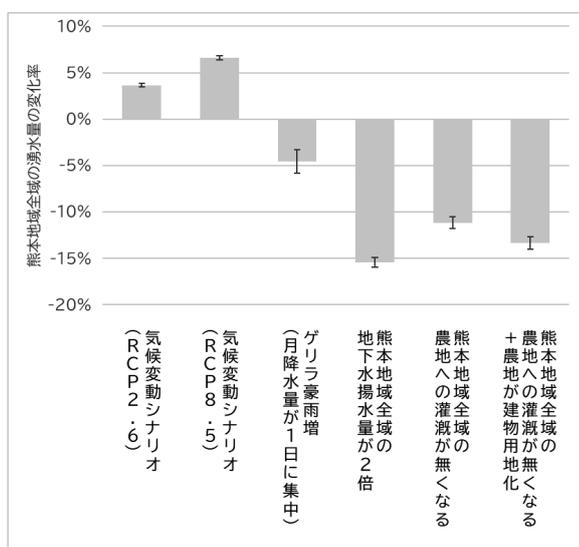


図4 熊本地域の湧水量変化率の将来予測結果⁸⁾
なお、本シミュレーションは、熊本地域全体の水利用・土地利用が変化する、という極端なシナリオでシミュレーションしていることに留意いただきたい。

6 まとめ

「水のサステナビリティの実現」に向けたサントリーグループの取り組みと題し、「地質と調査」誌の読者の皆様に関心度が高いと思われる内容を中心に紹介させていただきました。サイトスケールから流域スケールへ、また自社の内部で閉じた活動から地域に開かれた活動へと、水に対する取り組みは従来の境界を越えた活動が求められています。そして近年では、水循環を取り巻く生態系機能の劣化といった、また別の領域を含む活動も求められつつあります。このような従来の枠組みにとらわれない活動が求められる中で、サントリーグループでは水のサステナビリティ実現に向け、絶えず活動のブラッシュアップを行っております。また、このような活動を、多くの団体が実施できるよう支援する取り組みとして、新たに「Water Scape」という事業を開始しました。これは、サントリーの社内起業制度によって始まった新規事業で、水の利用者や管理を担う団体向けのコンサルティングサービスです。このような活動を通じ、社会全体が「水のサステナビリティ」を実現できるよう、貢献していきたいと考えております。

〈参考文献〉

- World Meteorological Organization: 「2021 The State of Climate Services」, 2021
- サントリーホールディングス株式会社: サントリーグループのサステナビリティ, 水資源
https://www.suntory.co.jp/company/csr/env_water/
(2025年2月5日現在)
- サントリーグローバルイノベーションセンター株式会社: 水科学研究所
<https://www.suntory.co.jp/sic/research/mizu/>
(2025年2月5日現在)
- UNESCO: 「International hydrological decade intergovernmental meeting of experts」, UNESCO/NS/188, 1964
- サントリーホールディングス株式会社: サントリーグループのサステナビリティ, サントリー天然水の森 (水源涵養/生物多様性の再生)
https://www.suntory.co.jp/company/csr/env_water/forest/
(2025年2月5日現在)
- Alliance for Water Stewardship: 「The AWS Standard Version 2.0 Guidance」, 2020
- WWF ジャパン: 「水リスクへの視点 自社拠点から流域へ・自社からサプライチェーンへ」, 2024
- Kawasaki, M., Sawada, M., Tawara, Y., Kobayashi, T., Fukuoka, Y., Tada, K., Shimada, J., Hosono, T., Katsuya, K., Shin-no, K., Koga, H., & Nakahori, Y.: 「Use of simulations to evaluate the balance between recharge and pumping to contribute to the development of policies for sustainable groundwater use in the Kumamoto area, southern Japan」 EGU General Assembly 2024, EGU24-10090, 2024
- OECD: 「A Handbook of What Works, Solutions for the Local Implementation of the OECD Principles on Water Governance」, pp. 70, 2024

秦野名水を守り育てる 地下水マネジメント

たに よしお*
谷 芳生*

K
ey Word

名水百選, 名水の里, 水循環, 地下水保全, マネジメント, ガバナンス

1 はじめに

私は、秦野市役所に事務職として採用されました。なのに、30年近くを環境関連部署で過ごし、そのうち地下水関連では20年を担当してきました。普通、役所の職員は、3年くらいで部署を異動していくイメージがあると思います。それは間違いではありません。しかし、中には、稀に私のような職員がいるのです。理由は、それぞれで、他で引き取ってくれる部署がないとか、プロジェクトが長引いているとか、あるいは、あいつに任せておけば悪くはしないだろうという信頼(?)のようなもの。私がどれに当てはまるのかは想像にお任せします。

何はともあれ、長年の経験値だけはあります。事務職であり、専門職でも専門家でもありませんが、地下水行政のプロフェッショナルであります。そんな経験も踏まえて、名水の里秦野の地下水マネジメントを紹介させていただきます。

2 秦野名水と名乗るには訳がある

今から約1800万年前に日本のはるか南の海で、丹沢山地のもととなる火山島が生まれました。火山島は、フィリピン海プレートの移動とともに約800~500万年前に本州に衝突し、さらに約100万年前の伊豆半島の衝突で丹沢山地が隆起しました。そして、その後、大磯丘陵が隆起し、秦野盆地が形成されました¹⁾。丹沢山地から運ばれた砂礫が盆地に堆積して扇状地を形成し、7億5千万トン(芦ノ湖の4倍)の地下水を湛える天然の水がめとなったのです。

この地の利を生かし、明治23年には、地下水を水源とする民間創設の曾屋水道が開設され、現在の

市営水道に継承されています。

まちなかには、水神講で守られ、使われている湧水地や、地元の活性化のために作られた水汲み場があります。

このように生活の中で使い、守られてきた地下水は、市民共有の財産として認識され、1985年(昭和60年)に名水百選「秦野盆地湧水群」として選定されています。

タイトルにある「秦野名水」とは、市民共有の財産として、先人たちから受け継いできた誇りと名水百選の地としての水の価値を表現するため、秦野地域に存在する地下水を水源とする水に関する統一した呼称です。

名水の里として、地形・地質、歴史的背景、使用実態、条例、施策といった要因があるからこそ「秦野名水」と言えるのです。



図1 名水百選「秦野盆地湧水群」弘法の清水, 秦野名水ロゴマーク

*秦野市環境産業部参事兼環境共生課長, 内閣官房水循環政策本部事務局・水循環アドバイザー

3 名水を脅かす3つの危機を乗り越えて

高度経済成長期の1960年代後半から、秦野市では、急激な人口増と企業誘致による水需要が高まりました。その結果、水道水源の地下水位低下、浅井戸の水枯れや湧水枯れ等の地下水障害が起こったのです。水道水源として必要な地下水を守るため、神奈川県温泉地学研究所に秦野盆地の地下水調査を委託し、調査で明らかになった水理地質構造と地域水循環の仕組みをもとに、地下水の人工涵養施策を検討しました。



図2 水田涵養

調査によって秦野地域の水循環は、市域内で涵養から湧出までのプロセスが成り立つ、恵まれた地形的条件であることが分かりました。このことは、地下水の過剰揚水は自らに降りかかり、地下水涵養をすれば自らに返ってくることの科学的な説明となり、地下水を市民共有の財産として位置づける根拠となったのです。また、人工涵養や水源林整備にかかる費用の財源として、地下水を揚水している企業と協定を締結し、地下水利用協力金をいただくための説得材料としても有効でした。

地下水は、その土地に付随するものとして、民法第207条の土地の所有権に基づき、土地所有者のものとしてされてきました。そのような不利な条件下にあっても、秦野市では、科学的知見と積極的な地下水保全施策によって、企業の理解を得て、地下水利用協力金制度を導入し、現在まで継続しています。

これらの事業展開のほか、条例や要綱の制定による規制強化も功を奏し、地下水位は徐々に安定し、一つ目の名水の量を脅かす危機を乗り越えました。

1989年2月、名水百選「秦野盆地湧水群」の代表的な「弘法の清水」の湧水が化学物質によって汚染されているとの報道がありました。当時、水道を引かずに井戸水で生活している世帯も多く、また、名水百選の選定から間もない時期でもあり、市民の

間に大きな衝撃と不安が走ったのです。

水質検査では、水道水質基準の約2倍の発がん性物質（テトラクロロエチレン）が検出され、すぐさま汚染の概況調査を実施するとともに、健康被害防止の措置が取られました。土壤汚染対策法が制定される10年以上前のことで、土壤・地下水汚染対策に取り組む事例は少なく、調査や浄化の技術は確立されていませんでした。そこで、独自に化学物質、水文学、地質学、法学、保健健康等の専門家を集め、地下水汚染対策審議会を設置しました。この審議会からの答申を受け、汚染の未然防止・汚染機構の解明・健康調査を実施し、さらに、汚染対策を推進するための条例を制定したのです。

国内初となる汚染原因者に浄化義務を負わせる「秦野市地下水汚染の防止及び浄化に関する条例」が1994年1月に施行され、46社が対象となり、すべてにおいて浄化事業が行われました。現在までに39社が浄化終了にこぎつけ、3社が浄化継続中、4社が経過観察となっています。

条例によって事業所内の汚染は浄化が進みましたが、汚染対策の発端となった「弘法の清水」の水質を改善するためには、複合汚染となった地下水の浄化が必須であります。そこで、市が主体となって、汚染地下水を揚水し、浄化した後、再び地下に戻す浄化手法を考案し、1998年から本格稼働しました。浄化装置の稼働から3年で「弘法の清水」の水質は環境基準を下回るようになりました。

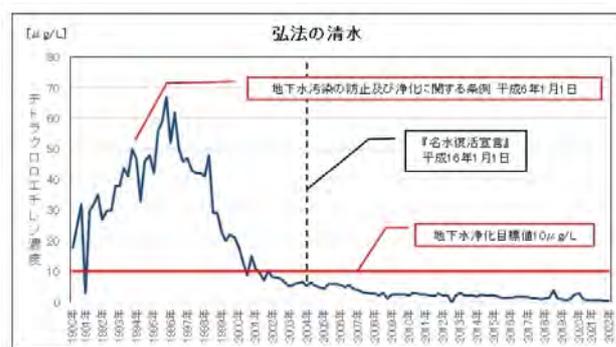


図3 「弘法の清水」水質グラフ

条例の施行から10年を経て、事業者と市の協働が実を結んで水質が改善したことを受け、2004年1月1日に「弘法の清水」において名水復活宣言をしました。

私は、汚染対策の最盛期には、隣の課でごみの減量資源化に取り組んでいたのですが、はたで見えて当時の職員の労働時間数は、かなりのブラックでした。こういった諸先輩たちの努力によって、秦野市の地下水汚染対策は成果を上げ、知名度も全国区

となったのです。そして、1999年に地下水担当に異動となって、一つの区切りとなる名水復活宣言に担当として関わり、今でも記録に使われる写真(図4)の中央(右)に写ることとなったのです。

こうして秦野名水の質を脅かす、二つ目の危機を乗り越えました。



図4 名水復活宣言(2004.1.1, 弘法の清水) before

三つ目の秦野名水の危機は、持続可能な秦野名水の利活用を守る条例の危機でした。

2011年12月に、新規井戸の原則禁止を規定している「秦野市地下水保全条例」により、新規の井戸設置を認められず、自費で水道を敷設したことによる損害賠償請求訴訟が提起されました。数回の口頭弁論、証人尋問を経て、2013年9月に第1審判決が出ました。結果は、秦野市が敗訴でした。

この裁判で私は初めて証人として、法廷の柵の内側に立ちました。それまでは、柵の外側で裁判を傍聴する立場でしたが、証人として尋問を受けるのは、全く違う世界です。事前に、相手側からの想定質問に対する受け答えやこちら側の質問内容等について、弁護士と密な打ち合わせをして証人尋問に臨みましたが、役所生活で一番緊張したことを覚えています。

証人尋問の印象が悪かったのかは分かりませんが、敗訴のままでは先人が築き守ってきた秦野名水が根底から崩れるおそれがありますので、控訴しました。控訴は一発勝負とも言われ、控訴理由書が重要になります。しかし、資料作成にあたり、縦割り行政を目の当たりにします。極端な言い方をすれば、四面楚歌状態。頼りになるのは、弁護士と過去につながりがあったコンサル等、外部の人たちでした。それでも、弁護士とともに、秦野市の地下水保全の歴史的背景、積極的な施策展開、市民・事業者の理解と協力、地形・地質的特徴等の市民共有の財産として保全してきた独自の地下水の公共性を強く訴え

る控訴理由書を作り上げました。

2014年1月に第2審(控訴審)の判決が出ました。結果は、逆転勝訴となり、第1審判決の敗訴分を取り消すものとなりました。

相手側は、上告手続きを取りましたが、2015年4月に上告棄却の決定が最高裁判所第二小法廷から下され、東京高等裁判所の判決が確定し、併せて条例の合憲性が認められました。

控訴審の判決文には、「秦野市地下水保全条例による井戸設置の規制は、公益的見地からの合理性を有し、条例制定権を有する市の合理的裁量を超えるものとは言えず、憲法に違反しないと解すべき。」と記されています。

こうして、訴訟があったことにより、図らずも、条例の合憲性と市民共有の財産としての地下水が認められました。しかし、個人的には、裁判は勝った側も後味の悪さが残ることが分かり、訴訟が起きないようにすることが一番大切だと痛感しました。

三つ目の条例の危機は乗り越えましたが、この教訓を踏まえ、持続可能な地下水の利活用に向け「秦野名水の利活用指針」を策定し、新規井戸設置許可の基準を定めて運用し、2023年には、条例施行後初めてとなる新規井戸設置の許可が下りました。

4 地下水総合保全管理計画

健全で持続可能な水循環の創造を目指し、「秦野市地下水総合保全管理計画」を策定しています。

計画では、「秦野名水の保全と利活用」、「安定的な水収支」、「安全な地下水」の3つの目標を掲げ、地下水のマネジメントと市民(秦野名水名人)との協働による施策を展開しています。



図5 秦野市地下水総合保全管理計画(2021.4)

2003年に第1期計画を策定したときは、地下水の量と質の保全が中心でしたが、2011年の改定では、水収支の安定と名水の復活宣言を受けて、市民共有の財産にふさわしい利活用を追加しました。

第3期となる2021年の改定では、情報技術の活用と新たな地質・水文データにより、地下水マネジメントの基礎となる情報が更新されました。1970年代の地下水調査で得られた基盤岩の深度はGL-100～200mでしたが、新たなボーリング調査によって、そこには箱根火山を由来とする火山灰(吉沢ローム層)の難透水層があり、基盤岩はさらに下層部にあることが判明したのです。これによって、秦野盆地の地下水盆(天然の水がめ)の容積が増え、地下水賦存量が従来の2億8千万tから7億5千万tとなりました²⁾。

これらの新たな地質・水文情報と地下水位・水質等のモニタリングデータを活用し、健全で持続可能な地下水の利活用のマネジメントを進めています。

また、これまでの行政主導型の施策から、市民・団体・事業者(ステークホルダー)との連携・協働を図る「秦野名水名人とともに」を施策の柱の一つに掲げました。秦野名水名人とは、使う・守る・育てる・伝える名人があり、人とは限らず地下水に関わる団体・事業者・行政・施策を名人としています。



図6 秦野名水名人講(2021.12)

秦野名水を伝える名人では、全5回の講座を受講した人を「秦野名水名人」に認定し、「秦野名水名人講」で活動してもらっています。行政からの情報発信は、一般に広まりにくいですが、市民からのSNSや口コミによる発信は、共感を得て広く拡散します。現在は、市のイベントやリーフレットの作成に協力してもらっていますが、今後は、独自の活動にも期待をしています。

5 まとめ

秦野市の地下水は、3つの危機を乗り越えて秦野

名水となりました。さらに、地道な基礎データの蓄積とともに近年の情報技術の進歩によって、地面の下にあって人目に付かない地下水の見える化が進んでいます。

こういった科学的な情報に基づき、地域課題を解決するための計画を策定します。そして、計画の施策を実行するために必要な法令や規制の整備をするためには、科学的知見による根拠と課題解決の必要性について、ステークホルダーである市民・事業者との合意形成が求められます。

秦野市の地下水マネジメントの歴史を辿ると、地下水・地質調査等の情報収集、地下水総合保全管理計画の策定、地下水保全条例の制定、そして秦野名水名人の取組み、というように多元的な主体(ステークホルダー)が連携して、地下水資源の管理や利用に関わる公共問題の解決を担うプロセスを実践していることが分かります。

これはまさに、地下水ガバナンスの具現化と言えるのではないのでしょうか。



図7 名水復活宣言20周年(2024.1.10, 弘法の清水) after

専門家でもない私が、地下水行政の一職員として取り組んできた仕事が、名水の里秦野と言うにふさわしいプロセスを歩んできたことは感慨深いものがあります。

都心から程近い名水百選の地。地下水を使ったおいしい水道水やまちなかの湧水など、生活とともにある名水の里秦野。露頭調査(おすすめは、「くずのはの広場」にある吉沢層の露頭)のついでにでも、ぜひ立ち寄ってみてください。

〈参考文献〉

- 1) 平塚市博物館：秋期特別展図録「かながわの大地―1億年の記憶―」, 2021.10
- 2) 秦野市：秦野市地下水総合保全管理計画, 2021.4

地下水にまつわる伝承や信仰

こうの ただし*
河野 忠*

Key Word 弘法水, 關伽水, 茶の湯水, 真名井, 美人水, 片目魚, 摩崖仏

1 人物由来の名水

日本各地には、伝説の湧水や井戸水が相当数存在する。その水質を調べてみると意外にも地形地質に関係する水が見出せる。

様々な伝説資料等から、人物毎にその数を調べてみると、圧倒的な数を誇るのが1600ヶ所以上ある弘法大師伝説の水「弘法水」である(河野, 2021)。2番目に多いのが陰陽師の安倍晴明にまつわる水で約70ヶ所, 以下日蓮にまつわる水が約50ヶ所など, 歴史上の有名な人物が上位を占める。また, 弘法水が日本全国で見られるのに対して, 他の伝説にまつわる水は, その人物の活躍した狭い地域内でしか見られない。比較的広範囲で見られる豊臣秀吉の「太閤水」でさえ, 京都から九州北部にかけて10ヶ所程度みられるだけである。弘法水をはじめ, 伝説の水は, その登場人物と深く関わって, その用途や水質などに特徴があることが明らかとなってきた。



図1 弘法水の分布

「日本各地を巡錫した大師が水の乏しい地のある家で水を請うたところ, わざわざ遠くから水を汲んできてくれたので, その御礼に杖で地面を突いたところ水が出た」。これが弘法水の伝説である。何故弘法大師だけが異常に多いのであろうか。弘法水には自然科学的に根拠を見いだすことができ, それを後世の高野聖らが弘法大師の霊力の現れとって, 広めた可能性が高い。その真偽は別として, 弘法大師伝説の水が日本全国に存在するという事は地理学的, 民俗学的に非常に興味深いことである。

弘法水(写真1)は北海道と沖縄を除く日本全国に分布するが, 水の豊富な日本海側と東海地方に少ない(図1, 表1)。県別にみると奈良, 和歌山, 群馬, 香川, 石川, 長野に多く, 弘法大師ゆかりの地や伝説, 民話の残る地域といえる。弘法水の分布は水不足の地域に多い溜池の分布ともよく一致している。また, 弘法水は平野にほとんど見られず, 丘陵地や山中の谷頭, 地形の変換点, 山頂などに多く分布している。



写真1 弘法井戸(埼玉県深谷市本郷)

*立正大学地球環境科学部・教授

表1 県別弘法水数

都道府県	数	都道府県	数	都道府県	数
北海道	0	石川県	62	岡山県	32
青森県	5	福井県	24	広島県	41
岩手県	27	山梨県	17	山口県	11
宮城県	26	長野県	48	徳島県	48
秋田県	9	岐阜県	22	香川県	69
山形県	69	静岡県	15	愛媛県	35
福島県	51	愛知県	37	高知県	27
茨城県	28	三重県	59	福岡県	5
栃木県	29	滋賀県	40	佐賀県	6
群馬県	100	京都府	45	長崎県	12
埼玉県	21	大阪府	46	熊本県	19
千葉県	33	兵庫県	31	大分県	21
東京都	19	奈良県	155	宮崎県	2
神奈川県	21	和歌山県	150	鹿児島県	15
新潟県	47	鳥取県	5	沖縄県	0
富山県	26	島根県	8		
				合計	1618

2025年1月20日現在

弘法水の湧出量は、ほとんどが1ℓ/秒以下であり、その半分以上は0.1ℓ/秒のごく小さな湧水であることがわかっている。これら小規模の湧水が1200年前から湧出しているとは考え難いことで、非常に興味ある湧水といえる。なお数ヶ所の弘法水では、潮汐に応じて湧出量や井戸の水位が変化する不思議な現象が見られる。

弘法水には、異常な水質（塩水井戸、白濁した水等）を示すものが知られているが、特に病気に効能の伝えられる水は、かなり特徴的な水質を示す。例えば皮膚病や胃腸病に効能が伝えられている弘法水は、硫酸イオンや硝酸イオン濃度が高く、眼病の水は、硝酸や塩化物イオン濃度が高く、pHが低い、などの特徴がある。一説に、万病や眼病に効能があると伝えられる弘法水には、ゲルマニウムやホウ酸が溶けているという。弘法水の他の効能、利用法には、関伽水・疔・火傷・不老長寿・安産・書道（硯水）・茶の湯などが知られ、やはり水質の異常な水が散見できる（図2）。

弘法水は湧出地点の特徴と湧出量が少ないことから、その用途は非常時の緊急用水源として利用される場合が圧倒的に多い。また独特な水質とプラシーボ効果から、病気に効く薬水・霊水として利用したり、空海が書道の三筆（空海・橘逸勢・嵯峨天皇）であることから、字が上手になるといわれる硯水として利用する例がみられた。

ところで、弘法水の中には約50ヶ所もの温泉が知られている。その中に塩水の温泉があり、すべて

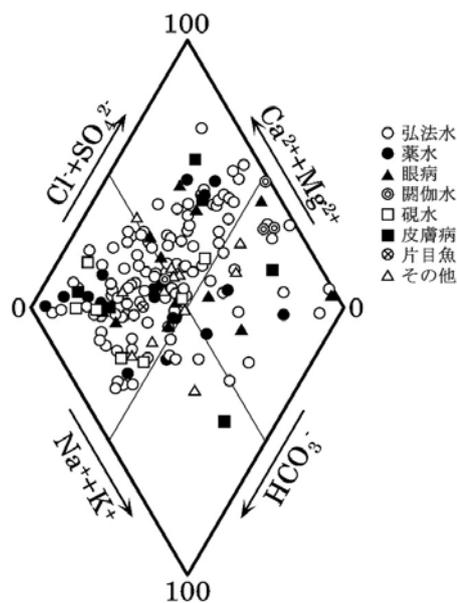


図2 弘法水のキーダイアグラム
用途により異常な水質がみられる

が皮膚病に効能のある弘法温泉となっている。温泉科学的にみると、塩水の温泉は殺菌効果が期待できるので、皮膚病に効能があることが知られている。先人たちはこのような効能に弘法伝説をすり合わせて後世の人々に伝えたのだろう。塩水井戸については後述する。

図2からほとんどの関伽水が硫酸イオンの多い偏った水質を示していることが判る。関伽水とは神や仏に捧げる水で、見た目が清浄で腐りにくい水が適当であると考えられる。

以上のことから、弘法水は大師自身が掘り当てたと考えるよりは、水量は僅かながらも水の乏しい地域に数百年も湧出し続け、淘汰されずに残った湧水・井戸水と考えるべきである。一方、無数の湧水、地下水の中で特殊な水質を持ち合わせ、疾病や健康増進等として利用できたものは、当時の衛生状態や医療技術レベルから薬水・霊水として用いられるようになり、それが大師の水神信仰とすり合わされて、弘法水が成立したのだろう。したがって弘法水の本質とは鉱泉であると考えられる。

弘法水をはじめとした伝説の水は、その登場人物と深く関わって、その用途や水質などに地質や地形などの地域性が見られることが分かってきた。中でも弘法水は日本を代表する伝説の水であり、一方で非常に特殊な存在でもあるといえる。

2 関伽水

埼玉県嵐山町に「関伽井の清水」（写真2）という名水がある。かなり深い井戸状の湧水であるが、

底までよく澄んだ水で満たされている。この水を分析すると硫酸イオン濃度が高く、腐りにくい水であると考えられる。弘法水をはじめとした関伽水の水質を分析すると硫酸イオンが多量に含まれている場合が多い(図2)。多量の硫酸イオンが含まれる水は火山周辺や地滑り地帯である。先人たちは経験的に清浄で、腐りにくい水を関伽水として用いたのであろう。

関伽とは体や心の汚れを表し、それを洗い流すことから関伽水となったといわれている(高村, 1996)。



写真2 関伽井の清水(埼玉県嵐山町)

▼3 茶の湯水の水質

日本各地に茶の湯水が伝えられているが、代表的なものは豊臣秀吉由来の太閤水である。太閤水は、京都や九州北部に多く伝えられるが、中でも一番有名な太閤水は1587年京都で行われた秀吉主宰の大茶会で使用された北野天満宮にある茶の湯水(写真3)である。今ではコンクリートの蓋がされ井戸水の存在は確認できないが、周辺の地下水位の低下はあまり認められない。北野天満宮周辺には、他にも大茶会で利用されたといわれている三斎井戸や千利休にまつわる10ヶ所近くの井戸が存在している。



写真3 太閤井戸(京都市北野天満宮)

このような茶の湯に利用された名水の水質を調べてみると

①蒸留水に近い地下水

②ミネラルバランスの良い軟水

の二つに分類され、堆積岩地域に多く、火山地域の溶結凝灰岩以外にはほとんど見られないことが分かっている(河野, 2012)。茶の湯を嗜んでいる方に聞いてみると、ミネラルバランスの良い軟水を用いるのは常識として、蒸留水を好んで用いる人もいたとのことであった。

▼4 酒造の水

(1) 真名井

「真名井」は神代の時代から水質の良い水として利用されてきた湧水であり、その中で「天の真名井」は『古事記』、『日本書紀』において、高天原にある神聖な井戸を意味し神聖な水につけられる最高位の敬称であると伝えられている。

日本各地に真名井は存在するが、その水質を調べてみると、その多くがミネラル豊富でバランスの良い硬水が選ばれていた。特に天の真名井はミネラル分が多く、硬度が高い傾向があった(阿部, 2024)。真名井の水でお神酒なども醸造したと考えられるが、その際、硬水を用いると酵母が活発になり酒を醸造しやすいことが知られている。

酒の神様を祀る京都の松尾神社にある亀の水(写真4)は酒樽の中に入れるとおいしいお酒ができるといわれていて、日本中の酒造会社が汲みに来る。水質を調べてみると日本ではごく稀にしか見られないMg>Ca濃度を示す水であった。兵庫県灘の宮水発見物語でも知られているように、酒造りには硬水が適している。その後の技術向上により、軟水でも美味しい日本酒が作られるようになり、今日に至っている。つまり、真名井は酒造りに適していた湧水や井戸水が選ばれていると考えるのが妥当であり、



写真4 亀の井戸(京都市松尾神社)

先人たちの水の味に対する感覚の素晴らしさを物語っている。

(2) 宮水

酒造に用いられた水で代表的なものは宮水であろう。宮水とは、今の兵庫県西宮市の西宮神社の南東側一帯から湧出する日本酒造りに適していると江戸時代後期から知られている水のことを指し、灘五郷の酒造に欠かせない名水として知られる。その発見物語は次のようなものである。

「宮水」は、江戸時代末期。灘の老舗「櫻正宗」の6代目当主、山邑太左衛門氏が見出した。当時、山邑家は西宮郷（現西宮市）と魚崎郷（現神戸市東灘区）に蔵を構えていたが、同じ工程で造っても西宮蔵の酒のほうが美味しく、その秘密を調べるうちに、仕込み水の水質が原因ではないかと考えた。試しに西宮蔵の「梅ノ木井戸」の水を魚崎蔵でも用いたところ、同様に美味しい酒ができた。これが宮水の起源である（大阪読売新聞阪神支局編、1966）。宮水は貝殻を含んだ海生層を帯水層とするミネラル分が豊富な硬水で、とくに酵母の働きを活発にするリンやカリウム、カルシウムが多く含まれている。一方で、酒の色や香りを悪くする鉄分は少なく、酒造りに最適なミネラルバランスとなっている。

5 塩水井戸

内陸にもかかわらず塩水が湧出する井戸（写真5）が日本各地に散在し、秩父盆地等に古くから知られている塩水鉱泉では、加温して皮膚病に効能のある温泉として利用されている。また塩水井戸はみそ汁や塩せんべい等の料理や、採塩して漬物にも利用された。米作りでは、種苗で種もみを選別する際、塩水選を行う。これは塩水の比重を利用して中身のない種もみが沈まないことを巧みに利用している。塩の入手が困難な山間部の人々にとって塩水井戸はさぞ重宝したことであろう。

この塩水井戸、実は2種類あることが判ってきた



写真5 弘法の塩水井戸（千葉県館山市神余）
海水の2倍以上の塩分濃度がある

（安原ほか、2006）。長年にわたり塩水は化石海水であるというのが定説であったが、一部の塩水井戸は深層流体のスラブ水に由来している。

6 安産の水・乳水

乳の出の良くなる水や、お産の軽くなる水、悪阻の軽くなる水というのは日本全国に散見できる。小豆島にある「大師の御水」（写真6）という名水を訪れた際、たまたま訪れていた妊婦さんに話を聞いてみると、この水を飲むと悪阻が軽くなって安産になるとのことであった。

安産の水を水質分析してみると、その多くで硝酸イオンが高濃度に検出された（河野、2021）。一般的に硝酸イオンによる汚染は肥料であることが多いが、安産の水の多くは人為的な汚染は考え難い場所にあった。硝酸イオン濃度の高い水は、幼児にメトヘモグロビン血症、いわゆるブルーベビーシンドロームを発症させることが知られている。血液中の赤血球が硝酸イオンと結合してしまい、酸素を取り入れることができなくなり窒息死してしまう病気である。妊婦が硝酸イオン濃度の高い水を大量に摂取すると、胎児の酸素濃度が減少し危険であると思うのだが、ぜひとも医学分野での研究を期待したい。

一方で、乳水と呼ばれる湧水が日本各地に存在する（奥、2022）。水質に特徴は見出していないが、乳飲み子を健やかに育てたいという親の思いと信仰が日本中に広まったもので、次に述べるプラシーボ効果とかかわりがあると考えられる。



写真6 大師の御水（香川県小豆島町）

こういった、薬水と呼ばれる伝説の水は本当に病気等に効能があるのだろうか。その一つの解答がプラシーボ効果である。池見（1963）によると臨床医学において薬物の効力を検定する場合に、対照薬として、またときには暗示的効果を期待して、薬理作用のない物質を用いる。この作用のない物質を偽薬

と呼んでいる。偽薬は、薬効を検討する薬物と外観的な形、大きさ、色をはじめ、味、匂いなども同じように作られている。この薬理作用によらない暗示的治癒効果をプラシーボ効果といい、精神疾患、リウマチ疾患、各種の痛み、高血圧、消化性疾患では強く認められ、有名なフランスの「ルルドの泉」の効能も同様であろうと述べている。

▼7 美人水

大分県臼杵市深田の「化粧井戸」（写真7）は痣がとれ美人になるという伝説があり、水は白濁している。この水で手を洗うと、不思議なことに肌がすべすべになる。また、島根県松江市にある「化粧井戸」も、臼杵の化粧井戸同様に白濁している。そこで、この二つの湧水の水質を分析したところ、シリカ濃度が高いこと以外は目立った点は無かったが、この水を濾過するとすぐにフィルターが目詰まりを起こした。そこで、目詰まりした物質を分析してみるとカオリナイトとモンモリロナイトが確認できた（山本，2023）。どちらも化粧品の基本成分であり、この粘土分が泥パックと同じ肌の保湿効果があると考えれば、白濁している化粧水は、経験的に知られていた美容法の一つであったのだろう。



写真7 化粧の井戸（大分県臼杵市）

▼8 片目魚伝説

少し変わった伝説を紹介しよう。日本各地の池や河川、井戸に100ヶ所前後片目の魚が生息するという。その伝説は、魚に意地悪した、討取られた武士の怨念、片面だけ焼いた魚を助けた、等様々である。現実に片目魚は生息し、下記のような原因が考えられる。

- ① たまたま片目魚が釣れたが、そのまま放したので、片目魚が多くなった。
- ② 川岸に放射性の岩があり、魚が上流に向かって泳

ぐことから、片目だけ潰れた。

- ③ 窒素ガス病によって片目になった。
- ④ 栄養失調の魚。

①は淘汰によるものと考えられるし、②は日本では鳥取県の人形峠で可能性がある。③については、松江ほか（1953）が、養魚における溶存窒素ガス量は重要で、病気になって片目が脱落することを述べている。④について中川（2005）は、日本各地にある30ほどの片目魚伝説のある湖沼の水質を調べた、その結果、ほぼ蒸留水のような水質を示す湖沼がほとんどで、T-N、T-Pは検出できなかったことを報告している。

▼9 摩崖仏に存在する湧水の謎

最後に、異なる観点から地下水と地質との関係を見ていきたい。

大分県臼杵市にある国宝「臼杵石仏」は日本を代表する磨崖仏である。観光客は国宝の古蘭石仏（写真8）見たさに足早に石仏に向かうが、その前に「観音の水」（写真9）と呼ばれる名水があることに気づく人は少ない。さらに石仏群から少し奥に歩くと、真名野長者に由来する美人水で紹介した「化粧の井戸」という名水がある。

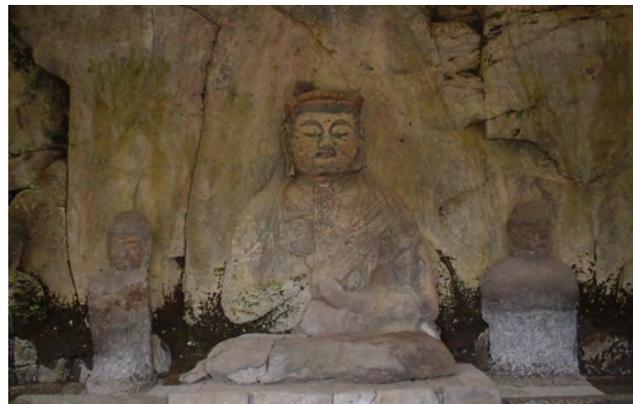


写真8 古園石仏の大日如来（大分県臼杵市深田）



写真9 観音の井戸（大分県臼杵市深田）

大分県内の湧水を求めて探し回ると、多くの磨崖仏に出会うことになる。長い歴史の中で摩滅してしまい風化している磨崖仏が多いのだが、大分県内だけで53ヶ所の石仏を訪れたところ、そのほとんどすべてに湧水が存在した。これはいったい何を意味しているのだろうか。

一般的に磨崖仏とは石仏の一種であり、自然の懸崖に露出した岩や岩壁に仏像を彫刻したものをいうが、仏像に限らず梵字などが刻まれた「種子磨崖」、南無阿弥陀仏の六字名号が刻まれた「名号磨崖」、五輪塔などが刻まれた「磨崖」や石窟内の壁に刻まれた石窟仏などを含めた総称として用いられている。

磨崖仏は、東北地方の福島県や近畿地方の滋賀県・奈良県・京都府、九州地方、特に大分県に偏在する。「大分県は磨崖仏の宝庫である」といわれる磨崖仏密集地域であり、現在もその所在が知られるものだけでも83か所、総数約400体にのぼる尊像が確認され、一説に全国総数の8割を占めているといわれている。

大分県における磨崖仏の分布を図3に示す。未調査の磨崖仏がまだ相当数あるものの、そのほとんどに湧水が存在する。湧水の存在する割合は、調査済みのものだけを対象とすると、94%にも達する(河野, 2006)。



図3 大分県の磨崖仏分布

山路(2004)は、磨崖仏が掘られている溶結凝灰岩は水によって風化されやすい特徴を持っているので、文化財保護の観点から見て湧水の存在は好ましくない、と述べている。にもかかわらず大分県の大野川流域に多数の磨崖仏が見られるのは何故だろう。

磨崖仏は自然の岩石を素材としているため、その造形が石材からくる材質的制約を受ける。特に岩質の硬さや、キメの細かさによって掘られる仏像も異なってくる。大分県中南部に所在する磨崖仏の多く

は、阿蘇火山灰の堆積層である溶結凝灰岩の緻密で柔らかい岩肌に刻まれており、もろく割れやすいという欠点がある。溶結凝灰岩はカルデラ式火山に特有の地質にみられ、九州では阿蘇火山や桜島火山が有名であり、かつては建築石や石橋・石仏などに盛んに用いられた。

大分県、特に大野川流域には9万年前に噴火した阿蘇山の噴出物である溶結凝灰岩が顕著に堆積している。一般的に表層の弱溶結凝灰岩は空隙が大きく水が浸潤し易いために、非常によい帯水層となって豊富な地下水を供給し、深い部分の強溶結凝灰岩は難透水層となって地下水を受け止める。したがって、凝灰岩のある地域には地下水や湧水が豊富に存在するのは自明のことであり、湧出地点の上にある凝灰岩層が比較的柔らかく磨崖仏を掘りやすい地層であることを石工は知っていたのであろう(図4)。

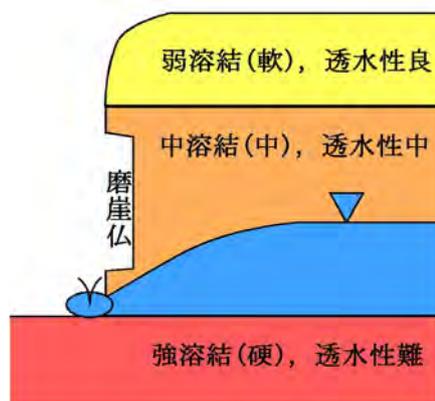


図4 磨崖仏がある地層の断面

(参考文献)

- 阿部みう(2024):御井・真名井の研究. 立正大学地球環境科学部卒業論文.
- 池見西次郎(1963):『心療内科』. 中公新書.
- 大阪読売新聞社阪神支局編(1966):『宮水物語』. 中外書房.
- 奥喜久子(2022):日本の乳信仰リスト. 助産雑誌, Vol.76, No.6, 666-676.
- 河野 忠(2006):「磨崖仏に湧水が存在する謎を解く」. 辻野功編(2006):『大分学・大分楽Ⅲ』明石書店.(分担執筆)
- 河野 忠(2012):歴史上の人物にまつわる茶の湯水の分布とその水質について, 繊維学会誌, 68(11), 357-360.
- 河野 忠(2021):『弘法水の事典』. 朝倉書店.
- 高村弘毅(1996):地球上の水についての思考史. 地下水技術, Vol.38, No.2, 1-5.
- 中川貴了(2005):片目魚の研究. 日本文理大学工学部卒業論文.
- 松江吉行・江草周三・佐伯有常(1953):湧水の溶存窒素ガス含有量. 日本水産学会誌, 19(4), 439-444.
- 安原正也・稲村明彦・高橋正明・林 武司・河野 忠(2006):内陸浅層部における高Cl濃度地下水の分布とその地球化学的特徴. 第16回環境地質学シンポジウム論文集, 157-162.
- 山路康弘(2004):『豊後磨崖仏の文化財学的研究—主としてボーリング調査からのアプローチ—』. 別府大学学位論文.
- 山本慎平(2023):化粧井戸の水質と白濁成分について. 立正大学地球環境科学部卒業論文.

トレーサーにより 地下水の履歴を読み解く

つじむら まき
辻村 真貴*

K
ey Word

地下水流動, 地下水の起源, 流動経路, 滞留時間, 地下水涵養・流出,
トレーサー, 同位体, 地下水の履歴

1 はじめに

地下水は流動している。したがって、現時点においてある場所で生じている地下水問題は、地下水流動の上流側において、過去に発生した事象が原因になっている。また、今ある場所で生じている地下水問題は、将来地下水流動の下流側に問題を生じさせる可能性がある。このように地下水問題を解決するためには、目の前にある水が、どこから、どこを、どの位の時間をかけて流動してきたか、すなわち、地下水の起源（出身）、経路（経歴）、滞留時間（年齢）という地下水流動の履歴情報を把握する必要がある。

地下水への水のインプットを涵養、地下水からの水のアウトプットを流出と言い、地下水の涵養-流

動-流出を一連の水循環プロセスの一環として捉えることが、地下水流動を理解する上での基本である。図1は、様々な地下水流動のあり方を模式的に示したものである。地表面に近い比較的浅い帯水層中を流動する地下水は、地形に従い相対的に標高の高いところで涵養され、低いところで流出する。主に涵養が生ずるところ（涵養域）が、地下水の起源に相当する。涵養域では鉛直下向き方向の地下水流動が卓越するが、流出域では反対に上向き方向の流動が卓越する。これが、経路である。さらに、涵養が生じてから流出、あるいは地下水・湧水として採水されるまでの時間を滞留時間、または通過時間という¹⁾。

一般に、地下水流動を把握または予想するためには、1) 観測井や既存井戸により地下水の水理水頭

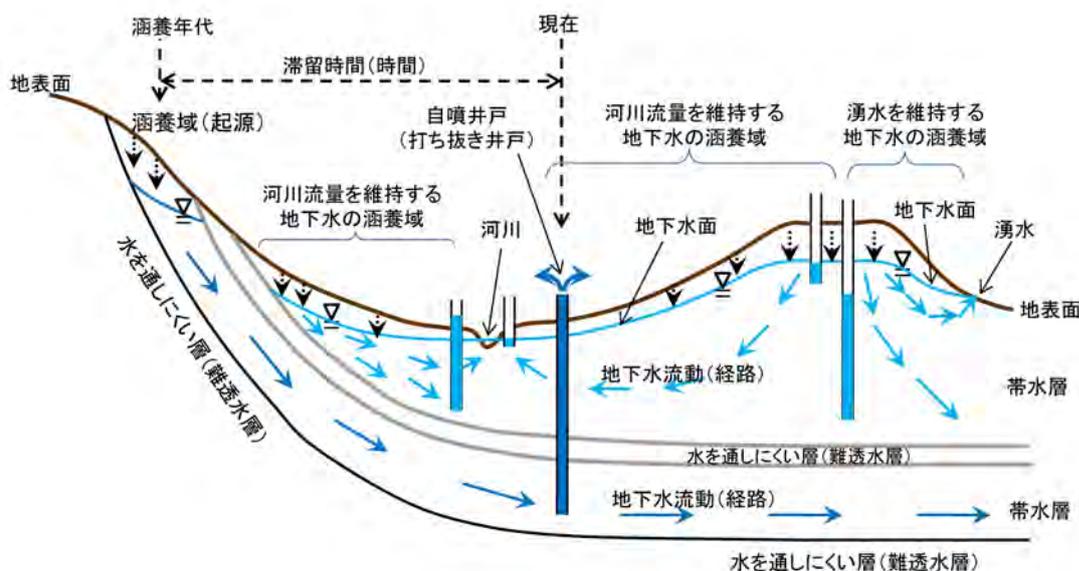


図1 地下水流動を、湧水、河川との関係とともに水循環プロセスの一環として示した模式図。実線の矢印は地下水の流動方向（経路）を、点線の矢印は地下水への涵養を示す。

*筑波大学生命環境系教授 学際サイエンス・デザイン専門学群（マレーシア校）学群長

の空間分布を明らかにする、2) 一定の仮定と既存データをもとに数値モデルにより地下水流動を再現する、そして3) 地下水に含まれる同位体や溶存成分等のトレーサーの空間分布・時間変化から再現する等の方法が用いられる。1) は任意の時、任意の地点における点のデータを積算し解析していくのに対し、3) は時間と空間が積算されたデータから点の情報を見通していく。すなわち、1) は微分情報、3) は積分情報の解析といえることができる。地下水流動研究には、1) から3) の手法を統合することが有用であるが、とくに3) は地下水の履歴情報を解析することから、地下水問題の理解に不可欠である。

さらに地下水は、流動プロセスとそれに伴う地中の生物地球化学プロセスにより、無機・有機溶存成分等様々な“質”を変化させる。すなわち、こうした“動き”と“質”に関する情報を蓄積・変化させながら地下水は流動している。

このように水が大気中や地中などを循環し、流動している中で、水に含まれるイオンや水を構成する分子も動いており、これらの成分等を追跡することにより、地下水流動プロセスを理解することが可能になる。こうした成分等を、水のトレーサーとよび、トレーサーの分析を行うことによって、地下水の履歴情報を、評価することができる。

図2に示すように、地下水は、数ヶ月から数10万年の時間スケール、および地点から1000 kmの空間スケールにおいて流動している。トレーサーは、広範な時空間にまたがる地下水の流動履歴を読み解くツールである。

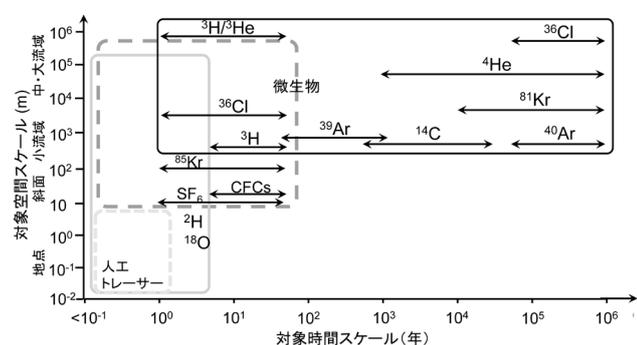


図2 地下水流動に関わる様々なトレーサーを対象時間スケールと対象空間スケールにより整理した模式図(馬原, 2009²⁾; Sprenger et al., 2019³⁾; Sakakibara, 2018⁴⁾により作成)

2 水の空間情報

図1において説明したように、地下水がどこで、どのような水により涵養されたかについては、地下水の起源と経路に関わる空間的情報をもつトレーサーが必要とされる。地下水の起源と経路評価に最もよく使われる安定同位体が、質量数2の重水素(^2H , またはD)と、質量数18の酸素18(^{18}O)である。これらの同位体の存在度は、自然界に多く存在する ^1H , ^{16}O に対する同位体比、すなわち $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ として、また通常、試料(Sample)の同位体比は海水の同位体比からの差として千分率で表され、 δ 値とよばれる¹⁾。

蒸発や凝結などが生ずる際には、水分子の拡散速度の差により、同位体比が変化する。海洋で蒸発した水蒸気が、少しずつ凝結して雨を降らせながら、内陸の標高の高い所へと運ばれていく様子を図3に模式的に示した。水蒸気が凝結して雨を降らせる場合、相対的に同位体比の高い(重い)水から降らせていく。その結果、水蒸気および降水とも、海洋に近く標高の低い場所ほど相対的に同位体比が高く(重く)、反対により内陸で標高の高い所ほど、同位体比が低い(軽い)という特徴を示す(図3)。

図4は、上述の特徴を利用し、筑波山の湧水において主たる涵養標高と涵養から流出までの地下水の主な流動経路を地図上に示したものである⁵⁾。経路については、地形・地質条件も参考にしている。山頂付近において涵養された地下水が中腹において湧出する様子や、中腹において涵養された地下水が山麓において湧出する特徴がみられる。このように条件を整えば、安定同位体比の空間分布から、湧水、地下水の起源、流動経路を推定・評価することが可能である。

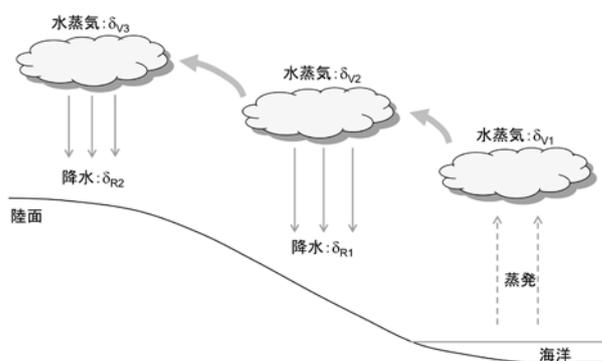


図3 海洋から内陸に至る、水蒸気と降水の同位体比の変動を示す模式図。 δ_v は水蒸気同位体比を、 δ_R は降水同位体比を示しており、海岸から内陸へ、あるいは低標高から高標高になるにしたがい、 $\delta_{v1} > \delta_{v2} > \delta_{v3}$ 、また $\delta_{R1} > \delta_{R2}$ となる。

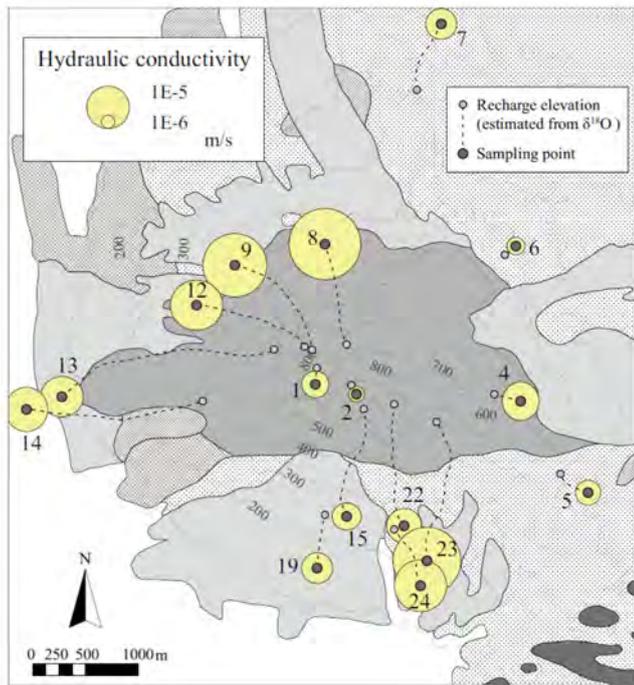


図4 酸素18安定同位体比を用い、地形・地質等を考慮して推定された、筑波山山麓湧水における涵養標高と地下水の主な流動経路。円の直径は、地下水流動に係る帯水層の相対的な透水性を示す。

3 水の時間情報

水循環において、ある時間変動特性をもって分布する物質をトレーサーとして用いることにより水の平均滞留時間を推定することが可能である。図5に、主に80年程度以下の比較的若い平均滞留時間推定に用いられるトレーサーにおける濃度の時間変化を示した。これらのトレーサーは、それ自体が時間情報を有するという特徴がある⁶⁾。塩素36 (^{36}Cl) や水素3 (^3H) は、1950年代から70年代にかけ北半球を中心に行われた熱核爆発実験により降水中の濃度が上昇し、1962年に観測されたピーク濃度を追跡することにより、地下水や土壌水における平均滞留時間の推定が行われた。現在では、降水中の ^3H 濃度は天然レベルまで低下しているため、12.3年の半減期をもつことを利用し、数年から10数年までの平均滞留時間を評価することも行われている⁷⁾。

一方、大気中のフロン類(CFCs)、六フッ化硫黄(SF_6)濃度を用い、50年程度以下の平均滞留時間を推定する方法は近年では広く用いられている⁸⁾。大気中の SF_6 濃度は1960年代以降単調に上昇しており、湧水、地下水中の濃度を大気中のそれに換算し過去の大気濃度と対照させることにより、平均滞留時間を評価し得る。

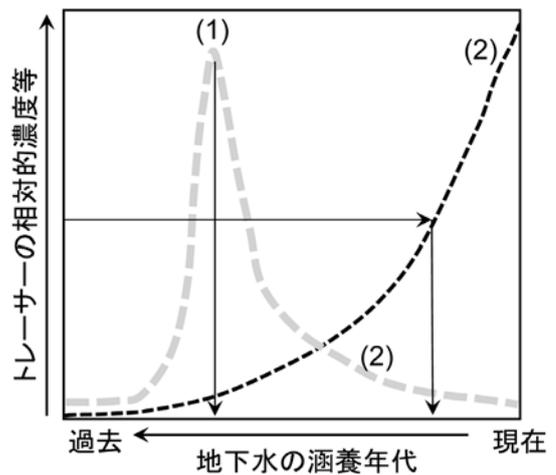


図5 比較的若い地下水の平均滞留時間を評価するために利用されるトレーサーの時間変化の模式図。(1)濃度等のピークを利用するもの(^3H , ^{36}Cl)、(2)濃度等の減衰を利用するもの(^3H , ^{36}Cl)、(3)濃度等の上昇を利用するもの(フロン類CFCs, 六フッ化硫黄 SF_6 , ^{85}Kr)

図6には、筑波山においてフロン類を用い、湧水の平均滞留時間を評価した結果を空間分布として示している⁵⁾。大気中のフロン類濃度は、1990年代をピークに以降低下傾向にあるため、また比較的地中の浅い部分を流動してきた湧水の場合、大気との接触が懸念されるため、これらの効果を考慮するため一部補正を行っている。山頂から斜面上部においては、数年から10年程度の平均滞留時間を示す湧水が多くみられる。また中腹付近においては、22年から27年程度の平均滞留時間を、さらに山麓部では40年を超える平均滞留時間を示す湧水が存在する。図3と4を比較参照することにより、筑波山の湧水における起源、流動経路、時間に関する履歴を理解することが可能である。

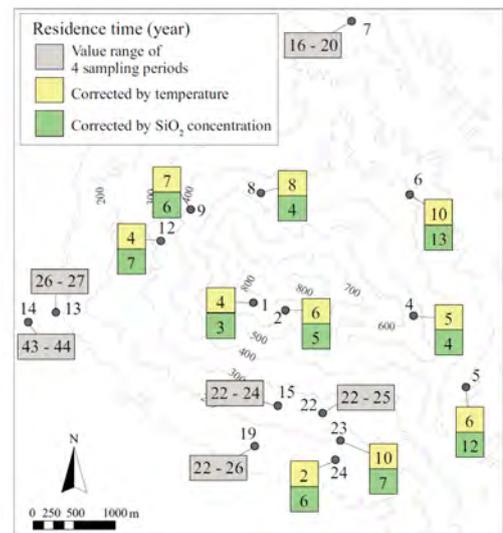


図6 筑波山においてCFCsにより推定された湧水の平均滞留時間。山頂から斜面上部の湧水については、大気との接触の影響や、大気中のCFCs濃度が1990年代以降低下していることを考慮し、補正している。

また、 ^2H や ^{18}O は、それ自体は時間情報を有しないが、一般に流域へのインプットである降水中の安定同位体比の変化に比べ、アウトプットである湧水や流出水におけるそれがきわめて小さいことを利用し、流域内部の水の平均通過時間を推定することも行われる。通常この手法では、概ね3年程度以下の平均通過時間が評価される。

4 微生物トレーサーの可能性

地下水中の微生物における量や微生物 DNA の群集構成等、微生物の動態が地下水流動に関する情報を含んでいる可能性が示唆されている⁹⁾。地下水流動の理解に一般的に用いられるトレーサーは、異なる起源水の混合の結果として平均化された地下水流動プロセスに関する情報を提供する。これに対し、微生物 DNA は混合以前の起源水における情報が保存されるものと考えられる。

これまでに、国内外の山地、沖積平野等の地下水、湧水を対象にした微生物 DNA の解析がいくつか行われ、平均滞留時間が長い地下水・湧水ほど全菌数が少なくなる傾向、また森林小流域における観測結果などから、降雨流出直後と無降雨時とでは地下水・湧水の全菌数、および微生物 DNA の群集構成に顕著な違いがみられること等が報告されている。しかしながら、未だフィールドスケールにおけるデータが少ないことが現状である。今後、地下水・湧水における微生物に関する量と群集構成に関する情報が、多様な場の条件の下で蓄積され、“微生物トレーサー”が地下水流動に係る履歴情報を読み解く重要な手法として位置付けられるようになることが期待される¹⁰⁾。

〈参考文献〉

- 1) 山中 勤・辻村真貴：「滞留時間に関する諸概念と用語法」水文・水資源学会誌, 33, 156-163, 2020
- 2) 馬原保典：「地下水年代の測定」地下水学会誌, 51, 1, 55-59, 2009
- 3) Sprenger, M. et al., 「The demographics of water: A review of water ages in the critical zone」Review of Geophysics, 57, 800-834, 2019
- 4) Sakakibara, K.: 「Age dating of rainfall-runoff water with Sulfur Hexafluoride and discharge processes in a forested headwater catchment」Thesis for the Doctor of Philosophy in Environmental Studies, the Graduate School of Life and Environmental Sciences, the University of Tsukuba, 157p., 2018
- 5) 松本卓大「山地流域におけるフロン類を用いた湧水・地下水の滞留時間の推定とそのモデル化」筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻修士（環境科学）学位論文, 94p., 2010

- 6) 浅井和由・辻村真貴：「トレーサーを用いた若い地下水の年代推定法—火山地域の湧水への CFCs 年代推定法の適用—」日本水文科学会誌, 39, 67-78, 2010
- 7) Morgenstern, U. et al.: 「Dating of streamwater using tritium in a post nuclear bomb pulse world: continuous variation of transit time with streamflow」Hydrology and Earth System Sciences, 14, 2289-2301, 2010
- 8) 榑原厚一・辻村真貴・浅井和由「六フッ化硫黄 (SF6) を用いた地下水の滞留時間推定における課題と展望」地下水学会誌, 59, 87-103, 2017
- 9) Sugiyama, A. et al. 「Groundwater flow system and microbial dynamics of groundwater in a headwater catchment」Journal of Hydrology, 624, 129881, 2023
- 10) 谷口真人・川端淳一・小野寺真一・辻村真貴編：「地下水の事典」, 朝倉書店, 2024.10

地下水の資源特性と ガバナンスの動向

えんどう たかひろ
遠藤 崇浩*

K
ey Word

地下水, 共有資源, ガバナンス, 水循環基本法, 水循環基本計画,
流域水循環計画, 長野県安曇野市

1 はじめに

2021年6月に「水循環基本法の一部を改正する法律」が公布された。この改正により水循環基本法(2014年成立)に「地下水の適正な保全及び利用」(第16条の2)という項目が新たに加えられ、「地下水の適正な保全及び利用に関する施策」の推進が国、地方公共団体、事業者、国民の努力義務であることが明記された¹⁾。この改正は、地下水分野における多様な主体の連携、すなわち地下水ガバナンスの推進を基礎づけるものである。また日本地下水学会内に「地下水ガバナンス等調査・研究グループ」(2017年～2020年)が設置され、概念の精緻化や事例の収集が試みられた²⁾。このように地下水ガバナンスは実務家・研究者双方の関心を集めている。本稿はこうした動きを背景に地下水の資源特性、地下水ガバナンスの定義、国内の取り組み事例を概説する。なお地下水ガバナンスは行政実務家の間ではしばしば地下水マネジメントと称される。本稿では地下水ガバナンスという用語を用いる。

2 地下水の資源特性

地下水の資源特性として排除不可能性と競合性が挙げられる。前者は所有権が不明確で資源へのアクセス制御が困難であることを意味する。地下水は流動性のある資源で所有権の設定が技術的に難しい。そのため新規利用者に対する参入障壁を立てにくい。他方、競合性は誰かがその資源を消費すると他の人の消費可能性が減る性質を指す。ある利用者が地下水を採取すれば別な利用者が利用できる地下水量はその分だけ目減りする。こうした二つの特性は不特定多数の人が地下水にアクセスする事態を招く

ことになり、その結果、地下水の量の減少(地下水の過剰利用)や質の低下(地下水汚染)、いわゆる共有地の悲劇を引き起こす^{3) 4)}。

地下水は地表水と比べて管理が困難とされているが、その背後には地下水がもつその他の特性が関わっている。図1は地下水の資源特性と管理の関係を整理したものである^{5) 6) 7) 8) 9) 10) 11)}。地下水は地下を流れるため目に見えず、その分布境界は必ずしも明確ではない。このため地表水に比べるとデータ収集が困難であり地図化しにくい。賦存量がわからなければ現行の資源採取量が将来にわたって維持できるかどうか判断できない。

こうした自然特性だけでなく、人間の資源利用と関わる社会特性もある。地下水は面状に分布し、小型電気ポンプなど小規模施設で採取可能であるため、利用者が分散しやすい。しかも個人、企業、市町村といった多様な主体が同じ地下水を利用している可能性もある。こうした利用者の存在は過剰採取や汚染防止に向けた取り締まりを困難にする。

流速の遅さや資源の一体性はさらに事態を複雑化させる恐れがある。流速が遅ければ過剰利用や汚染が顕在化するまでに時間がかかるため早期対策が難しく、また対策を取ったとしても効果が明確になるまで時間を要する。自治体の職員や首長の任期内で効果が認められない場合、長期的な保全対策の誘因が削がれてしまう。また地下水は地表水と物理的に接続されていることが多い。そのため地下水の過剰利用や汚染が遠く離れた下流の地表水の流量を減らしたり、その水質を悪化させたりする可能性もある。

*大阪公立大学現代システム科学研究科

3 地下水ガバナンスとは何か

ガバナンスとは「民の公への関与」である¹²⁾。それは公的部門から民間部門に至る多様な主体の連携を通じた公共課題の解決手法を意味する。公共課題は国防、感染症、貧困問題など多岐に渡るため、様々な「〇〇ガバナンス」が成立する。環境ガバナンスはその一例であり、地下水ガバナンスはさらにそのサブカテゴリーに位置する。

学術データベース Scopus を用いて昨今の研究動向を調査した千葉 (2024) によれば、地下水ガバナンスをテーマにした論文が初めて登場したのは1996年であるという¹³⁾。その後、目立った成果はなかったが2010年代に入り関連論文が増加し始めた。千葉はこの背景として国際食糧農業機関や世界銀行が2011年から開始した「地下水ガバナンスプロジェクト」の存在があったと推察している。Villholth and Conti (2017) は地下水ガバナンス研究が本格化した時期を2000年代後半としており、若干のずれはあるものの、両者の主張を鑑みれば、地下水ガバナンス研究は2000年代に拡大した分野ということになる¹¹⁾。

地下水ガバナンスの定義は様々あり、確定的なものはない。いくつかの例を挙げると下記のような(より詳細な事例については文献13を参照)。

- 地下水ガバナンスとは公的部門、民間部門、市民社会の交流プロセスであると同時に、地下水利用に関する法、規制、慣習をめぐる包括的な枠組みである¹⁴⁾。
- 地下水ガバナンスとは多様なステークホルダーが垂直的・水平的に協働しながら、科学的知見に基づき、地下水の持続可能な利用と保全に関して意

思決定し、地下水を保全管理していく民主主義的プロセスである。同時に、地下水とその関連領域における法制度的・政策的対応の包括的なフレームワークである¹⁵⁾。

- 地下水ガバナンスとはマルチ・アクター (多様なステークホルダー)、マルチ・レベル (垂直的・水平的な協働)、およびポリシー・ミックス (地下水とその関連領域における法制度的・政策的対応) という特徴を伴った、地下水管理の変化をめぐるプロセスである¹⁶⁾。

このように論者によって異なる表現を用いているものの、これらの定義には共通項がある。一つは多様な主体の参加である。それは国際機関-中央政府-自治体といった公共部門内の垂直的な連携のみならず、住民、企業、非営利団体など民間セクター内の水平的な協働も視野に入れる。次にプロセスという表現である。ガバナンスという単語には課題認識、解決策の立案・実行・修正に至るまでの動的な意味合いが含まれる。環境ガバナンスと同じく持続的な資源管理の達成手段に関心を寄せるコモンズ論 (共有資源管理論) 分野でも、コモンズとは完成された資源管理システムではなく、それを構築するプロセスであるとの指摘がある¹⁷⁾。

図2は地下水ガバナンスの概念を表している。図では国-都道府県-市町村といった公共部門内の垂直的な連携を「タテ連携」、住民、企業、非営利団体など民間セクター内の水平的な協働を「ヨコ連携」と称している。日本の場合、ここに外部のコンサルティング企業や研究機関が加わることがあり、これは「ナナメ連携」と記してある。地下水ガバナンスとは、こうした多様な関係者がタテ・ヨコ・ナナメ

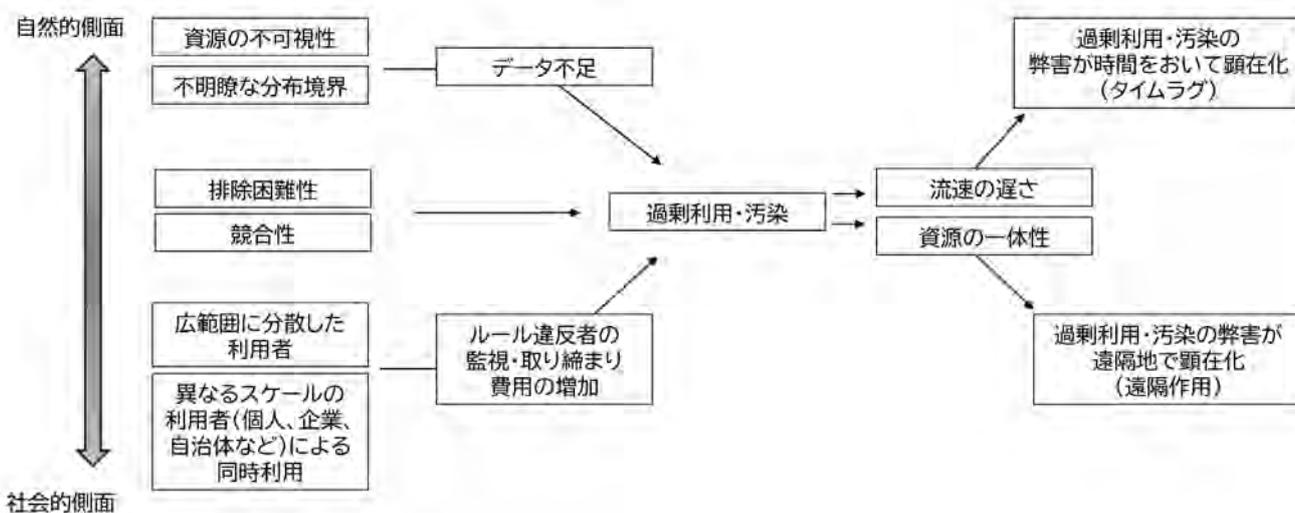


図1 地下水の資源特性と管理の困難さのつながり

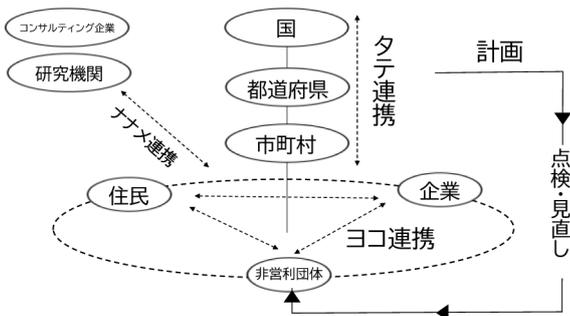


図2 地下水ガバナンスの概念図

連携を通して、地域の地下水にまつわる課題を把握・共有し、その解決に向けて計画策定・点検・見直しを行う一連の流れである。

日本の主たる地下水問題といえば地下水の過剰汲み上げによる地盤沈下であった。この公害は地下水採取規制と工業用水道の建設という組み合わせで沈静化されたという歴史的経緯から、日本の地下水政策は規制手段と技術的手段の組み合わせが中心となった。しかし地盤沈下が沈静化した現在、湧水景観を通じた街づくり、地下水を用いた農産品のブランド化、地下水の防災利用といった新たな活用が増えている。「使うな・汚すな」を目指す直接規制は公害防止には有効であるが、地域振興や減災利用には必ずしも適さない。そうした課題には多様な主体の参加が不可欠であり、同時に規制一辺倒ではない新たな政策枠組みが求められる。地下水ガバナンスはこうした社会ニーズの変化に対応する考えである^{15)・16)}。

4 流域水循環計画と地下水ガバナンス

水循環基本法の第13条は「政府は、水循環に関

する施策の総合的かつ計画的な推進を図るため、水循環に関する基本的な計画（以下「水循環基本計画」という。）を定めなければならない」と規定している¹⁾。そして最新の水循環基本計画（令和6年8月変更）は、行政および関係主体が連携しつつ、流域マネジメントの基本方針等を述べた流域水循環計画を策定することを努力義務としている¹⁸⁾。水循環基本計画を所管する内閣官房水循環政策本部事務局によると、2024年3月時点で流域水循環計画の該当例は全国で78あるという¹⁹⁾。同事務局は当該計画が流域水循環計画に相当するかどうかの判断基準として9項目を挙げている。その中には「計画等の策定に際して、公的機関が中心となって、各構成主体（計画等の目的や対象範囲に応じて構成された事業者、団体、住民等）と連携しつつ策定している」という基準が設けられていることから²⁰⁾、流域水循環計画はガバナンス型の計画であることがわかる。

図3はその78計画における地下水の言及数を整理した図である。この図の作成方法は以下の通りである。①まず78計画を全てダウンロードし、そのPDFファイルのコマ数を数える。②次にAdobe Acrobatの「高度な検索ツール」にて「地下水」という単語のヒット件数を数える。③そしてPDFファイルのコマ数を横軸に、地下水という単語のヒット件数を縦軸として分布図を描く。なおそのヒット件数には「地下水」という単語の他、「地下水位」や「地下水涵養」といった語句も含まれる。

この図が示すように地下水という単語が全く登場しない計画が多い。これは流域水循環計画が主に地表水を対象にしていることを示唆している。しかし数は少ないものの、地下水という語句の出現回数が多いものもある。図3にはそうした計画名の代表例

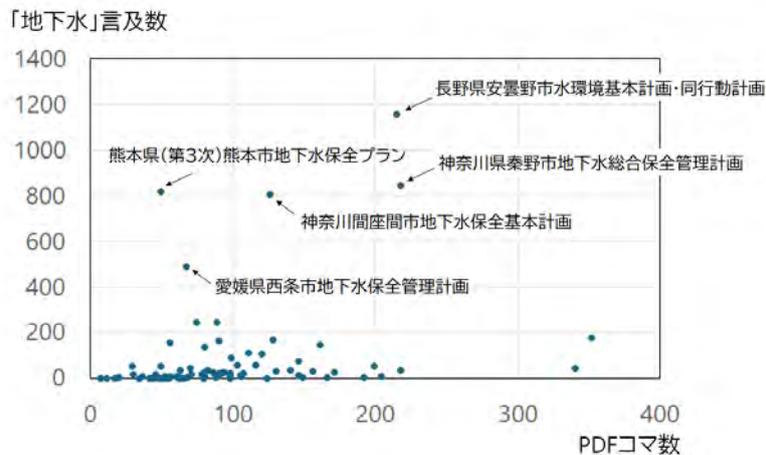


図3 流域水循環計画における「地下水」言及数

を記してある。それらは長野県安曇野市、熊本県熊本市、神奈川県秦野市、神奈川県座間市、愛媛県西条市の計画である。これらは数ある流域水循環計画の中でも特に地下水ガバナンスに焦点を合わせたものといえる。

5 事例紹介—長野県安曇野市の取り組み

この節では地下水ガバナンスの事例として長野県安曇野市の取り組みを紹介する。長野県安曇野市は南北に伸びる松本盆地の中央に位置し、人口約10万人を擁する。松本盆地には河川が運んだ厚い砂礫層（水を通しやすい地層）が分布しており、盆地の中で最も標高が低い地点を有する安曇野市には数多くの湧水が見られる。安曇野市にとって地下水は、わさびやサーモンといった第一次産業、湧水景観を生かした観光業、市民の水道水源（100% 地下水依存）と多彩な用途に使われており、市民生活に不可欠な基盤になっている²¹⁾。

安曇野市は2010年からの本格的な地下水保全に乗り出し、その後いくつかの会議体を作りながら現在に至っている（表1）。会議の名称は変化したが、安曇野市環境課を事務局に、市の他部局、国や県、外部のコンサルティング企業、研究者、地元住民－農業関係者、工業関係者、一般市民など－が参加する体制は一貫している。安曇野市では地下水利用の届出制度すらない状態から、関係者が地下水流動データおよび採取データを地道に集積し、そこで得た科学的知見をもとに包括的な地下水利用計画を策定した。そしてそこで満足せず、社会経済状況の変化に応じて定期的に見直しをかけながら、今なお地下水の保全と有効利用を模索している。これはまさに地下水ガバナンスの生きた事例といえる。

安曇野市の地下水ガバナンス展開は①基盤整備期、②計画策定期、③計画実践・検証期に大別できる。まず安曇野市は2010年に「安曇野市地下水保全対策研究委員会」を発足させた。この会議の産物は地下水資源強化・活用指針（2012年）と地下水条例（2013年）である。前者は条例の必要性を指摘し、地下水涵養を軸とした政策を提言するなど、その後の市の地下水行政の方向性を規定した。後者は地下水採取を届け出制にすると同時に採取量の報告を義務付けた。また市長に対し地下水利用計画の策定を義務付けた。この時期はその後の取り組みの制度的基礎を定めたものであることから、基盤整備段階と位置づけられる^{22)・23)}。

2013年の条例を受け2014年に水環境基本計画策定委員会が設立された。この委員会の成果物が2017年の水環境基本計画である。この計画は先述の指針を基にした具体的かつ詳細な行動計画を記したものである。安曇野市はこれ以降、この計画に沿って地下水の人工涵養を中心とする様々な政策を展開することになった。この時期は具体的な水環境管理計画を定めたものであることから、計画策定段階と位置づけられる²⁴⁾。

2018年と2022年にそれぞれ設立された水資源対策協議会、水環境審議会は水環境基本計画の進捗状況の確認、見直しを行う組織である。毎年年度末に地下水保全に向けた様々な取り組みの目標達成度を委員で共有し、その改善策を議論する場となっている。これは計画実践・検証期にあたり、現在もそれが続いている。

先述のように地下水ガバナンスは多様な主体の参加を通じた地下水管理の変化をめぐるプロセスと定義される。他方、地下水ガバナンスは「アクター」「法・制度的枠組み」「政策」「情報」という四構成要素か

表1 安曇野市地下水会議一覧（2024年1月時点）

会議名	期間	回数	期	公共部門	民間部門	研究者	委員総数	成果物
地下水保全対策研究委員会	2010-2012	13	基盤整備期	国土交通省 長野県 安曇野市役所環境課 及びその他関係部署	わさび組合 養鱒組合 工業会組合 土地改良区など	大学教員 コンサルティング企業 薬剤師会	54	・地下水資源強化・活用指針 ・地下水の保全・涵養及び 適正利用に関する条例
安曇野市水環境基本計画策定委員会	2014-2017	11	計画策定期	安曇野市役所環境課	わさび組合 養鱒組合 工業会組合 土地改良区など	大学教員 コンサルティング企業 薬剤師会	18	水環境基本計画
安曇野市水資源対策協議会	2018-2021	11		国土交通省 農林水産省 長野県 安曇野市役所環境課 及びその他関係部署	わさび組合 養鱒組合 工業会組合 土地改良区など	大学教員 コンサルティング企業 薬剤師会	33	水環境基本計画(改訂)
安曇野市水環境審議会	2021-現在	16	計画実践・検証期	安曇野市役所環境課	わさび組合 養鱒組合 工業会組合 土地改良区など	大学教員	20	

ら成り立つとされる²⁵⁾。従来の研究では地下水ガバナンスの定義とこの構成要素の関係が不明確であったが、これら四構成要素を地下水管理の変化プロセスの一里塚と捉えることで両者は接続可能となる。

この視点を活用すると、安曇野市の一連の取り組みは、地下水をめぐる環境資産の継承という長期目標を念頭に、①自治体と地元住民を中心としたさまざまなアクターが、②科学的な裏付けのある情報を用いつつ、③指針や条例を作ることで法・制度的な枠組みを用意し、④その基盤に基づいて具体的な計画を作り、必要に応じて修正を加えていったプロセスと再整理できる。このように安曇野市の事例は上記の構成要素が網羅されており、地下水ガバナンスの典型モデルといえる。

6 まとめ

本稿は地下水ガバナンスへの関心の高まりを背景に、地下水の資源特性、地下水ガバナンスの定義、国内の取り組み事例を概説した。地下水は地域資源としての性格が強く、その用途も各地で様々である。本稿では地下水ガバナンスの意味するところを説明したが、その内容は地域によって大きく異なる。今後は各地の取り組みを相互に比較し、その取り組みの特徴や課題を共有していくことが求められる。

参考文献

- 1) e-gov 法令検索：水循環基本法 https://laws.e-gov.go.jp/law/426AC0100000016/20210616_503AC0000000073?tab=compare (2025年1月2日現在)
- 2) 田中正：「創立60周年記念特集「地下水ガバナンス」の掲載にあたって」, 「地下水学会誌」, Vol.62, No.2, pp.163-166, 2020.5.
- 3) Hardin, G.: 「The tragedy of the commons」, 「Science」, Vol.162, pp. 1243-1248, 1968.12
- 4) Ostrom, E.: 1990. Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge University Press. 1990
- 5) Giordano, M.: 「Global groundwater? issues and solutions」, 「Annual Review of Environment and Resources」, Vol.34, No.1, pp.153-178. 2009.11
- 6) Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G. and Perrone, D.: 「Global groundwater sustainability, resources, and systems in the anthropocene」, 「Annual Review of Earth and Planetary Sciences」, Vol.48, No.1, pp.431-163. 2020. 5.
- 7) La Vigna, F.: 「Review: Urban groundwater issues and resource management, and their roles in the resilience of cities」, 「Hydrogeology Journal」, Vol.30, No.6, pp.1657-183, 2022.8

- 8) Lopez-Gunn, E.: 「Governing shared groundwater: The controversy over private regulation」, 「The Geographical Journal」, Vol. 175, No.1, pp.39-51, 2009.2
- 9) Ross, A., Martinez-Santos, P.: 「The challenge of groundwater governance: Case studies from Spain and Australian」, 「Regional Environmental Change」, Vol.10, No.4, pp.299-310, 2009.3
- 10) Theesfeld, I.: 「Institutional challenges for national groundwater governance: Policies and issues」, 「Ground Water」, Vol.48, No.1, pp.131-42, 2010.1
- 11) Villholth, K. G., Conti, K.I.: 「Groundwater governance: Rationale, definition, current state and heuristic framework」, In 「Advances in Groundwater Governance」, edited by K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido, J. Van Der Gun, pp.3-31. CRC Press, 2017.12
- 12) 岩崎正洋：「ガバナンス研究の現在」, 岩崎正洋編, 「ガバナンス論の現在—国家をめぐる公共性と民主主義」, 勁草書房, pp. 3-15. 2011
- 13) 千葉知世：「地下水ガバナンス論の国際動向：文献レビュー」, 「地下水学会誌」, Vol.66, No.4, pp. 275-301, 2024.11
- 14) Megdal, S. B., Gerlak, A. K., Varady, R. G. and Huang, L. Y.: 「Groundwater governance in the United States: Common priorities and challenges」, 「Ground Water」, Vol.53, No.5, pp. 677-84, 2015.9
- 15) 千葉知世：「日本の地下水政策—地下水ガバナンスの実現に向けて（阪南大学叢書114）」京都大学学術出版会, 2019
- 16) 八木信一・遠藤崇浩・坂東和郎・中谷仁：「地下水ガバナンスの動態に関する研究—地下水の社会的価値を分析枠組みとして—」, 「地下水学会誌」 Vol.62, No.2, pp. 219-232, 2020.5
- 17) 家中茂：「石垣島白保のイノー—新石垣島空港建設をめぐって」, 井上真・宮内泰介編「 commonsの社会学」, 新曜社, pp. 120-141, 2001
- 18) 水循環基本計画（令和6年8月30日変更）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/mizu_junkan/about/pdf/r060830_honbun.pdf (2025年1月2日現在)
- 19) 内閣官房水循環政策本部事務局：「流域水循環計画の策定状況」
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/mizu_junkan/category/planning_status.html (2025年1月2日現在)
- 20) 内閣官房水循環政策本部事務局：「流域水循環計画に該当するかの確認の際の考え方」
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/mizu_junkan/category/planning_status/kangaekata.html (2025年1月2日現在)
- 21) 安曇野市地下水保全対策研究委員会：「安曇野市地下水資源強化・活用指針」2012.8
<https://www.city.azumino.nagano.jp/uploaded/attachment/1560.pdf> (2025年1月2日現在)
- 22) 安曇野市市民環境部生活課：「地下水保全に向けた取り組みと「安曇野市地下水資源強化・活用指針」」, 「信州自治研」, No.248, pp.2-9, 2012.10
- 23) 百瀬正幸「長野県安曇野市（各自治体の取り組み）」「地下水の事典」公益社団法人日本地下水学会（編）/ 谷口 真人・川端 淳一・小野寺 真一・辻村 真貴（編集幹事）, pp.64-69, 2024.10
- 24) 高野貴史：「サステイナブルな社会を目指す安曇野市の地下水保全の取組み」, 「RIVERFRONT」, No.90, pp.10-13, 2020.2
- 25) Food and Agriculture Organization：「Global Diagnostic on Groundwater Governance」, 2016
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ab609e18-563d-43d9-87b0-874ce3b5de91/content> (2025年1月2日現在)

地下水の本、いろいろ

ごとう ゆきはる*
五藤 幸晴*

K
ey Word

名水, 湧水, 地下水利用, 地下水調査, 専門書, 人工涵養, 地盤沈下,
地下水汚染, 法律, 小説

1. はじめに

地下水の本は、書店の本棚でも目にする機会が少なく余り知られていませんが、意外と多く出版されています。ここでは、一般向きの本、地下水調査の本、専門書、最後に地下水（湧水）の記載がある小説について紹介を致します。

2. 一般向きの本（地下水全般 時代と共に）

昭和初期から見ると、昭和17年の吉村信吉著：「科学新書20 地下水」（河出書房1942）があり、科学的な見地から調査された内容が記述されています。昭和18年には地下水の概要とその利用面について、堀田正弘著：「地下水利用」（帝国農会1943）が土地改良叢書の1冊として出版されています。昭和23年発刊された蔵田延男著：「水を探る科学者」（柏葉書院1948）には、私たちの生活の中の水の概説と共に地下水を探るための手法について記載されています。昭和34年には山本荘毅・柴崎達雄共著：「地下水 そのうもれた資源をいかすコツ」（畑地かんがい研究会1959）が出版されています。当時の地下水ブームにこたえ、地下水全般を網羅し図表や写真も多く分かりやすい内容となっています。昭和30年代後半になると、当時の通産省地質調査所において「地下の科学」シリーズと銘打った新書版が出版され、その中に昭和37年刊行の蔵田延男著：「日本の地下水」（実業公報社1962）、昭和43年刊行の村下敏夫著：「水井戸のはなし」（ラテイス1968）があります。両書とも地下水調査の実務を反映した内容で地下水や水井戸のことが分かりやすく記述されています。その後しばらく、手軽な新書程度の本は少なく、平成

3年のNHKブックスの樫根勇著：「地下水の世界」（日本放送出版会1991）までありません。この本は、地下水観からフィールドワークによる調査結果まで広範囲にわたって地下水の姿を捉えた内容で非常に分かりやすく書かれています。平成25年に講談社学術文庫から「地下水と地形の科学 水文学入門」とタイトルを変えて出版されました。このほか、平成21年には、井田徹治著 日本地下水学会編：「地下水の科学」（講談社ブルーバックス2009）が地下水全般に関わる事項を広く網羅した内容で地下水を初めて学ぶ人にとっては基礎的なことが学べる本として出版されました。もう1冊、守田優著：「地下水は語る 見えない資源の危機」（岩波新書2012）も都市化に伴い大量揚水が続いた結果、地盤沈下や湧水の涸渇、新たな汚染などの様々な地下水障害の発生について解説し、今後の地下水とのつき合い方を示した好著です。社会的な面から地下水を捉えた本として橋本淳司著：「日本の地下水が危ない」（幻冬舎新書2013）があります。帯には「ジャーナリストからの緊急報告。日本は水資源争奪戦に勝ち残れるか？」と記載され、外国資本による水源地買収問題などについてレポートし、自分たちで地下水を守ることの大切さを説いています。地下水の利用と保全に関する入門書としては、西垣誠・瀬古一郎・中倉裕昭編著 GUP 共生型地下水技術活用研究会著：「育水のすすめ」（技報堂出版2013）があります。流域の共有財産である地下水について技術者の方々が少しでも地下水の大切さや重要性を考えるための29の話を読みやすく一話読み切りスタイルの本です。令和2年には、日本地下水学会編：「地下水・湧水の疑問50」（成山堂書店2020）が一般の人が疑問と思う

*川崎地質株式会社 経営管理本部 顧問

項目について Q & A 様式で専門家により解説した
ものとして出版されています。

3. 一般向き本（名水・地下水利用・保全など）

全国各地域には名水があり多くの本が出版されて
います。ここではほんの少しだけ紹介します。

全国的な名水については、日本地下水学会編：「名
水を科学する」（技報堂出版 1994）、「続・名水を科
学する」（技報堂出版 1999）、「新名水を科学する」（技
報堂出版 2009）があります。日本地下水学会の学
会誌の訪問記「名水を訪ねて」を取りまとめたも
ので、地形地質や水量水質などの科学的なデータ
が記載され詳しく知ることができます。自然・人
文学の観点からとしては、河野忠著：「名水学こ
とはじめ」（昭和堂 2018）があります。日本の湧水
については、日本地下水学会編：「図説日本の湧水
80 地域を探るサイエンス」（朝倉書店 2023）が多
くの図表を用いてわかりやすくかつ科学的な視点
で記載がされています。

このほか地下水利用では、柴崎達雄著：「略奪さ
れた水資源 地下水利用の功罪」（築地書館 1976 年）
と柴崎達雄著：「農を守って水を守る 新しい地下水
の社会学」（築地書館 2004）も地下水利用面から地
下水の大切さを扱った本です。また、山田健著：「水
を守りに、森へ 地下水の持続可能性を求めて」（筑
摩書房 2012）はサントリーの地下水を育む天然水
の森を守る活動について、多くの専門家と共に様々
な問題を解決していく様子が記載され、日本の森
と水は危ういことが知られます。サントリー編
集の本としては「天然水を科学する」（日本林業調
査会 2013）もあります。

4. 地下水調査の本

地下水調査に関する最初の本は、酒井軍治郎著：
「地下水調査法」（古今書院 1941）で、80 年以上前
の本ですが、具体的な調査手法が記載され考え方は
現在に通じるものがあります。

物理探査による地下水調査の本としては、昭和
24 年の農林省農業改良局研究部開拓研究所編：「農
業土木のための地質調査法—簡便な電気探査機の
使い方と実例」（農林省開拓研究所 1949）があり、
電気探査により水理地質構造を把握して地下水を
探す内容です。昭和 28 年には山本荘毅著：「地下
水調査法」（古今書院 1953）が B6 判サイズで出版
されています。この本は地下水調査のバイブル的

な本で版を重ねた後に絶版となり、新しく昭和 37
年に山本荘毅著：「地下水探査法」（地球社 1962）
としてサイズも A5 判と少し大きくなりましたが、
実務の現場で役立つ本として多くの人に利用され
ました。昭和 46 年には「改訂増補 地下水探査法」（地
球社 1971）が出され、その後新版として、山本
荘毅著：「新版 地下水調査法」（古今書院 1985）が
出版されました。地下水調査に関する事項が網羅
された実務書となりサイズも A4 判の分厚い本とな
りました。実務書として、同じ著者の山本荘毅著：
「揚水試験と井戸管理」（昭晃堂 1962）があります。
これは、揚水試験の実務書としては唯一のもので、
現場技術書においては現在も読まれている本です。
令和になっての調査法の本は、Geo Tec 研究会編：
「地質・地盤系実務者のための探査・調査ガイド 計
画から発注・調査まで」（古今書院 2020）で、地下
水調査の章があります。全国地質調査業協会連合
会編：「ボーリングハンドブック第 6 版」（オーム社
2023）の中にも土壌・地下水汚染にかかる調査の章
があります。

初心者向きの本では、高橋一・末永和幸共著：
「湧泉調査の手引き」（地学団体研究会 1992）がポ
ケットサイズ（B6 判）の本で、湧水を主とした内
容で図や写真も多く一般の方々が利用しやすい記
述となっています。応用地質研究会著：「地下水調
査のてびき」（地学団体研究会 2011）も小冊子（A6
判）ですが、地下水の特徴から井戸調査、湧水調査、
調査結果のまとめ方まで幅広く扱っていて、初め
て地下水調査される方には好著です。

地下水調査や観測の指針となっている本として、
建設省河川局監修：「地下水調査および観測指針
（案）」（山海堂 1993）があり、国で行う地下水調査
や観測業務の指針となる専門的な内容で、地下水
調査業務を行う技術者の必需本となります。

物理探査による帯水層調査では電気探査が用い
られ、これについて詳しく記載された本が、志村
馨著：「電気探査法」（昭晃堂 1963）です。60 年
以上前の専門書で内容も難しいものですが、電気
探査の基本を知る上では絶好の書となっています。
同様な本として、山口久之助著：「電気式地下探査
法」（古今書院 1952）があります。同じ著者の本
で：「鑿井の電気検層法」（昭晃堂 1963）もありま
す。このほかに放射能を利用して地下水を調べる
放射能探査の本として 落合敏郎著：「放射能式地下
水探査法」（昭晃堂 1965）があり、60 年前の本で
すが基本的なことを学ぶことができます。同じ著

者の「地下水・温泉の放射能探査法」(リーベル出版 1996)では、温泉ブームとなった頃に利用された放射能探査について具体的な事例を踏まえ記載されています。

上記の他に、地温を測定して地下水の水脈(みずみち)を調べる方法について解説した本が、竹内篤雄著:「地すべり 地温測定による地下水調査法」(吉井書店 1983)です。特に地すべりの機構解析や対策工法検討において重要となる地下水の流れを捉えるための手法が詳述されています。同著者には「温度測定による流動地下水調査法」(古今書院 1991)、「地下水調査法 1 m深地温探査」(古今書院 2013)や「自然地下水調査法 日本国内 863 箇所地下水温」(近未来社 2017)などもあります。それらを一般的にわかりやすい内容としたものが、竹内ほか著:「温度を測って地下水を診断する」(古今書院 2001)です。

富山県の黒部川扇状地をフィールドとして放射性同位体を使用し地下水の起源や流れを調査し、コンピューターを使用した解析結果などをまとめた本として、榎根勇編著:「実例による新しい地下水調査法」(山海堂 1991)があります。那須野のフィールドとして当該地区の地下水を把握するため電気探査を中心に帯水層を含めた地下構造を解析し取りまとめた本としては、提橋登著:「那須野の地下水探査記録」(住宅新報社 1976)があります。このような各地の地下水の詳細なものは、現地調査をする上で非常に参考となります。

建設工事に伴う地下水の問題を扱った本として、高橋賢之助著:「根切りのための地下水調査法」(山海堂 1981)があります。この本では、地下掘削した時に湧出する地下水についての調査方法が事例を踏まえて記載されています。その後の事例を含めた新版として、高橋賢之助著:「掘削のための地下水調査法」(山海堂 1990)が出版されています。また、トンネル掘削に伴う湧水については 60 年以上前の本となりますが、高橋彦治著:「湧水と地圧」(山海堂 1963)があります。水文学的なテクニックを用いてトンネル湧水を簡便に予測する方法(高橋の方法)が掲載されています。

地下水流動調査の本としては、日本地下水学会編:「地下水のトレーサー試験」(技報堂出版 2009)があり、この本は、地下水の流れをトレーサー(液体などの流れを追跡する物質(追跡子))を用いて調べる試験方法について解説した専門書で、研究

者や技術者などが実測した事例が掲載され、実務を行う技術者にとって役立つ本となっています。

地下水の研究は地理学の分野でも多く行われ、自然地理学の本には、地下水調査の項目があり、測水調査や水質調査などの地下水調査の手法が掲載されています。昭和の時代の本ですが三野与吉編:「自然地理学研究法」(朝倉書店 1959)、三野与吉編:「自然地理調査法」(朝倉書店 1968)、三野与吉編:「自然地理の調べ方」(古今書院 1952)や町田貞編:「自然地理学調査法」(古今書院 1970)、尾留川正平ほか編:「現代地理調査法 II 巻 自然地理調査法」(朝倉書店 1973)等があります。平成になっての本として上野健一・久田健一郎編:「地球学シリーズ 3 地球学調査・解析の基礎」(古今書院 2011)の第 III 章水文の中に地下水に関する記述があります。水環境の調査をまとめた本としては新井正著:「水環境調査の基礎」(古今書院 1994)があり、地下水や湧水を調べるといふ章が含まれ、その改訂版は 2003 年に出され、最新のものは、鈴木 裕一、佐藤芳徳、安原 正也、谷口 智雅、李 盛源 著:「新版 水環境調査の基礎」(古今書院 2019)として出版されています。

5. 専門書(理学系と工学系、法律など)

昭和初期の理学系の本では、岩波講座の鈴木昌吉著:「地下水概論」(岩波書店 1931)や福富忠男著:「地下水(専ら飲料用地下水について)」(岩波書店 1933)があります。さらにこの岩波講座の中には、阿部謙夫著:「水文学」(岩波書店 1930)があり、地中の水として地下水を扱っています。工学系では、君島八郎著:「地下水 改版」(丸善 1934)が地下水を冠した単行本として出版されています。この本は 1919 年に出版された「河海工学」(丸善)の地下水に関する章を 1 冊の本に取りまとめたもので、土と地下水、浸透や坑内湧水、土質・水質試験などの章があります。それ以前には、重住文雄著:「地下水と其の採集法」(大阪屋號書店 1932)があり、著者は満州で地下水を水源とする水道開発の技術者で、地下水全般と鑿井や井戸施工について詳しく記載された本です。

その後には、村下敏夫著:「地下水学要論」(昭晃堂 1962)があり、実務として地下水学を学ぶ好著です(1975 年には改訂版が出版)。地下水学の教科書として最も著名なものは酒井軍治郎著:「地下水学」(朝倉書店 1965)です。これまで地下水学について体系的にまとめられた本が無い中、執筆さ

れたものです。同じ著者には、地下水学の応用面を中心に書かれた 酒井軍治郎著：「応用地下水学」（朝倉書店 1969）もあります。

地下水の水理計算における色々な場合の数式が掲載された本としてクリメントフほか著 外尾ほか訳：「地下水の力学」（ラテイス 1967）があります。井戸工学する本は少なくその中での1冊が、福川豊著：「実用深井戸工学」（政府刊行物サービスセンター 1969）です。井戸理論から揚水に関する工学的な記載がされています。井戸の揚水試験などによる地下水の水理解析法には様々な数式についてまとめられた本では、酒井軍治郎著：「地下水の水理解析法」（地下水技術センター 1980）があります。地下水だけでなく陸水全体をまとめた教科書として山本荘毅編：「陸水」（共立出版 1968）があり、この中にも地下水について解説した章があります。山本荘毅・榎根勇監修 建設省水文研究グループ翻訳：「最新地下水学」（山海堂 1977）は実務者向きで多くの技術者に活用された本で、1980年には改訂新版が出版されています。

入門書としては、地下水入門編集委員会編：「地下水入門」（土質工学会 1983）があります。建設工事に関する地下水問題について、分かりやすい解説がされています。その後、2008年に地下水を知る編集委員会編：「地下水を知る」（地盤工学会 2008）が発刊されました。実務書で初心者向きの本は、もう1冊あります。それは、山本荘毅監修：「建築実務に役立つ地下水の話」（建築技術 1994）です。基本的な地下水の解説から水理解析まで分かりやすく解説がされていて役立つ本です。

水文学を踏まえてやや詳しい本としては、山本荘毅著：「地下水水文学（水文学講座6）」（共立出版 1992）があります。環境科学的に総合的に取りまとめられた本としてはドミンコほか著 大西監訳：「地下水の科学Ⅰ 地下水の物理と化学」（土木工学社 1995）、「地下水の科学Ⅱ 地下水環境学」（土木工学社 1996）、「地下水の科学Ⅲ 地下水と地質」（土木工学社 1996）があります。2024年には、Wilfried Brutsaert 著、杉田倫明 訳、筑波大学水文科学研究室 監訳：「水文学 第2版」（共立出版 2024）が出版され、水循環の中の地下水の流れについて詳述されています。

地下水は貴重な水資源でもあり、その立場から書かれた本が、水収支研究グループ編：「地下水資源学」（共立出版 1973）です。その新版として、水

収支研究グループ編：「地下水資源・環境論 その理論と実践」（共立出版 1993）があります。資源のみならず環境に関する論説が展開されています。このほかに地下水の管理をテーマとした本としては、柴崎達雄編：「地下水盆の管理 理論と実際」（東海大学出版会 1976）や水収支研究グループ編：「地下水管理モデル」（環境情報センター 1978）があります。早くから地下水環境の維持管理に着目した点で重要な本となります。

地下水資源の保全と開発について書かれた本として 榎根勇編：「地下水資源の保全と開発」（水利科学研究所 1973）もあり、千葉縣市川市での地下水調査の結果をまとめた地域研究事例となっています。地下水技術センター編：「地域社会のなかの地下水」（地下水技術センター 1975）では、わが町わが村の地下水として7か所の地下水利用事例が紹介されています。地下水技術センターでは、蔵田延男著：「日本地下水考」（地下水技術センター 1981）も発刊されており、全国での地下水調査の事例が多く掲載されています。

地下水に関する政策面や資源面については、地下水政策研究会編著：「わが国の地下水 その利用と保全」（大成出版社 1994）と科学技術庁資源調査会編：「日本の地下水資源」（地下水技術協会 1983）があります。最近の環境保全型社会をめざす地下水環境と地下水資源マネージメントについての本としては、佐藤邦明編著：「地下水環境・資源マネージメント」（同時代社 2005）があります。

斜面における地下水の挙動がしだいに注目される中、斜面水文学としての研究書となるのが、日野ほか共訳：「カークビー 新しい水文学」（朝倉書店 1983）です。斜面の地下水に関する研究書が少ないため貴重な本です。

地下水の水質についての本では、小島貞男・三村秀一・菅野明男共著：「上水・井戸水の分析」（講談社 1974）や日本地下水学会編：「地下水水質の基礎」（理工図書 2000）があります。環境保全に関係する地下水質については、C.A.J. アベロ、D. ポストマ 著、中川啓監訳、神野健二ほか訳：「環境保全のための地下水水質化学：地球化学、地下水および汚染 上・下」（九州大学出版会 2021）が出版され詳しく記されています。

工学系の地下水環境に関する本としては、西垣誠監修：「地下構造物と地下水環境」（理工図書

2002)があり、特に地下水の流動保全の現状と種々の保全工法の設計法などが記載されています。地下水流動保全についてはもう一冊、地盤工学会編：「地下水流動保全のための環境影響評価と対策」(地盤工学会 2004)があり、詳細に評価と対策について記されています。岡山地下水研究会著：「実務者のための地下水環境モデリング」(技報堂出版 2003)では、実際の地下水問題に対するモデルの適用について、モデルの出来具合が解析結果から将来予測やリスク評価に大きく影響することを踏まえ解説しています。藤縄克之著：「環境地下水学」(共立出版 2010)は、地下水学に関する日本の著者による教科書が少ない中、この本では地下水の基本から応用、特に土壌・地下水汚染に関する対策や地下水流動解析・物質や熱移動について詳しく記載されています。2024年に出版された地下水解析の入門書としては、江種伸之著：「地下水解析入門 オンデマンド」(Independently published 2024)があります。

地下水人工涵養の現況については、建設省河川局河川計画課編：「地下水人工かん養の現況と課題」(山海堂 1988)にまとめられています。地下水の人工涵養の意義・問題点・諸外国の例が紹介されています。日本での人工涵養の例としては、肥田登著：「扇状地の地下水管理」(古今書院 1990)が秋田県の六郷扇状地を対象とし人工涵養や地下水利用、地下水管理について記載されています。日本地下水学会においても、21世紀の地下水管理ということで、日本地下水学会編：「雨水浸透・地下水涵養」(理工図書 2001)が出版されています。このほかにガイドラインとしては、アメリカ土木学会著 肥田ほか訳：「地下水人工涵養の標準ガイドライン」(築地書館 2005)があり、アメリカの標準ガイドラインですが参考となるものです。

地盤沈下の問題は、大正時代から注目され、昭和10年には政治家の菊地山哉が「沈み行く東京」(上田泰文堂 1935)という本に記しています。地盤沈下に関連した本としては、蔵田延男著：「地盤沈下と地下水開発」(理工図書 1960)や蔵田延男著：「地盤沈下と工業用水法」(ラテイス 1971)があり、地下水行政についても記されています。昭和53年には環境庁水質保全局企画課編：「地下水と地盤沈下」(白亜書房 1978)が発行され、その後平成2年にその改訂版として、環境庁水質保全局企画課監修 地盤沈下防止対策研究会編纂・執筆：「地盤沈下とその対策」(白亜書房 1990)が出版されました。一般

的な読み物としては、三省堂新書の柴崎達雄著：「地盤沈下 しのびよる災害」(三省堂 1971)が50年以上前の本ですが分かりやすい解説書です。

地下水汚染関係の本は、1990年代より多く出版されるようになり、特に硝酸性窒素による汚染が注目されました。各務原地下水汚染研究会編：「各務原台地の地下水汚染」(日刊工業新聞社 1990)では、ニンジン栽培の伴う施肥による地下水汚染の原因究明と将来予測について記されています。この本を一般的にわかりやすくしたものとして、各務原地下水研究会著：「よみがえる地下水 各務原市の闘い」(京都自然史研究所 1994)もあります。地下水汚染の一般的な内容について手軽に読めるものとして、藤縄克之著：「汚染される地下水」(共立出版 1990)があり、地学ワンポイントシリーズの1冊でコンパクトにまとまった好著です。専門的に基礎から応用まで学びたい人には、地下水問題研究会編：「地下水汚染論 その基礎と応用」(共立出版 1991)がお勧めです。環境庁による本では、環境庁水質保全局監修：「地下水汚染調査の手引き」(公害研究対策センター 1992)が簡潔にまとめられています。重金属による汚染メカニズムについて分かりやすく解説している本として、畑明郎著：「土壌・地下水汚染 広がる重金属汚染」(有斐閣選書 2001)や「拡大する土壌・地下水汚染 土壌汚染対策法と汚染の現実」(世界思想社 2004)があります。実務書としては、土壌・地下水汚染の調査・予測・対策編集委員会編：「土壌・地下水汚染の調査・予測・対策」(地盤工学会 2002)、「続 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策」(地盤工学会 2008)や土壌汚染対策法を踏まえて出版された全国地質調査業協会連合会編：「土壌・地下水汚染のための地質調査実務の知識」(オーム社 2004)があります。日本地下水学会においても、日本地下水学会編：「地下水・土壌汚染の基礎から応用」(理工図書 2006)が出版され、土壌・地下水汚染の基礎から応用までを地下水を中心に解説がされています。初心者向けには、地盤工学会の入門シリーズとして、地盤工学会編：「はじめて学ぶ土壌・地下水汚染」(地盤工学会 2010)があり、基礎的な事柄から解説がされていて理解を深めるには適した内容となっています。

地下水関係の事典は、2024年に出版された日本地下水学会編：「地下水の事典」(朝倉書店 2024)が、各分野の専門家によって地下水に関して包括的に取りまとめられています。地下水に関する用語に

については、日本地下水学会編：「地下水用語集」（理工図書 2011）と山本莊毅責任編集：「地下水学用語辞典」（古今書院 1986）の2冊があり、用語の理解に役立つ本となっています。

全国の地下水を知るための本には、農業用地下水研究グループ編：「日本の地下水」（地球社 1986）と地下水要覧編集員会編：「地下水要覧」（山海堂 1988）があります。どちらも百科事典のような厚い本ですが、全国の平野部の水理地質構造と地下水について図表も多くて詳細な記載がされています。この2冊があれば日本の地下水についてある程度調べることができます。

地下水に関する法律関係の本で大正から昭和初期の本では、田尻稲次郎著：「地下水利用論」（洛陽堂 1915）や武田軍治著：「地下水利用権論」（岩波書店 1942）があります。水に関する法としてまとめられたものでは、園部敏・田中二郎・金沢良雄著：「法律学全集 15 交通通信法・土地法・水法」（有斐閣 1960）があり、その中の水法の部分に詳しく書かれています。金沢良雄・三本木健治著：「水法論（水文学講座 15）」（共立出版 1979）には水の賦存形態とその現代的課題の中に地下水法論や地下水の法的定義などが記されています。また、ジュリスト増刊総合特集として「現在の水問題—課題と展望」（有斐閣 1981）に地下水利用と保全やその法システムなどが掲載されています。2010年以降の本としては、宮崎淳著：「水資源の保全と利用の法理：水法の基礎理論」（成文堂 2011）や小澤英明著：「温泉法 地下水法特論」（白揚社 2013）があります。また、阿部泰隆著：「まちづくりと法 都市計画、自動車、自転車、土地、地下水、住宅、借地借家」（信山社 2017）では、地下水環境の章に秦野市の地下水保全条例についての記載も含まれています。近年はガバナンスも注目されるようになり、千葉知世著：「日本の地下水政策 地下水ガバナンスの実現に向けて」（阪南大学叢書 114）」（京都大学学術出版会 2019）が出版されています。

6. 地下水（湧水）の記載がある小説

小説の中に記載される「地下水」「湧水」などについては、建設工事の内でも特にトンネル掘削に伴う湧水の場面が多くみられます。映画にもなった黒部ダムの隧道工事を描いた木本正次著：「黒部の太陽 日本人の記録」（毎日新聞 1964）が有名です。このほか丹那トンネルの工事については、鉄道省熱

海建設事務所 編：「丹那トンネルの話」（工業雑誌社 1933）に工事記録として詳しく記載されていますが、小説としても山岡莊八著：「丹那トンネル」（小説選集）」（博文館 1942）、小山いと著：「丹那トンネル（「執行猶予」に収録）」（早川書房 1951）、秋永芳郎著：「小説丹那隧道」（新人物往来社 1970）、吉村昭著：「闇を裂く道」（文芸春秋 1987）などに多くの記載があります。

関門トンネルの工事については、有馬頼義著：「征服の報酬（裁かれる人々に収録）」（光風社 1959）において海底部の掘削で多くの湧水の記載があります。ビル建設の工事では、咲村観著：「左遷」（筑摩書房 1977）で大阪のPW杭工事において杭間から土砂を含んだ地下水の漏れ防止にグラウトする場面があります。鉱山・炭鉱の掘削の湧水の場面では、松本清張著：「佐渡流人行（松本清張選集 3 時代小説・啾々吟に収録）」（東都書房 1959）に佐渡金山の坑内の湧水について記されています。草野唯雄著：「影の斜坑」（青樹社 1977）では、閉山間近の筑豊の炭坑内の湧水について記載があります。地下水や湧水の情景を記載されている本としては、大岡昇平著：「武蔵野夫人」（新潮社 1950）が武蔵野の段丘崖（はげ）の湧水の情景が細かく記載され、立原正秋著：「きぬた」（文芸春秋 1973）では三島の柿田川湧水の描写と主人公の心情とを重ね合わせて書かれています。大岡昇平著：「花影」（中央公論社 1961）や太宰治著：「ロマネスク（「晩年」に収録）」（砂子屋書房 1936）にも三島で湧出する富士の地下水（湧水）や小川の流が記載されています。北海道の羊蹄山の京極湧水については、瀧羽麻子著：「女神のサラダ」（光文社 2020）の中の「本部長の馬鈴薯」に湧き水の滝としてわずかに記載があります。松本清張著：「詩城の旅びと」（日本放送出版協会 1989）はTVドラマにもなりましたが、大分県の竹田湧水群が少し取り上げられています。ただ、このような小説の中での地下水や湧水の記載はわずかなので、本文中には1行から数行程度の記載しかありません。読まれるときに少し気がついてもらえると思います。

7. さいごに

ここでは、地下水に関する本の一部を紹介したのみですが、紹介した本が皆さまの業務等に少しでも役立つことになれば幸いです。

やさしい
知識

おいしい水の要件

やぶさき しほ*
藪崎 志穂***K**ey Word 水の味、水道水、地下水、湧水、溶存成分、残留塩素、硬度

1. おいしい水とは？

水はヒトを含めた動物、植物が生きていくうえで欠くことのできない大切なものです。一説では、ヒトは食べ物が無くても水があれば数十日は生きることができるかとされています¹⁾。ところで、最近、水道水は飲まずに、ミネラルウォーターを買って飲む、あるいはウォーターサーバーを取り付けて飲用する、というかたが増えてきているようです。その主な理由として、健康志向や災害への備えが挙げられていますが、水道水の味が良くないから、という意見も耳にします。水の味と一言と言ってもイメージしにくいかもしれませんが、どのような水がおいしく感じるか、皆さんはご存じでしょうか？この問にお答えする前に、前提条件として、味の感じ方は人によって異なり、また同じ人でもその時の気温や体調、水の温度などにより味の感じ方が変わるため、全ての人に当てはまるわけではないことをご理解ください。しかしながら、多くのかたが“おいしい”と感じる要件はいくつかありますので、以下に紹介します。

昭和60年（1985年）4月に当時の厚生省の諮問機関である「おいしい水研究会」により、「おいしい水の水質要件」²⁾が示されました（表1）。この要件は主として水道水に対するものですが、市販されている水や、自然の地下水・湧水にも適用できます。要件をみると、蒸発残留物、硬度、遊離炭酸、過マンガン酸カリウム消費量（有機物量）、臭気強度、残留塩素、水温が水の味に関係しており、いずれの項目も値が低いほうが水をおいしいと感じる人が多いようです。たとえば、水に溶けている成分（ミネラルや炭酸ガス、有機物など）が多いと、苦味や渋みが増してくせのある味になると

されています。それならば、溶存成分量が殆どゼロの純水や超純水はおいしいのでは？と思われるかたがいるかもしれませんが、純水は何も溶けていないため味もしないので、通常はおいしいとは感じられません。このことから、多すぎず、少なすぎず、適度な成分が溶けている水をおいしいと感じることが多いと言えます。

2. 残留塩素

表1の項目の一つに残留塩素が挙げられていますが、これは水道水を衛生的に使うため、水道法により消毒を行うことが定められており、薬品（次亜塩素酸ナトリウム）を添加していることと関係しています。蛇口から出てくる時点の残留塩素は0.1mg/L以上になるように義務付けられていますが、この量が多くなるとカルキ臭を発したり、味を損ねることがあります。また、水道用の水を浄化する過程でも汚れを集めて沈殿させるための薬剤が投与されており、水の汚れが多いと添加する薬剤の量も増えることになり、味の低下にも繋がります。消毒用の薬品の添加量は水道の水源により変わります。たとえば、人為的な影響の少ない場所の水は汚れも少なく、添加する薬品の量は少なくて済むので、おいしく感じる人が多いです。一般的に、河川水やダムのような地表水と比べて、地下にある水は人為的な影響を受けにくいとされているため、汚れが少なく、消毒の量も少なくて済むことが多いです。日本の水道水源は、ダム48.4%、河川水25.1%、井戸水19.1%（令和3年度データ）³⁾でダムや河川の割合が高いですが、100%地下水を利用している地域もあります。このように地下水が

*総合地球環境学研究所 基盤研究部

水源の場合には、添加する薬品量が少なく、引いてはおいしいと感じるかたが多いと考えられます。また、市販されている水は良好な帯水層を有する地域の地下水や湧水を採取していることが多く、仮に水道水の水源と市販されている水の水源が同じであれば、水の水質は殆ど変わりがありません。そのため、一様に水道水=おいしくない、という訳ではなく、水道水の味は水源とも深く関係していることとなります。

3. 硬度と水の味

溶存成分のうち、特に味に関わっているのはカルシウムイオン (Ca^{2+}) とマグネシウムイオン (Mg^{2+}) で、 Ca^{2+} 濃度が高いとやや甘味を感じ、 Mg^{2+} 濃度が高いと少し苦みを感じることがあります。水の Ca^{2+} や Mg^{2+} の濃度が高いと水の硬度も高くなります。硬度の区分にはいくつかの種類がありますが、WHO の基準⁴⁾によると、硬度が 60 mg/L 未満は「軟水」、60 ~ 120 mg/L は「中程度の軟水」、120 ~ 180 mg/L は「硬水」、180 mg/L 以上は「非常な硬水」に区分されています。硬度は主に地質の影響を受けて値が決まります。これは、岩石によって Ca^{2+} や Mg^{2+} の含有量や水への溶出の程度が異なるためです。日本では、河川や地下水、湧水など多くの水は軟水に区分されますが、炭酸カルシウム (CaCO_3) を主成分とする石灰岩が堆積する地域の地下水や湧水、鍾乳洞の水は硬水に区分されます。海外では地質の特徴や水の滞留時間などの要因により硬度が高い水が多く存在しており、こうした場所の水を飲むと日本の水とは明らかに味が異なると感じることでしょう。因みに、硬度が高い水では石鹸の泡立ちが悪く、また蛇口に沈殿物ができて水の流れが悪くなるという話も聞きます。このように、硬度は水の味だけでなく、生活とも関連しています。

なお、硬度 (mg/L) は Ca^{2+} (mg/L) \times 2.5 + Mg^{2+} (mg/L) \times 4.1 の式により求めることができます。一般的に、 Ca^{2+} や Mg^{2+} の濃度はイオンクロマトグラフなどの分析装置により定量しますが、市販されている水の容器のラベルには Ca^{2+} や Mg^{2+} の濃度が表示されている場合がありますので、それらを利用すれば簡単に硬度を把握することができます。最近、お店には国内外のたくさんの種類の水が市販されていますので、手軽に水の硬度と味の違いを比べることができます。また、旅行などで他の地域に出向いた際には、その場所の水道水を飲んで、普段飲んでいる水の味と比較するの

も面白いかと思います。水の種別や産地に着目して、自分好みの水を探してみたいかでしょうか。

表1 おいしい水の要件⁽²⁾に掲載されている表を元に作成)

水質項目	内容	数値
蒸発残留物	水に溶存しているミネラルなどの含有量を示します。蒸発残留物が多いと苦みや渋味などが増加します。	30~200 mg/L
硬度	水に含まれるカルシウムとマグネシウムの濃度から求めた値です。硬度が低い水(軟水)は味にくせがなく、高度が高い水(硬水)はややくせのある味になります。一般的にマグネシウムの多い水は苦みが増します。	10~100 mg/L
遊離炭酸	水に溶存している炭酸ガスを意味します。この成分が含まれると水の味はさわやかになりますが、溶存量が多いと刺激が強くなり飲みにくくなります。	3~30 mg/L
過マンガン酸カリウム消費量	有機物の量を示しています。この物質が多く溶けていると、渋味が強くなります。	3 mg/L以下
臭気強度	悪臭物質の臭いの度合いを示したものです。値が高くなるほど臭いが強くなり、不快に感じます。	3以下
残留塩素	水にカルキ臭を与えます。濃度が高いと水の味を損ねます。	0.4 mg/L以下
水温	夏場に水温が高くなると、あまりおいしくないと感じられます。冷やすことにより、おいしく飲めるようになります。	20℃以下

〈参考文献〉

- 1) 田中正敏:「水とヒトー生理的立場からー」,「人間と生活環境」, Vol.6, pp.85-91, 1999.6
- 2) 日本地下水学会編:「地下水・湧水の疑問50」, 成山堂書店, pp. 96-100, 2020
- 3) 公益財団法人 日本水道協会:水道資料室:日本の水道の現状 <http://www.jwwa.or.jp/shiryuu/water/water.html> (2024年8月30日現在)
- 4) World Health Organization: Hardness in Drinking-water. WHO Press, 2010 <https://iris.who.int/handle/10665/70168> (2024年8月30日現在)

基礎技術 講座

続・水文調査に関する 基礎技術

とみもり
富森 さとし*

K

ey Word

水文地質調査, 帯水層, 岩盤, 地下水流動系, 水位, 水頭,
水理ポテンシャル, 代表体積

1. はじめに

本稿は、前回の投稿「水文調査に関する基礎技術」の続編である。

土木分野にて実施される、いわゆる「水文調査」といえば、各種工事に伴う水利用への影響を監視することを目的に、周辺の土地・水利用の状況を調査して、水利用に係る地表水、地下水、湧水等の水位・水量・水質を観測するといったものが大半を占めていたように思われる。

前回の投稿では、トンネル掘削に伴う環境保全に関する検討を例にとり、主として利水への影響監視の視点から各種技術を紹介した。これは、「全国標準積算資料（土質調査・地質調査）」（全地連）¹⁾に示される水文調査の体系（図1）で言えば、「水文環境調査」、「水収支調査」に相当し、対象地域の水利用がどのようになっているか（あるいは、どうなるのか）ということに主眼を置いたものである。

これに対し、本稿では、対象地域の水（主に地下水）がどのようになっているかということの主眼に置いた「水文地質調査」に関する技術を紹介したい。

2. 水文地質調査とは

各種工事に伴う水利用を含む水文環境への影響について検討するためには、対象地域の水が、どこをどのように流れているのかということを知る必要がある。そのためには、まず、水が流れる器としての地形地質がどのような構造か、その器はどれほど性能が良いものかということも知る必要がある。これを調べる調査が、水文地質調査だと言って良いと思われる。これを、前述の水文調査の体系（図1）に当てはめると、「帯水層の構造調査」、

「帯水層の能力調査」となる。

本稿では、前回の投稿に引き続き、主にトンネル掘削に伴う環境保全に関する検討を想定し、水文地質調査の各種技術、その適用や解釈時の留意点等について紹介する。

また、ここでは、帯水層の構造や能力を把握するという点において、平野部における堆積層に比べ、その調査や調査結果の解釈が難しいと思われる山岳地の岩盤を主な対象とする。

なお、山岳地における水文地質調査に関する基礎技術には、一般的な地質調査の各種技術が多く含まれるが、地質調査に関する基礎技術は他の書籍に譲ることとし、本稿では地下水の調査に重点を置いて概説する。

3. 抑えておきたい基本事項

山岳地における地下水流動は、平野部に比べると流れが一様ではないことが多い。山岳地を流れる地下水は、起伏のある地形、それを形成する地質に規制され、一つの地質区分の中でも、内在する破碎帯や亀裂部（帯）に集中する等、偏在するからである。これらが、山岳地における水文地質調査を難しくしている。

これを可能な限り明らかにする水文地質調査に関する技術を幾つか紹介する前に、抑えておきたい基本事項を、以下に述べたい。

3.1 地下水流動系

地下水流動系とは、降水などの水文条件や地形・地質などの特性に支配された地下水流動の地域的総体である。図2に示されるように、地下水流動系に

*応用地質株式会社 防災・インフラ事業部 インフラ基盤コンサルティング部

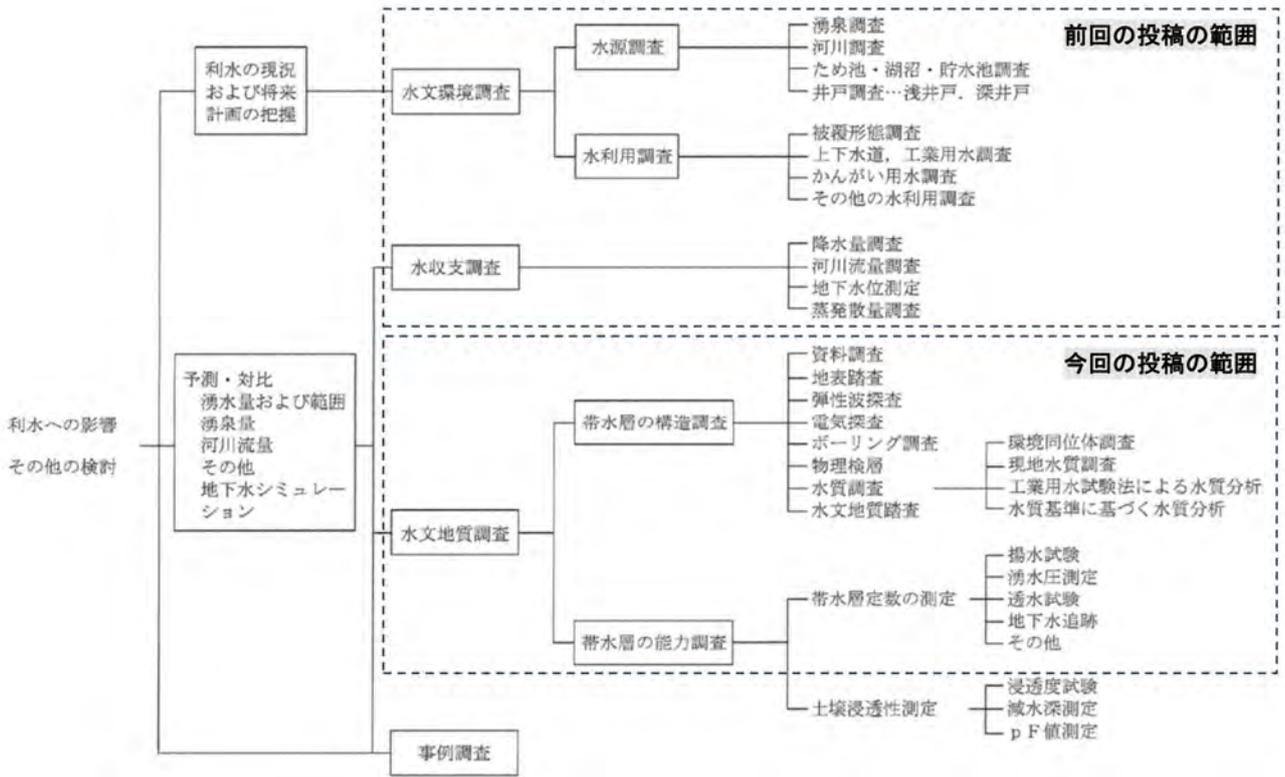


図1 利水への影響等に係る調査の体系例¹⁾

は、様々なスケールのものが混在する。主に局地的な地形の高低や地質構造に支配され、流動深度が浅く短時間で流出する流動系は局地流動系、流域の大地形に支配され流動深度が深く緩慢で大きな流れは地域（広域）流動系、それらの中間のスケールのものは中間流動系と区分される。

この概念は、山岳地、平野を問わず当てはまるものであるが、特に山岳地においては、地形・地質が比較的狭いエリア内にて大きく変化するため、土木分野における調査の対象深度の中で、様々な流動系に遭遇する可能性が高いものと考えられる。

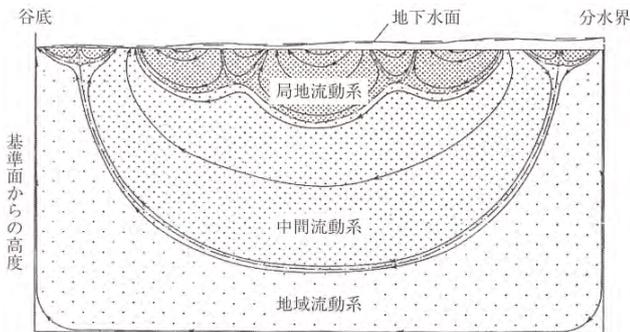


図2 地下水流動系の概念図²⁾

3.2 地下水水面と水位

前述の様々な「地下水流動系」は、調査においては水位や水質の違いによって確認されることがある。ここでは、まず「水位」について触れておきたい。

「水位」は、ボーリング調査時の掘削水位、観測孔や井戸内の水面として確認される。

不圧地下水を対象とした平野部における調査では、この水面を地下水の水位として扱ってもさほど問題になることはない。しかし、平野部における被圧帯水層や、山岳地の地山を対象とする調査においては、そのように単純な扱いは出来ない場合が多い。これは、観測孔や井戸の深さ、スクリーンの深度によって、様々な高さの水面が現れるからである。

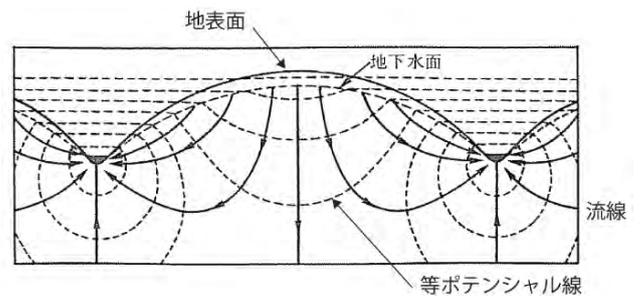


図3 均質な帯水層の流線と等ポテンシャル線³⁾

そこで認識しなくてはならないのが「水理ポテンシャル」という概念である。水理ポテンシャルとは、地下水工学の分野では「全水頭」あるいは土木の分野では略して単に「水頭」と呼ばれるものである（以降、「水頭」と呼ぶ）。

この水頭は、地下水面（不圧地下水の水位）ではない。水頭は、地中のある位置における位置エネルギー（位置水頭）と、そこに作用する圧力によるエネルギー（圧力水頭）を足し合わせたもので、平面的には同じ場所でも深度ごとに違う値となるものである。

「地下水は高いところから低いところへ向かって流れる」と言われることがあるが、正確には、**図3**に示されるように「地下水は水頭の高いところから低いところへ向かって流れる」のである。

もしも、どの深度でも地下水面と同じ水頭が確認された場合、そこでは地下水の流動方向は水平方向のみ（鉛直方向の流れ成分は無い）ということになる。しかし、特に山岳地においては、地下水面 ≠ 水頭であることが普通だと認識した方が良くであろう。何故なら、比較的狭いエリアにて地形や地質が変化する山岳地の地下水の流れは、鉛直方向の成分も少なからず存在するからである。

3.3 代表体積 (REV)

3.1 および **3.2** で述べた「地下水流動系」や「水位」は、極端なことを言えば、地形の起伏がある地域であれば、たとえ地盤が均質なものであっても、様々な状態となり得る。これをさらに複雑にするものが地盤の透水性である。

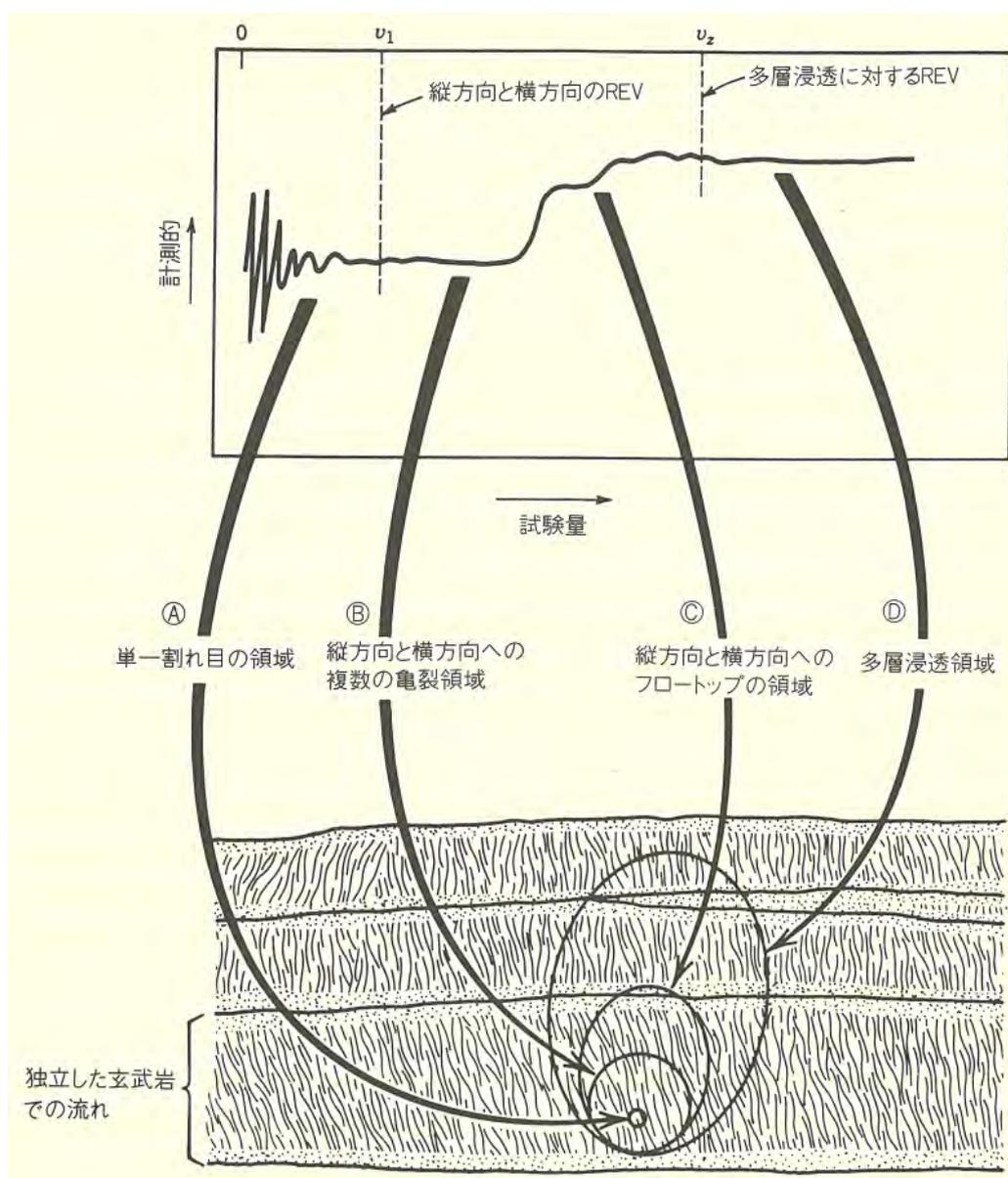


図4 代表体積 (REV) の玄武岩に関する図式定義⁴⁾

地下水は流れやすいところ、つまり透水性の大きいところを流れがちである。また、透水性が大きいところは地下水が速やかに排出されるので水頭は低くなる。

このため、山岳地における水文地質調査においても、平野での調査と同様に、地盤の透水性を把握・評価する必要があるが、平野部における堆積地盤と比較すると構造が不均質な岩盤の透水性は、その把握・評価においてはスケールの取り方が重要となる。つまり、どの範囲（領域）を均質な地盤と見なすのかということである。

この概念は、代表体積（REV：Representative Elemental Volume）と呼ばれるもので、試験や計測のスケールが小さいと、得られる値に幅が出て安定しないが、ある一定規模になると安定するというものである。これは、堆積地盤においても、室内試験で得られる透水係数と、現場透水試験により得られる透水係数が異なるということにも通じるように思われるが、岩盤が対象となると、図4に示されるように、試験や計測の規模が、破碎帯や亀裂（帯）を含むか否かによっても異なる等、REVも不明確あるいは複数存在する可能性を意識しておかなければならないものと考えられる。

4. 帯水層の構造・能力調査

ここでは、前述の水文地質調査の体系のうち、水が流れる器としての地形地質がどのような構造なのかを調べる「帯水層の構造調査」と、その帯水層がどの程度の透水性を有しているのかを調べる「帯水層の能力調査」の技術を幾つか紹介したい。

一般的な調査の進め方の順序で、「資料調査、地表踏査」、「物理探査」、「ボーリング調査」について概説する。

4.1 資料調査、地表踏査

資料調査、地表踏査は、それ以降の現地調査に入るにあたり、具体的な調査地点やその方法等の方針を決めるために、対象地域に関する既往の文献、既往の調査結果を収集整理し、現地にて地質の分布や地表水、地下水の概況を確認するものである。

ここで大事なものは、これから調査をする対象地盤を、どのようなスケールで扱い、どのような領域区分が出来そうかということ意識することである。

地表踏査では、出現する地質と湧水の関係（図5）を確認すること、また、河川水や湧水の流量や水質を測定することが有効である。特に、渇水期の流量は、より深い地下水の寄与率が高いため、対象とす

る地山を、地下水が豊富に流れているかどうかを推定する上で重要な情報である（図6）。

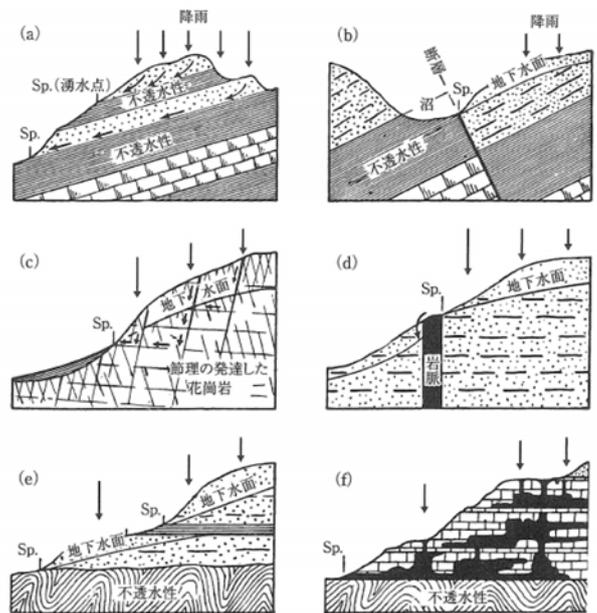


図5 地質構造と湧水の関係の模式図⁵⁾

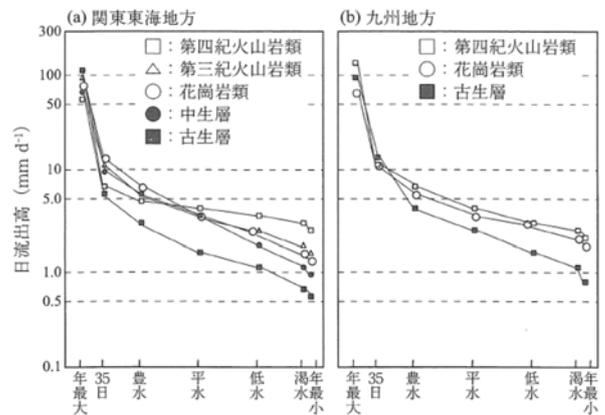


図7.16 関東東海地方 (a) および九州地方 (b) における、基盤地質による河川流況曲線の比較(虫明ほか(1981)を修正)。

図6 基盤地質による河川流況曲線の比較⁶⁾

4.2 物理探査

物理探査は、地盤の物性を測定・解析して地下の地質構成や地質構造を物性の分布として捉える調査法である。様々な手法があるが、ここでは水文地質調査にて適用する場面が多い「弾性波探査(屈折法)」と「電気探査(比抵抗2次元探査)」について概説する。

(1) 弾性波探査 (屈折法)

地表付近で人工的に弾性波を発生させ、地下の速度境界面で屈折する屈折波を地表に並べた受振器で観測し、地下の弾性波速度分布 (P波またはS波) を求める方法である。

その値と分布の傾向から、岩石の種類、硬軟、割れ目の程度、風化変質の程度、断層破碎帯の有無や規模を推定することが出来る。

屈折法は、地下深部の地層ほど弾性波速度が速くなることを想定して解析されるので、他の地質調査データと照合し、総合的な解釈を行うことが重要である。

(2) 電気探査 (比抵抗 2次元探査)

電気探査は、地盤の電気的性質を求めて地下構造を推定する方法であり、人工的に地山に電流を流し、発生した電位を測定し、地中の比抵抗分布を求めるものである。比抵抗 2次元探査では、測線上に等間隔で並べた電極を設置し、すべての組み合わせの測定を行う。

地下の比抵抗分布から、地質構造、地質構成、風化変質の程度、帯水層の分布等を推定する。

得られる比抵抗は、配置した測線での 2次元構造

を仮定するものであるため、他の地質調査資料との対比を行うことが重要である。

図 7 は、トンネル縦断方向の測線配置による比抵抗 2次元探査の結果例である。ここでは、比抵抗 2次元探査で検出された低比抵抗部と弾性波探査で検出された低速度帯とを結んで破碎帯が推定されている。

4.3 ボーリング調査

ボーリングは、掘削機 (ボーリングマシン) により地盤に細長い円筒状の穴を掘削して、地質構成や地質の状況等を直接的に把握するものである。

機械ボーリングに関する説明は、他の書籍に譲ることとし、本稿では、地下水に関する情報を直接的に調べる手法として、湧水圧試験と、ボーリング掘削後の観測孔設置 (及び観測) について概説する。

(1) 湧水圧測定

「地盤調査の方法と解説 (地盤工学会)」にて「孔内水位回復法による岩盤の透水試験方法」として掲載されるこの試験法は、トンネルの設計施工に係る調査において、地山の透水性とトンネル施工基面の水頭を確認するためによく実施される。

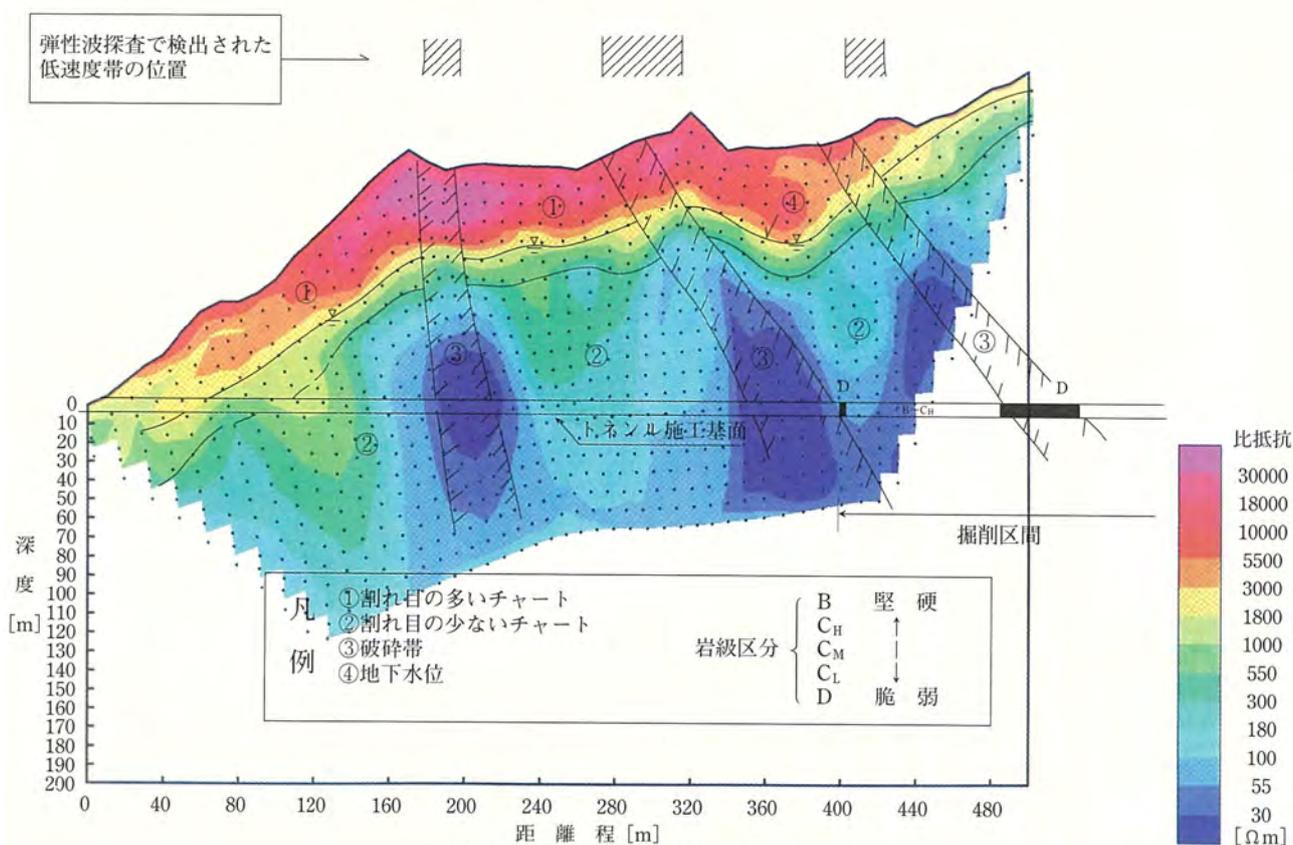


図 6.10 比抵抗映像法の解析結果と地質解釈

図 7 比抵抗 2次元探査の解析結果と地質解釈の例⁷⁾

湧水圧試験では、ボーリング孔内にパッカーとトリップバルブ（最近ではエアピンチバルブ）を先端部に取り付けた水位測定管を挿入し、パッカーを膨らませて任意の試験深度を区切った後、バルブを開放して水位測定管内の水位を回復させ、同管内の水位回復と時間の関係より透水係数を求めるとともに、回復後の平衡水位を求めるものである。透水係数が $10^{-9}\text{m/s} \sim 10^{-4}\text{m/s}$ オーダー程度の岩盤に適用される。

この手法は、原理はいたって単純ではあるものの、実際に岩盤を対象に実施する際には、留意すべき事項が多い。ここではその一部を紹介したい。

まず、試験の実施前には、ジャーミングが生じないよう孔壁の自立状況を必ず確認する必要がある。また、パッカーは、孔内水を上下方向に遮断可能な位置に設置する必要があるため、あらかじめボーリングコアやボアホールカメラ画像などを参考に、孔径の拡大状況や亀裂の有無・深度を確認しておく必要がある。

次に、パッカー膨張（加圧）後は、十分な時間をみる必要がある。何故なら、パッカー膨張前の孔内水位は、裸孔区間全体（浅部から深部）の地山地下水の水頭の影響を受けた平均的な水位になっていることと、これに加えて、ボーリング削孔水の影響も残っており、測定対象深度の水頭とは大きく異なる場合があるからである。

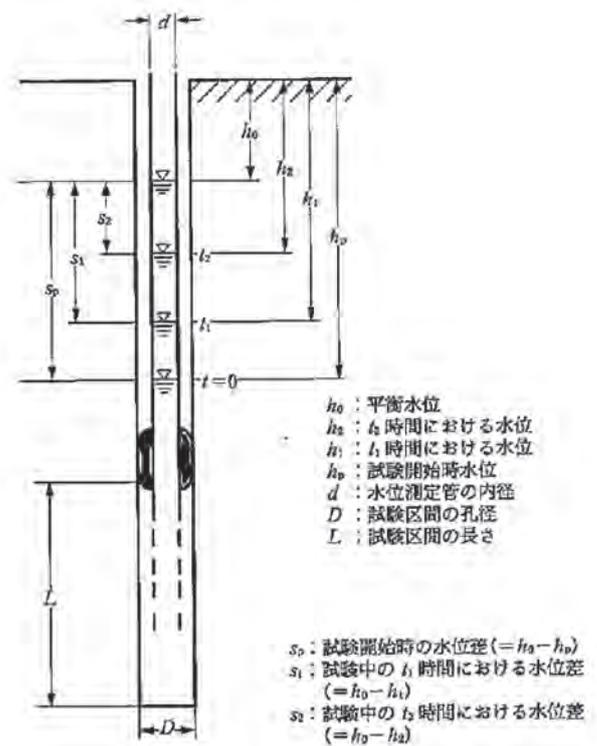
次に、バルブの開放直後は水位変化速度が大きいいため、測定時間間隔を密に設定する必要がある。また、その後、平衡水位を確認するまで、どれほどの時間を見れば良いのかということは、とても悩ましい課題である。比較的透水性の大きい地山であれば、さほど問題なく短時間にて平衡水位を得ることが出来るが、透水性が小さい地山の場合には現実的な時間内には平衡水位が得られず、現場作業工程の都合から途中で測定を打ち切らざるを得ない状況となりがちである。

そのような場合は、便宜上、バルブ開放直前の水位を平衡水位として採用することもあるが、そのためにも、前述の、パッカー膨張後の時間は十分に確保しておくことをお勧めしたい。

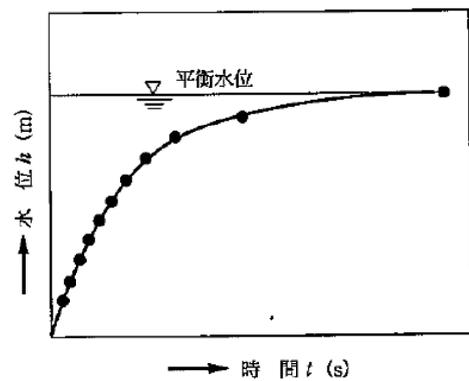
最後に、湧水圧試験の結果から地山の透水係数を評価する際に留意すべきことは、湧水圧試験は通常、亀裂が全く無くほぼ不透水と考えられる深度では実施せず、ある程度透水性を有する深度を選んで実施するものだけということである。

数か所の調査地点・深度において実施された湧水圧試験の結果（透水係数）を平均して対象岩盤の代表値とすると、実際よりも高透水な地山だという評

価になりがちである。



(1) 試験方法の例



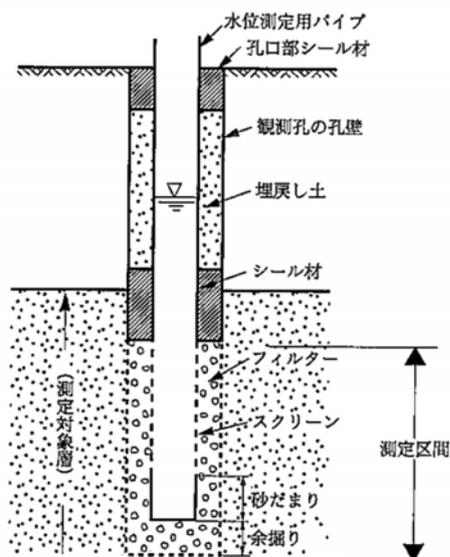
(2) 水位と測定時間の関係の例

図8 湧水圧試験の概念図⁸⁾

(2) 観測孔設置（及び観測）

ボーリング調査孔を利用し、地下水位の測定、水質調査（採水）が可能ないように観測孔を設置する際の手順と留意点について概説する。

観測孔は、図9に示されるように、一部をスクリーン加工したパイプをボーリング孔内の挿入し、パイプと孔壁の隙間をフィルター、シール材、埋め戻し土等で充填することにより設置する。フィルターには珪砂、シール材にはベントナイトペレットを用いるのが一般的である。



図A.1-観測井の例

図9 観測孔設置の模式図⁸⁾

設置にあたってまず決めなければならないのは、どの深度にスクリーンを設置するのかということである。言い換えれば、どの深度の水頭や水質を観測したいのかということである。

トンネル調査であれば、トンネル施工基面付近を

対象にすることが多いが、トンネル施工基面付近の地下水流動系とは別に、水利用に係る地下水流動系として、浅部を対象に観測孔を設置する場合も考えられる。

いずれにおいても、観測対象とする地質、深度を決めたら、その深度にスクリーンを設置し、スクリーンの上端はしっかりとシールする必要がある。なお、ボーリング孔底よりも浅い位置にスクリーン（測定管）を設置し、以深を埋め戻す場合は、測定管の下部もしっかりシールする必要がある。しっかりとシールされないと、異なる地下水流動系の水頭や水質の影響を受けた観測孔になってしまう。

測定対象深度を定めて、スクリーンとシールをしっかりと設置することの大事さを理解する上で参考となる観測事例を、図10に紹介する。

この事例は、地すべり地において、測定対象を特定の深度にはせずに全体にスクリーンを設置した観測孔（全長多孔管）による観測水位と、深度別に設置された観測孔による観測水位を比較したものである。図に示されるとおり、全長多孔管による観測水位は、深度ごとに異なる水頭の一つあるいは複数の水頭が混在したものが測定されている。

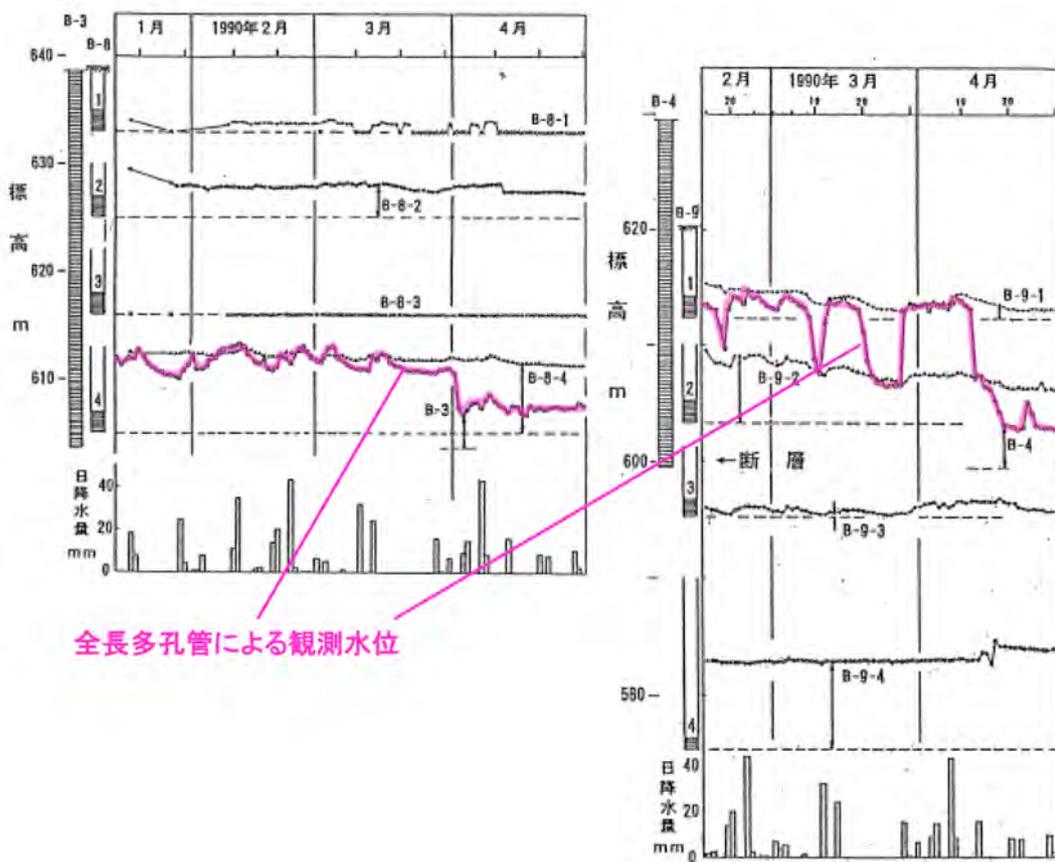


図10 全長多孔管による観測水位と深度別に設置された観測孔による観測水位の比較例⁹⁾ ※一部加筆

5. 帯水層について

前章までに「帯水層の構造・能力調査」に関する幾つかの技術を紹介してきたが、山地の特に岩盤を対象とした調査においては、そもそも「帯水層」という用語は果たして適切なのだろうか。

勿論、「地下水学用語辞典」¹⁰⁾では、「帯水層は、未固結の堆積岩のみに限定されない。地下水で飽和された亀裂や節理に富む固結堆積岩、空隙に富む火成岩、あるいは石灰岩の空洞も広い意味で帯水層といえる。」と記載はされているので決して不適切ではない。しかし、「帯水層」の“層”という文字が、帯状の構造をイメージさせるが故に、破碎帯や亀裂により偏在する地山の地下水流動に対して誤った解釈（地下水区分）がなされてしまうのではないかという懸念がある。

山地における地下水が、帯状の構造をなす帯水層中を流れるものとして安易には区分することは出来ないという問題提起となるかどうかは分からないが、山地において実施した湧水圧試験により得られた平衡水位の深度分布の一例を紹介しておきたい。

図11は、湧水圧試験結果を、縦軸に試験深度（標高換算）を、横軸に水位（標高換算）をとってプロットしたものである。なお、図中の最浅部のプロットを除き、いずれも岩盤（火成岩）にて観測された水位（水頭）である。このグラフから、浅部の水頭に対して深部の水頭は低く、その差は20m程度であるとの傾向が読み取れる。

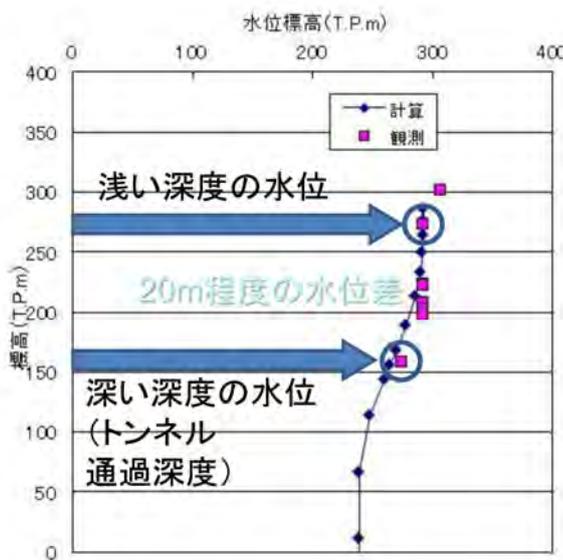


図11 湧水圧試験による平衡水位と浸透流解析によって得られた水頭の比較例

この傾向から、浅部と深部にそれぞれ異なる帯水層が分布していると分析して良いものだろうか。

そのことをさらに分析するべく、対象岩盤を単一地層としてモデル化し、均一な透水係数を設定した三次元浸透流解析（数値計算）を実施して、同地点における計算水位（水頭）の深度分布を描いてグラフに重ねた。

観測結果よりも連続的ではあるものの、均質モデルによる数値計算によっても、浅部と深部の水頭差は得られている。

6. おわりに

本稿では、前回の投稿の続編として、対象地域の水利用ではなく、地下水そのものに焦点を当てた「水文地質調査」に関する幾つかの技術を、留意点等とともに紹介した。

山岳地における水文地質調査は、従来より、地質技術者の主導により実施されてきたという印象がある。しかし、私の経験上、「水頭（水理ポテンシャル）」を工学的に理解している地質技術者は少ない。また、「地下水流動系」や「REV（代表体積）」といった概念は、地質技術者に限らず、まだまだ認識されていないように思われる。

理学的な視点と工学的な視点の両方が必要な水文地質調査が、様々な専門性を有する技術者の協働により実施され、より良い成果が得られることに、本稿が少しでも役立てば幸いである。

（参考文献）

- 1) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会：「全国標準積算資料（土質調査・地質調査）令和2年度改定歩掛版」, 2020.9
- 2) 谷口真人 編著：「地下水流動 モンスーンアジアの資源と循環」, 共立出版, 2011.5
- 3) 山本莊毅：「新版 地下水調査法」, 古今書院, 1983.1
- 4) P.A. ドミニコ, F.W. シュワルツ著, 地下水の科学研究会 訳：「地下水の科学 I」, 土木工学者, 1995.9
- 5) 登坂博行：「地圏の水環境科学」, 東京大学出版会, 2006.11
- 6) 虫明功臣, 高橋裕, 安藤義久：「日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果」, 土木学会論文報告集, 第309号, 1981.5
- 7) 島裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹：「建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法」, 古今書院, 1995.3
- 8) 公益社団法人 地盤工学会：「地盤調査の方法と解説」, 2013.3
- 9) 川上浩：「地すべり地における地下水の挙動」, 日本地すべり学会誌 45 巻 (2008) 5号 p.351-357
- 10) 山本莊毅：「地下水学用語辞典」, 古今書院, 1986.9

高品質ボーリングとボアホールカメラ 観測を用いた岩屑なだれ堆積物に対する 地質構造調査事例

おおやま ともゆき
大山 朝之*

K
ey Word

高品質ボーリング, ボアホールカメラ, 未固結, 弱固結,
岩屑なだれ堆積物, 地質構造

1. はじめに

近年、一般的となってきた地質調査方法として高品質ボーリングがある。高品質ボーリングは、断層破碎帯や地すべり土塊など、通常のボーリング手法では採取が困難な、あるいは著しく乱されたコアしか採取できない脆弱な地層を、乱れや欠損が少ない状態で採取できる。このため、ダム等の重要構造物や、地すべりなどの調査で多く用いられるようになってきている。

また近年、高品質ボーリングと組み合わせて、適用される事例が増えてきているのがボアホールカメラ観測である。ボアホールカメラは従来、孔壁が安定した良好な地層からなるボーリング孔が対象とされてきたが、ボーリングの掘進技術の向上と、現地観測の工夫により、その適用事例はますます広がってきている。高品質ボーリングは、コアとともに孔壁の状態も良好であることが多く、ボアホールカメラと相性が良い。

本稿では、私が経験した現場として、固結度の低い地層に対して、高品質ボーリングで掘削を行い、良好なコアを採取するとともに、孔壁の状態を良好に仕上げることで、ボアホールカメラ観測を可能とし、その結果、堆積物の地質構造を明らかにした事例を紹介する。

なお、本事例の内容は、筆者が全地連技術フォーラム 2023 において発表した内容を基に再構成したものである。¹⁾

2. 高品質ボーリングとボアホールカメラ

(1) 高品質ボーリング

高品質ボーリングとは具体的にどのようなボーリングを指すのであろうか。全地連の積算基準²⁾では

「ボーリングコアの軟質部や細粒分の流出を抑制することによって、柱状のコア形状を伴ったボーリングコアを原位置に近い状態で採取し品質の高いボーリングコアの観察または試験を可能とするための方法」と定義されている。

国土交通省発注の地質調査業務でも、コアの品質について「不攪乱の棒柱状でコア採取に努めること」「礫とマトリックスを乱さずに採取すること」「亀裂沿いの岩盤及び充填物を乱さずに採取すること」、などが見受けられる。

全地連の資料³⁾では、土木研究所資料⁴⁾からコアの乱れの定性的区分基準(表-1)を引用し、高品質ボーリングはこの基準の“人為的な乱れレベル1”を目指すものであること、ただし、レベル1を満たすもののみが「高品質」ではないことを述べている。

一方、これらの資料では、高品質コアを得るための手法については、特に規定されていない。安定的に高品質なコアを採取する代表的な手法としては「気泡式ボーリング」などが知られているが、通常のボーリングと比較すると特殊な装備を必要とする。坪山(2013)⁵⁾は、北海道地質研究所の資料の中で、熟練したボーリングオペレーターは通常の装備を用いて高品質コアを採取可能であることを述べるとともに、掘削技術や掘削ツールについて、具体的に紹介している。このように、通常の工法を応用し、掘削方法やツールの精度管理により、高品質コアを採取するケースが増えてきているように思う。

(2) ボアホールカメラ

ボアホールカメラには、いくつかの種類があるが、現在、地質調査で用いられているものは、深度方向に連続した孔壁展開画像が出力できる、スキャナータイプが主流である。

*株式会社レアックス 地質部長

表-1 コア乱れの定性的区分基準⁴⁾より一部抜粋

人為的な乱れレベル		対象	観察	強度試験	硬混じり土砂状コア(地すべり土塊)	粘土混じり角礫状コア(断層部)	亀裂性岩盤
1	乱れ小	地山と同様の状態で採取されており、傷や欠損等が全く見られない	可	可			
					乱れなし	乱れなし	乱れなし
2		コアに若干の傷や欠損、一部流失、かみ合わせの変化が見られるが、もとの地質構造が残っている。	可	条件付き可 乱れに応じ試験値を低減			
					細粒分のわずかな流失	細粒分のわずかな流失	亀裂のわずかな開口や移動
3		コアに大きな欠損や細粒分の顕著な流失、塊の移動・回転、分離が見られるなど、もとの地質構造が不明瞭になっている。	一部可	不可			
					細粒分の流失と塊のほぐれ	細粒分の流失、塊部の分離・回転	亀裂の開口や分離
4	乱れ大	焼き付け、塵状コア、明らかな破損等によりコアが攪乱され、もとの組織・構造がほとんど残っていない。	不可	不可			
					無水圧削による焼き付け	完全に分離した塵状コア	完全に分離した塵状コア

適用できるボーリング口径はφ66～120mm，適用深度については，200m以内のものが主流であるが，最大1500mまで観測可能な機種もある。

解像度については，その機種で異なるが，深度方向で0.1mm，水平方向の解像度は最高で2880ピクセルというのが，国内で普及している機種の中で最高品質⁶⁾である。

適用条件として，従来は孔壁の自立性が高い，安定した岩盤を対象とし，孔内水にも高い透明性が求められていた。しかし，近年は現地観測の工夫⁷⁾などもあり，その適用範囲は広がり，地すべり調査や断層調査⁸⁾などにも，多く用いられるようになってきている。

本紹介事例で用いたのは，レアックス社製のBIP-V ODSという機種である。ボアホールカメラの模式構成図を図-1に示す。また，使用機器の仕様を表-2に示す。

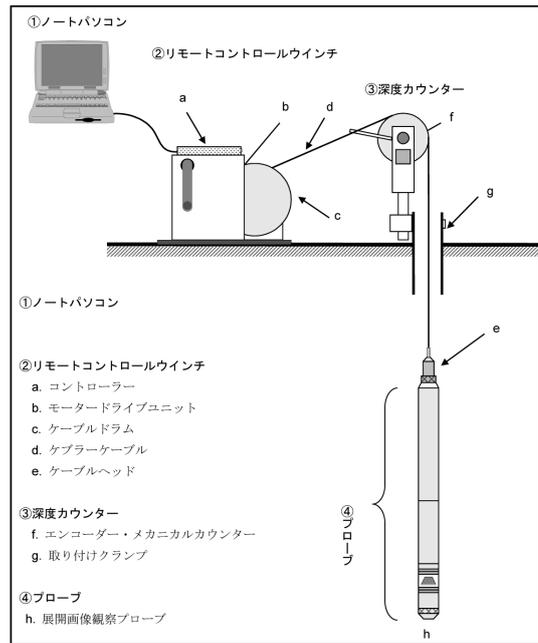


図-1 ボアホールカメラの模式構成図

表-2 レアックス社製 BIP-V ODS の仕様

項目	BIP-V ODS
水平解像度	360/720 pixel
深度解像度	0.25mm
計測スピード	54m/h
プローブサイズ	φ=50mm、L=1030mm、重量 6kg
適用口径	φ56～120mm
適用温度	0～40℃(結露なきこと)
計測長	標準 200m(最大 300m)
電源	AC100V

3. 調査事例の概要

今回事例として紹介する調査地は，比高が数100mの相対的な急斜面と，遷緩線を境にそれより低標高部に分布する長さ数kmの緩斜面の組み合わせからなる，大規模な崩壊地形の中に位置し，岩屑なだれ堆積物による地すべりの存在の可能性が指摘されている地点である。

山体崩壊に起因する岩屑なだれ堆積物は一般に，流動性が高く，広い範囲に分布する⁹⁾ことや，給源

の地質構造を残している大型の岩塊を含む¹⁰⁾といった特徴を持ち、このため、堆積物全体の分布形状や、その内部構造を把握することは難しい場合が多い。

調査地に分布する主な地質は、岩屑なだれ堆積物 (Rd) と、火山性堆積物 (At) である。

岩屑なだれ堆積物 (Rd) は、第四紀更新世の堆積物で、硬質礫を含む未固結～弱固結の堆積物からなり、全体に凝灰角礫岩様の岩相を呈する。

火山性堆積物 (At) は、岩屑なだれ堆積物 (Rd) の基盤として分布している新第三紀中新世の地層で、自破砕安山岩、安山岩、変質安山岩質火山角礫岩、火山円礫岩などの岩相からなり、広域的な熱水変質の影響が見られるものの、岩質は概ね硬質である。

調査は、岩屑なだれ堆積物分布域のうち、地すべりの可能性が指摘されている山麓緩斜面上で、2本のボーリング (高品質) を斜面傾斜方向に配置するとともに、各孔でボアホールカメラ観測を行い、岩屑なだれ堆積物の底面の方向や、堆積物中の岩相不連続面構造を把握して、岩屑なだれ堆積物の分布形状やその地すべりの可能性について検討したものである。

4. 調査結果

(1) 岩相不連続部

高品質ボーリングによるボーリングコアの詳細観察では、岩屑なだれ堆積物 (Rd) 中に、いくつかの明瞭な岩相不連続部が確認された。表-3に各孔で確認された岩相不連続部とその構造、特徴を一覧で示す。地質はいずれも凝灰角礫岩様を呈する未固結～弱固結の岩相である。

表-3 岩相不連続部一覧表

B-1 孔			B-2 孔		
深度	状態	構造	深度	状態	構造
12.10 ～ 12.35m	軟質淡灰色化	下面： N45E63SE	9.35～ 9.80m	変質 淡灰色化	下面： N38W51SW
28.52 ～ 29.45m	基質粘土状	下面： N13W50W	16.52 ～ 17.20m	変質 淡灰色化	下面： N85W55S
34.40 ～ 34.84m	基質軟質 淡灰色化	下面： N20W10W	A～E：図-5の走向傾斜記号 に対応		

表-3に示した不連続面について、ボアホールカメラ画像と高品質ボーリングコアを対比した (図-2)。その結果、両者はその深度や形状、傾斜角において、良好な一致を示し、ボアホールカメラによる情報と、高品質ボーリングコアによる情報は、互いに補完しあえることが確認できた。

(2) 岩屑なだれ堆積物 (Rd) 下面

B-1 孔の深度 41m 付近では、岩屑なだれ堆積物 (Rd) の下面が確認された。ボアホールカメラ画像から取得した走向傾斜は N76° W24°N であった (図-3)。

5. 地質構造の検討

(1) 岩屑なだれ堆積物 (Rd) の下面構造の検討

ボーリングの2地点を直線で結んだ測線 (1 測線) の断面図を作成し、岩屑なだれ堆積物 (Rd) の堆積構造を検討した (図-4)。その結果、B-1 地点での岩屑なだれ堆積物 (Rd) 下面標高に比べて、より地盤標高の低い B-2 地点の岩屑なだれ堆積物 (Rd) 下面の標高のほうが高く、地表面の起伏とは不調和であることが示された。

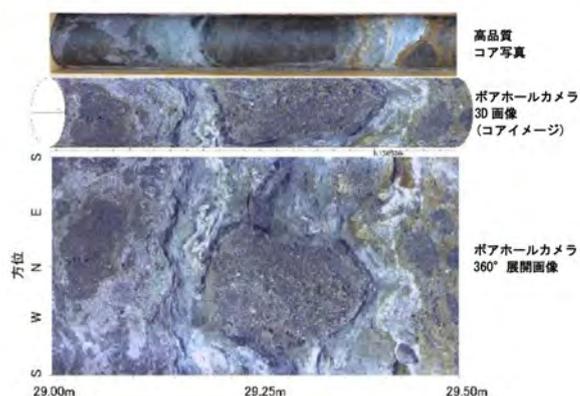


図-2 高品質コアとボアホールカメラ画像の対比例

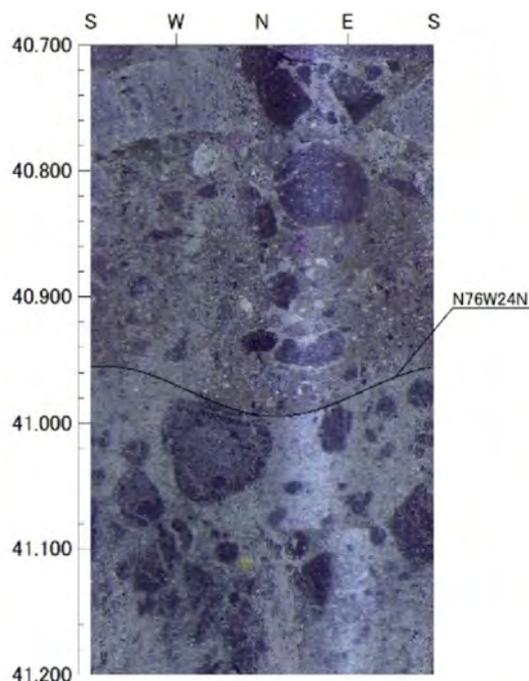


図-3 ボアホールカメラでとらえられた岩屑なだれ堆積物 (Rd) の下面構造 (B-1 孔 深度 40.9～41.0m)

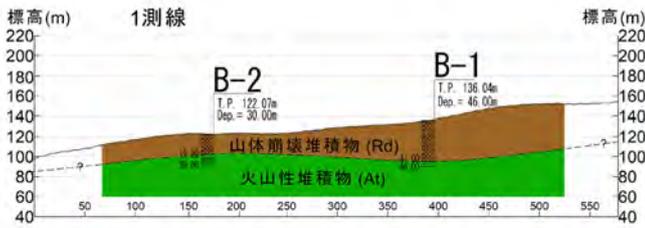


図-4 1測線 地質断面図

(2) 地すべりの可能性についての検討

岩屑なだれ堆積物 (Rd) 中には、表-3に示したように、いくつかの明瞭な岩相不連続部が確認された。これらの岩相不連続部はいずれも、軟質化部あるいは粘土状部を伴っており、このような弱部が地すべりのすべり面を形成している可能性について検討した。

その結果、これらの岩相不連続部の境界面は、西～南～南東方向に傾斜しており(表-3)、現況斜面の傾斜方向から想定される滑動方向(北～北東方向)とは一致しないことが明らかとなった(図-5)。また、ボーリングコアで岩相不連続部の分離面を確認したところ、斜面の傾斜方向と調和的な条線や鏡肌のような、重力による変動を反映した現象は見られなかった。以上の特徴は、これらの岩相不連続部が、現地形における地すべり変動を反映したものではないことを示唆する。

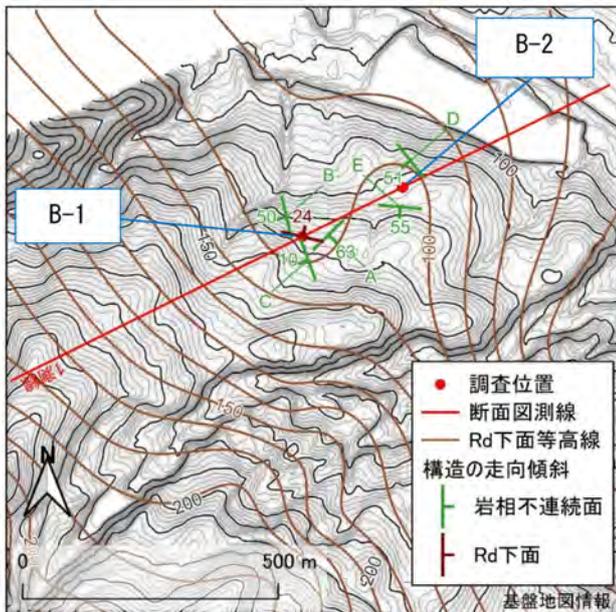


図-5 岩屑なだれ堆積物の下面等高線図とボアホールカメラ観測により得られた地質構造の走向傾斜

6. おわりに

本稿では、未固結～弱固結の岩屑なだれ堆積物

に対し、高品質ボーリングとボアホールカメラ観測によって堆積物の内部構造の詳細や下底面の構造を把握し、その結果、地すべりの可能性について考察した事例について紹介した。

高品質ボーリングでは、掘削後の孔壁も乱れの少ない状態で保持されることから、未固結～弱固結の堆積物でも孔壁が自立する条件下であれば、ボアホールカメラ観測で良好な画像が得られることが多い。両者の併用による地質調査は相互の情報補完に繋がるものである。

本事例が、固結度の低い地質に対する構造解析調査の参考となり、これらの技術の更なる発展に繋がれば幸いである。

(引用・参考文献)

- 1) 大山朝之, 向井和行: 「山体崩壊堆積物に対する堆積構造把握のための調査事例」, 全地連「技術フォーラム2023」横浜 論文集, 【C076】, 2023
- 2) (一社) 全国地質調査業協会連合会: 全国標準積算資料(土質調査・地質調査) 令和5年度改定歩掛版, III-52, 2023
- 3) (一社) 全国地質調査業協会連合会: 全国標準積算資料(土質調査・地質調査) 高品質ボーリング積算基準(案), 2022
- 4) 佐々木靖人, 阿南修司, 矢島良紀, 松尾達也: 「高品質ボーリングコアを利用した地質性状評価に関する研究」, 土木研究所成果報告書, 2016
- 5) 坪山厚実: 「地すべりボーリング調査の計画と掘削技術」, 土砂災害軽減のための地すべり活動度評価手法マニュアル, pp103-109, 2013
- 6) 佐藤伸哉, 金内昌直, 立野直樹: 「高解像度ボアホールスキャナーの概要と適用性について」, 全地連「技術フォーラム2015」名古屋 論文集, 【1】, 2015
- 7) 流喜彦, 狩野正也, 喜多淳滋: 「濁水中で良質なボアホールカメラ画像を取得するための工夫」, 全地連「技術フォーラム2021」大阪 論文集, 【044】, 2021
- 8) 小松原琢, 富浦裕司, 郡谷順英: 「ボーリング孔壁のボアホールカメラ撮影画像を用いた沖積層の構造調査」, 活断層・古地震研究報告, No.22, pp17-31, 2022
- 9) 井口隆: 「日本の第四紀火山で生じた山体崩壊・岩屑なだれの特徴・発生状況・規模と運動形態・崩壊地形・流動堆積状況・発生原因について」, 日本地すべり学会誌 42 巻 5 号, pp409-420, 2006
- 10) 鎌田浩毅, 須田恵理子, 齋藤武士, 飯澤功, 酒井敏: 「火山体崩壊に伴う岩屑なだれの流動メカニズムの実験的解析と地質堆積物への適用」, 材料 51 巻 2 号, pp168-175, 2002

大地の恵み

宮水

～灘酒をささえる天与の霊水～

1. はじめに

学生の頃から今までにいろいろなお酒を飲んできた。たとえば、

- 教官の「俺の酒が飲めないのか？」に、よるこんで飲み干したやかん酒。
- 締め切り期日の夜が明けて、納品済ませた昼下がり蕎麦屋の熱燗銚子。
- 須磨浦でかがやく朝日に背を押され、稜線歩き終えた宝塚の夜更け酒。

今となっては忘れられないことばかりである。

さて、お酒といえば日本酒、日本酒といえば「灘・伏見」といわれるように、神戸と京都は日本酒の二大生産地である。国税庁の統計¹⁾によると、令和5酒造年度（令和5年7月1日～翌6月30日）の清酒製造数量は、兵庫県が一位で二位が京都府となっている。さらに兵庫県の製造量の74%が灘五郷（今津郷，西宮郷，魚崎郷，御影郷，西郷），同様に伏見が京都府の98%を占めている。そして、日本酒はその80%以上が水である。ここではその酒造に欠かせない水，とりわけ灘の酒づくりに重要な「宮水」に焦点をあてて紹介したい。

2. 「宮水」とは

宮水とは、兵庫県西宮市のごく限られた地域でしか採れない地下水である。江戸時代の終わりのころより、酒造りに適した水であることが見出され、それ以来、灘の酒造りをささえてきた水。それが「宮水」である。その採水井戸（井戸場）は図1に示すように、いまの阪神高速道路の南側に集中する。以前はより南に位置していたが、西宮港の修築工事や昭和9年の室戸台風などの影響により、しだいに北上し、現在の位置まで移動してきた。図には、明治時代以前（第一次宮水地帯）、大正から昭和のはじめころ（第二次宮水地帯）、そして現在（第三次宮水地帯）の

位置を示している³⁾。今の地図では地理環境がはっきりしないため、明治42（1909）年に測量された地形図²⁾を図1に示す。この時代の鉄道はJR神戸線（当時は省線）と阪神電車があり、阪急神戸線や今津線はまだ敷設されておらず、阪神高速道路も国道2号もまだない。



図1 明治末頃の西宮市沿岸部²⁾に加筆

3. 宮水地帯の地形地質

かつての西宮沿岸部の海岸線が、田岡（1959）³⁾によって推定されている（図1）。当時は海が現在の阪急神戸線付近まで複雑に深く入り込み、「津門の入り海」と呼ばれていた。宮水地帯は、現在の阪急夙川駅の南から南東方向に突き出た砂嘴の先端付

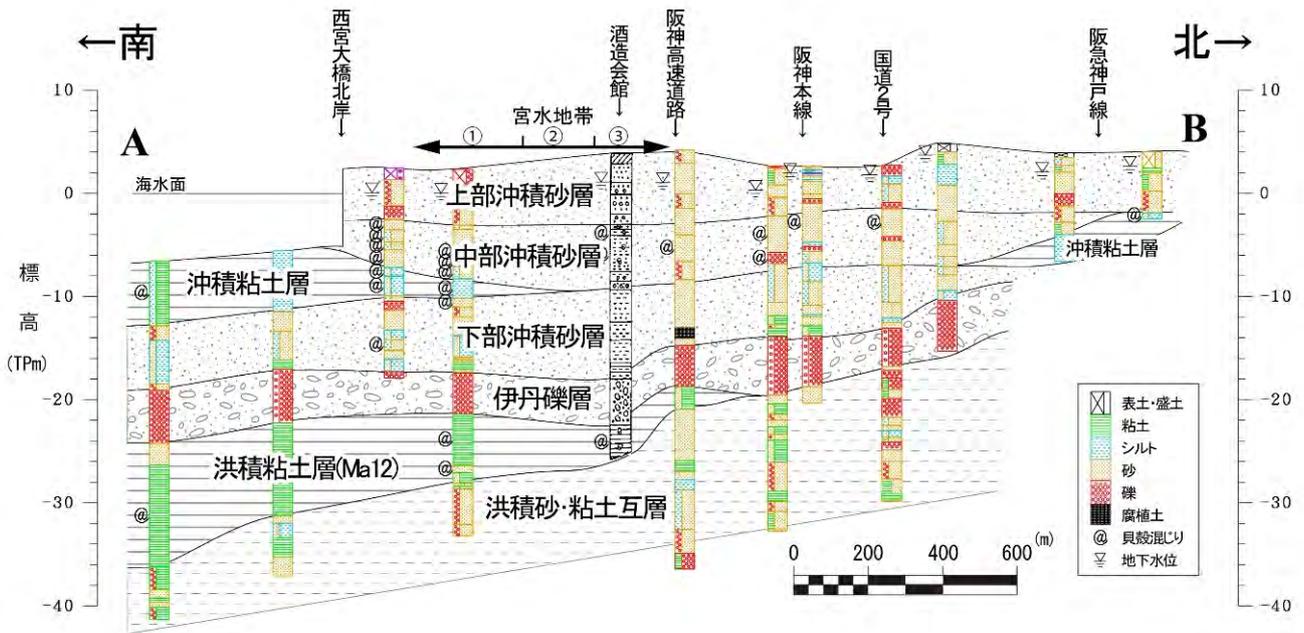


図2 宮水地帯をとる南北地質断面図

近にあたる。この地帯の地下水の涵養源となる河川は、夙川、東川（御手洗川）、六湛寺川などと考えられ、済川（1989）⁴⁾によれば、戒伏流水と法安寺伏流水が、海浜砂などと適度に混じり合い（絶妙にブレンドされ）この付近に供給されているようである。

この地域の地盤を見るため、図2に宮水地帯をとる南北方向の地質断面図を作成した。作成に際して、ボーリングデータは関西圏地盤情報データベース⁵⁾を使用し、酒造会館の柱状図は先の済川（1989）⁴⁾から引用した。

この地域の地盤構成は、土木地質的には地表より沖積層と洪積層に大別される。沖積層は全般に砂質土が優勢であり、上部、中部、下部に三分される。中部沖積砂層は場所によって沖積粘土となり、現在の海底に堆積する粘土に連続し、貝殻片を多く含む。沖積層は2万年前ころの水期最盛期以降の堆積物であり、沖積粘土層の堆積は約1万年前の縄文時代に始まる。沖積層の下位には洪積砂礫層（伊丹礫層）、その下に10万年前ころの海底に堆積したMa12と呼ばれる洪積粘土層が続き、さらにその下位の洪積砂・粘土互層となっている。

宮水は地表から深さ3～5m付近を流れる上部沖積砂層中の地下水流であり、シルトなどの混入により透水性がやや低く貝殻片を含む中部沖積砂層の上位を流れている。それにより生物の有機成分が溶け込んでいる可能性もあろう。宮水の化学成分を見てみると、カルシウムやマグネシウムなどのミネラル成分が多く、鉄分が少ない特徴があり、ま

たリンが特異的に多いのも大きな特徴のひとつとなっている。

このように異なる水系の伏流水が混合していたり、海陸が複雑に入り組んだ地下を流化していたりするため、さまざまな要因が絡み合った結果に生まれた恵みの水が宮水なのかもしれない。

4. おわりに

残念ながら宮水を合成することはできないらしい。そのため、西宮市は地下水保全のための条例を制定したり、また保存調査会などが設立されたりして、原状の保全が進められているようである。

造ることが出来なければ、今あるものを大切に使うていくしかないのである。

[末廣 匡基：株式会社 阪神コンサルタンツ]

〈参考文献〉

- 1) 国税庁（2025）：清酒の製造状況等について。
<https://www.nta.go.jp/taxes/sake/index.htm>
- 2) 地図資料編集会編（2001）：正式二万分の一地形図集成 [関西]。柏書房，181p.
- 3) 田岡香逸（1959）：宮水。西宮市史，p.69-109.
- 4) 済川要（1989）：名水を訪ねて（5）「宮水」。地下水学会誌，vol.31，no.1，p.57-62.
- 5) 関西圏地盤情報データベース
<https://www.kg-net2005.jp/index/db02.html>

各地の博物館巡り

東北大学

東北大学総合学術博物館



外観

はじめに

東北大学総合学術博物館は、1995年に理学部自然史標本館として設立され、その後の組織改編に伴い、全学の標本・資料を管理する総合学術博物館となり、現在に至っています。当館には、東北大学の「研究第一主義」の理念のもとで開学以来100年以上にわたって収集・作成された約240万点を越えるコレクションがあり、これらは古生物学、岩石・鉱物学、金属学、化学、生物学、地理学、考古学、美術史など幅広い分野に及びます。

展示内容

○地球生史

先カンブリア時代から第四紀までの国内外の貴重な化石が展示されています。背景の復元画は学生によって描かれた当館オリジナルのもので、実際の展示標本をモチーフに描かれています。



カンブリア紀・オルドビス紀（右）とシルル紀（左）の標本と復元画の展示



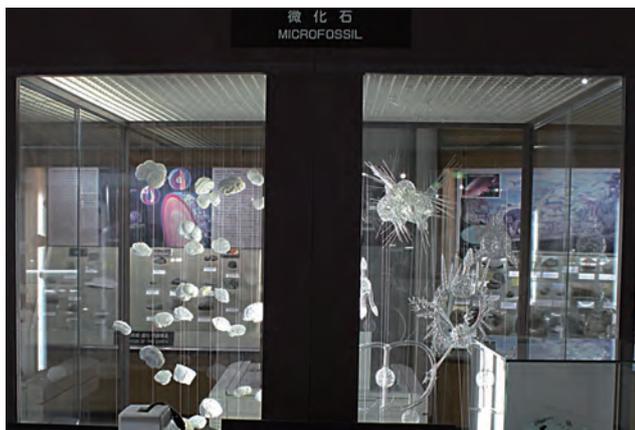
世界最古級の魚竜である「ウタツサウルス ハタイイ」のホロタイプ標本。宮城県南三陸町から産出しました。化石の産地は国の天然記念物に指定されています。



開館以来、当館のシンボルとなっているステゴサウルスのレプリカ

○微化石

東北大学は微化石の研究で世界をリードしてきました。半澤征四郎教授の作成した浮遊性有孔虫化石の石膏模型や、理学部ガラス工場の技官によってつくられた放射虫化石のガラス模型が展示されています。微化石の展示は国内外の博物館でもかなり珍しい存在です。



放射虫化石（左：ガラス製）と浮遊性有孔虫化石（右：石膏製）の拡大模型

○津波堆積物

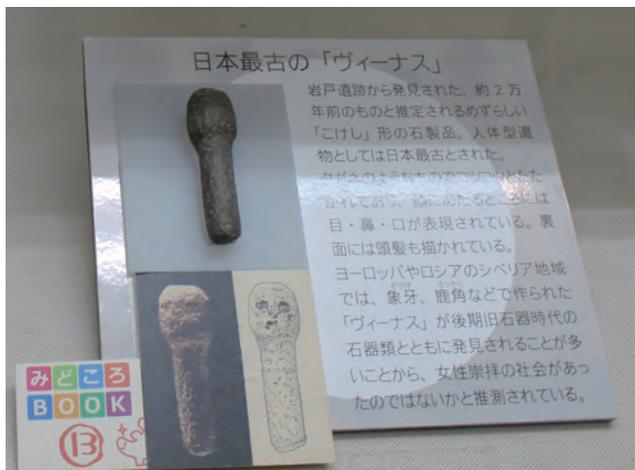


展示標本には津波堆積物の砂礫層が数多く挟まっています。

東日本大震災後に岩手県沿岸でジオスライサーにより採取された、津波堆積物を含む地層の剥ぎ取り標本が展示されています。6000年前の十和田中せりテフラの堆積から2011年の東日本大震災の発生まで、この地域が繰り返し津波に襲われてきたことが一目でわかります。展示標本には津波堆積物の砂礫層が数多く挟まっています。

○考古資料

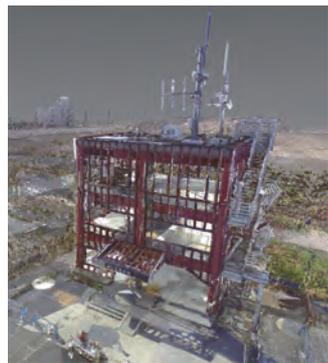
土偶、土器、石器など文学研究科の所蔵する貴重な資料が展示されています。



岩戸遺跡から発見された約2万年前の「こけし」型の人体型遺物

○震災遺構のデジタルアーカイブ

当館の職員らによって記録された2011年東日本大震災の被災遺構の3次元クラウドデータのデジタルアーカイブ。震災直後の沿岸各地の様子をバーチャルリアリティで見ることができ、防災教育に活用されています（一般公開は動画のみ）。



南三陸町の旧防災庁舎の被災後の様子

○石ガチャ・缶バッジガチャ

鉱物、岩石、化石などが入った手作りの石ガチャを引くことができます（無料、ただし不定期で開催）。子供から大人まで大人気の企画です。右側は学生の運営するみちのく博物館の缶バッジガチャ（有料100円）で、当館の展示物をモチーフにした缶バッジが入っています。



石ガチャ（左）と缶バッジガチャ（右）。石ガチャには、入っている岩石・鉱物などの解説もついています。

ご利用案内

●所在地・連絡先

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
TEL/FAX：022-795-6767

●開館時間

10：00～16：00
月曜定休（月曜が祝日の場合は祝日明け）
年末年始、お盆期間等にも休館日あり。

●入館料

大人：150円（団体：120円）
小・中学生：80円（団体：60円）
幼児・乳児は無料。
団体は20名様以上。詳細は下記のホームページ参照

●ホームページ

<https://www.museum.tohoku.ac.jp/>

【東北大学総合学術博物館 教授 高嶋 礼詩】

各地の残すべき

地形・地質

ほくしょうがた

北松型地すべりにおける地形と地質（長崎県）

1. はじめに

九州の北西部に突き出る半島は「北松浦半島」と呼ばれ（図1参照）、これに属する長崎県北部から佐賀県北西部では、古くより日本有数の地すべり地帯として知られています（図2参照）。地すべりが多発する背景には、本地域における特異的な地質構造が大きく関係しており、ここで発生する大規模な地すべり様式は主に「北松型地すべり」として分類されています。

ここでは「北松型地すべり」について、地形と地質を交えて紹介したいと思います。



図1 半島位置図

図2 北松浦半島における地すべり地形分布図¹⁾

2. 北松浦半島における地質

北松浦半島における主な地質は、第三紀の佐世保層群（炭層や凝灰岩を挟む砂岩・泥岩互層主体）を基盤とし、上位に砂礫層及び北松浦玄武岩類が不整合に覆い、溶岩台地を形成しています（図3参照）。

図3 北松浦半島における地質図²⁾

3. 北松型地すべりの発生機構

図4に示すように、玄武岩台地の下位に分布する堆積岩類との間には、しばしば厚さ数mの砂礫層を挟んでいます。玄武岩台地に降った雨は、亀裂が発達した玄武岩を通して下位の砂礫層に達するほか、玄武岩は亀裂に雨水を貯留するなど、スポンジのような役目を果たします。このため、下位の砂礫層に絶えず地下水を供給し続けます。また、砂礫層直下の堆積岩類は一般に難透水層となるため、常に地下水は砂礫層を流れ、そこでは粘土化してすべり面を形成し、上位の玄武岩が滑動します（第一次すべり）。

次のステージでは、地下水が斜面上に停滞した一次すべりの碎屑物の基底を流れることにより、新たにすべり面を形成し、碎屑物を主体としたすべりが発生します（第二次すべり）。

このような特異的な地質要因で地すべりが発生するため、玄武岩台地の周縁部で多くの地すべり地形が確認できます（図5参照）。

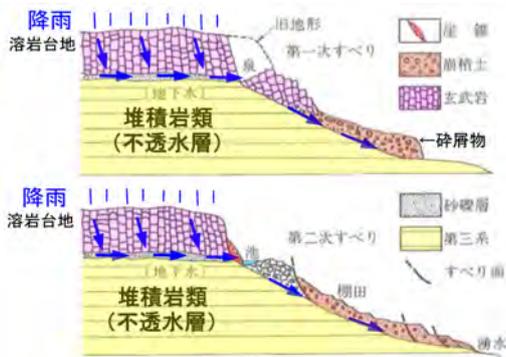


図4 北松型地すべり説明図³⁾に加筆、着色

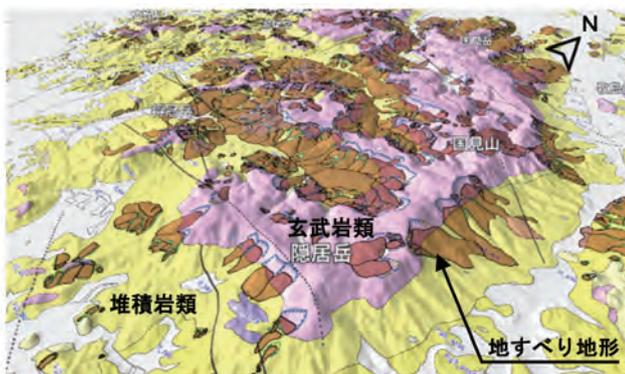
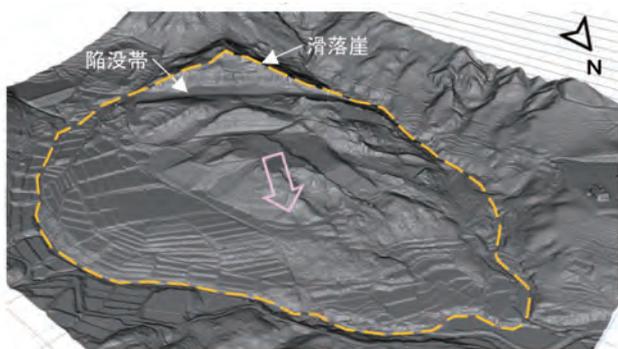


図5 北松浦半島における地質と地すべり分布図⁴⁾

4. 地形判読でみる地すべり地形

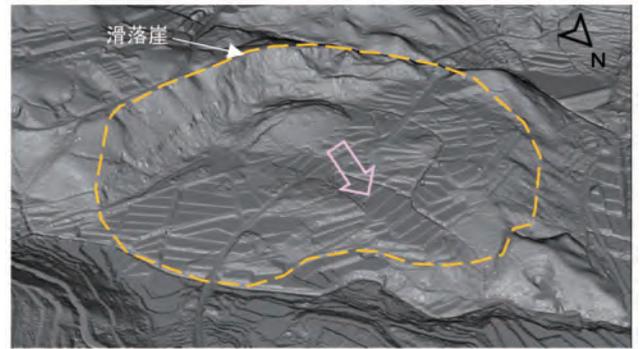
ここでは、代表的な北松型地すべりを例に、地形判読でみた地すべり地形をご紹介します。⁵⁾

(1) 平山地すべり（長崎県佐世保市吉井町）



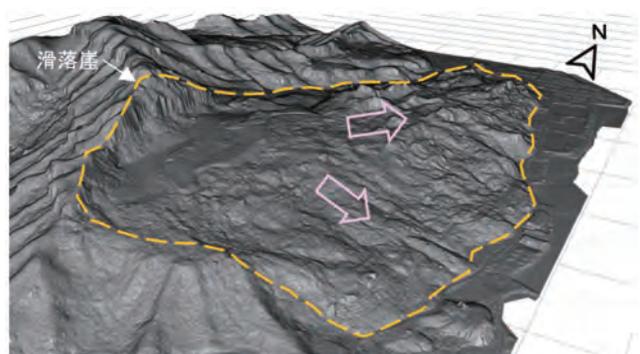
最大幅 960m, 奥行 760m, 移動面積 56ha を有し、北松型地すべりの中でも最大規模を有します。

(2) 樽川内地すべり（長崎県佐世保市吉井町）



最大幅 650m, 奥行 500m, 移動面積 47ha を有し、平山地すべりに隣接しています。

(3) 大瀬地すべり（長崎県佐世保市小佐々町）



南北 1,060m, 東西 460m, 移動面積 50ha を有する大規模岩盤地すべりになります。

5. おわりに

このように九州北西部には、特異的な地質構造を反映して数多くの地すべりがあります。地形判読を通して、地質構造や地すべり地形の抽出などチャレンジしてみてもはいかがでしょうか。

[株式会社昭和ボーリング 永井 宏樹]

〈参考文献〉

- 1) スーパー地形アプリを使用（カシミール3D スーパー地形, 防災科学技術研究所）
- 2) スーパー地形アプリを使用（カシミール3D スーパー地形, 20万分の1日本シームレス地質図V2）
- 3) 山崎達雄：九州の地すべり概観, 土質工学会九州支部30年記念誌
- 4) スーパー地形アプリを使用（20万分の1日本シームレス地質図V2, 防災科学技術研究所）
- 5) 3次元点群データ：オープンナガサキを使用

地層処分事業と地質調査の展望（後編）

にしざき あきら ひろ たしょうご よしむら きみたか
西崎 耀*, 廣田 翔伍*, 吉村 公孝*

K

Key Word

地層処分, 放射性廃棄物, 地下深部, リスク, 地質環境特性, 地質調査,
物理探査, 地表踏査, ボーリング調査

8. 前編をうけて

前編（2024年第2号掲載）では、高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物の最終処分方法として地層処分が検討されてきた経緯に触れ、地層処分の仕組み、地層処分を検討するうえで安全性に影響を与えるリスク要因の具体例を挙げ、その対策についてサイト選定による対策、設計による対策、安全性の確認のイタレーションに触れて紹介した。また、サイト選定における法定プロセスを文献調査・概要調査・精密調査の三段階に分けて解説した。

後編では、原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という。）で実施してきた地質環境調査・評価技術の開発や北海道の二地点（寿都町及び神恵内村）で実施した文献調査について紹介する。また、文献調査から概要調査に進む際に考慮すべき要件や今後の展望についても述べていく。

9. 地質環境調査・評価の内容

前編4章で述べたように、地層処分における閉鎖後長期の安全性の確保の基本概念は、「隔離」及び「閉じ込め」である。これらを達成するために、地質環境には廃棄物を物理的に隔離し人間生活環境との間に長期にわたって十分な距離をとること、そして天然バリアとして、あるいは人工バリアの設置環境として好ましい特性を持ち、それが長期にわたって維持されることが求められる（経済産業省資源エネルギー庁、2014）。適切な地質環境を選定するため、サイト選定の各段階において、空間スケール及び対象とする地質学的な事象やプロセスなどを絞り込みつつ、段階的に詳細度を高めながら地質環境調査・評価を展開する。

地質環境調査・評価の実施内容は大きく三つに分けられる。一つ目は地層処分の観点で明らかに適格性が劣ると判断される範囲を除外することである。この段階で考慮する影響要因として、例えば火山・火成活動、地震・断層活動、著しい隆起・侵食といった自然現象は、その著しい影響により廃棄体を人間の生活環境に接近あるいは露出させる可能性や、地層処分の観点で好ましい地質環境特性を損なわせる可能性があるため、その影響を避ける。また、鉱物資源の存在及び深度300m以深に分布する第四紀未固結堆積物についても、それぞれ廃棄体への意図的でない人間の侵入等を誘発する可能性、坑道の掘削に支障が出る可能性を考慮し避ける。

二つ目は、閉じ込めの観点から地質環境特性を評価して明らかに適格性が劣る範囲を除外することである。ここでは、例えば物理探査やボーリング調査、ボーリング孔を用いた水理試験、採取した試料の分析、室内試験を通じて地質・地質構造、熱環境、水理場、力学場、化学場の調査を行う。明らかに適格性が劣る範囲の例として、活断層、破砕帯または地下水の水流が地下施設に悪影響を及ぼすような範囲がある。

三つ目は、過去から現在までの時間的・空間的変遷を把握して、変化の幅を定量化することにより、将来10万年程度を超えるような長期にわたって閉じ込めの観点から好ましい地質環境特性が安定に維持されることを確認することである。地質環境特性は、処分場内部で生じるさまざまな擾乱や、隆起・侵食及び気候・海水準変動などの自然現象の緩慢かつ累積的な影響によって長期にわたって少しずつ変化する。この変化の幅を考慮に

*原子力発電環境整備機構 技術部

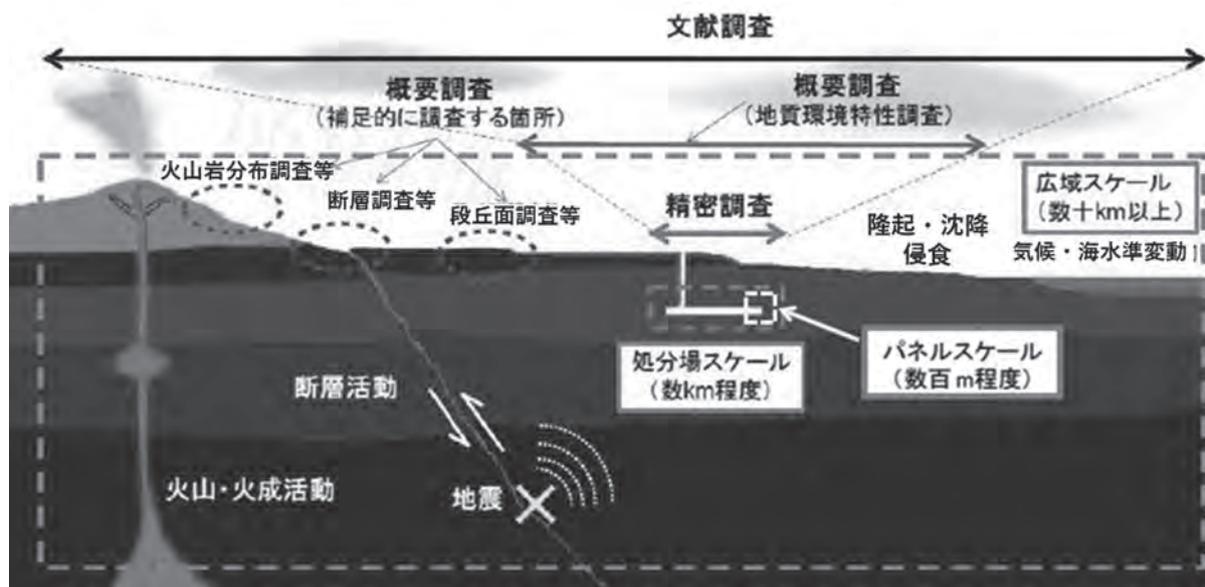


図1 サイト調査の範囲と地質環境モデルのスケールの関係 (NUMO, 2021)

入れても地層処分の観点から好ましい地質環境特性が維持されるかどうかの予測のために、文献・資料の収集・整理を通じた過去から現在までに生じたプレート運動などについての検討を行うほか、地表地質踏査、物理探査やボーリング調査などの情報に基づいた地質構造発達史や古地理、隆起・沈降の詳細な履歴に関する検討を行う。

実際に地質環境の調査・評価を進めるうえでは、最新の技術開発成果なども踏まえ、サイトが有する地質環境や土地利用などに関するさまざまな条件に応じて、その時点で利用可能であり、調査や評価の目的に対して最適かつ最も信頼性の高い技術を適用して実施する。NUMOは、我が国の多様な地質環境を対象に調査・評価を的確に実施するという観点から、個別の調査・評価技術について、取得する地質環境情報、目的、手法、適用方法・事例、有効性や技術的課題などを包括的に取りまとめている (NUMO, 2021)。

10. 地質環境モデルによる地質環境情報の統合

地質環境調査により取得したさまざまな地質環境情報は、地質・地質構造の概念を共通の基盤として分野間で整合的に解釈したうえで、地層・岩体及び地質構造の空間分布・幾何形状、地層・岩体の熱的・水理学的・力学的特性や地下水の水質の空間分布といった地質環境特性の現在の状態を二次元的あるいは三次元的に表現 (可視化) した地質環境モデルとして統合する。また、地質環境特性の長期変遷につ

いても概念的にモデル化する。これにより、地質環境調査を通じて取得するさまざまな地質環境情報を処分場の設計及び安全評価にも利用可能な形式で整理し、地質環境の理解度や不確実性の種類や程度などに係る認識を共有することが可能となる。

地質環境モデルはサイト選定の各段階で構築される。段階的なサイト調査におけるサイト調査の範囲と地質環境モデルのスケールを **図1** に示す。文献調査段階では、隔離機能を損なう可能性がある自然現象や広域の地下水流動場を考慮して、適切な処分場の位置を設定するためのサイトを包含する数十 km × 数十 km 程度の広域スケールの地質環境モデルを構築する。概要調査段階においては、広域スケールの地質環境モデル内の適切な位置において、廃棄体を定置する区画 (以下、処分区画という) のレイアウトなどを設計するための処分場全体を包含する、数 km × 数 km 程度の処分場スケールの地質環境モデルを構築する。精密調査段階では、処分場スケールの地質環境モデル内において、処分区画の形状及び人工バリアの形状や処分坑道の仕様などを設計するための処分区画を包含する、数百 m × 数百 m 程度の詳細なパネルスケールの地質環境モデルを構築する。また、調査段階が進み、新たな地質環境情報を取得するに伴い、既に構築されている地質環境モデルの精緻化を図る。

地質環境調査で取得された地質環境情報を地質環境モデルとして統合するとともに、例えば地質環境モデルを用いた地下水流動解析などを実施する。こうして整備された情報は安全機能に十分な余裕を持

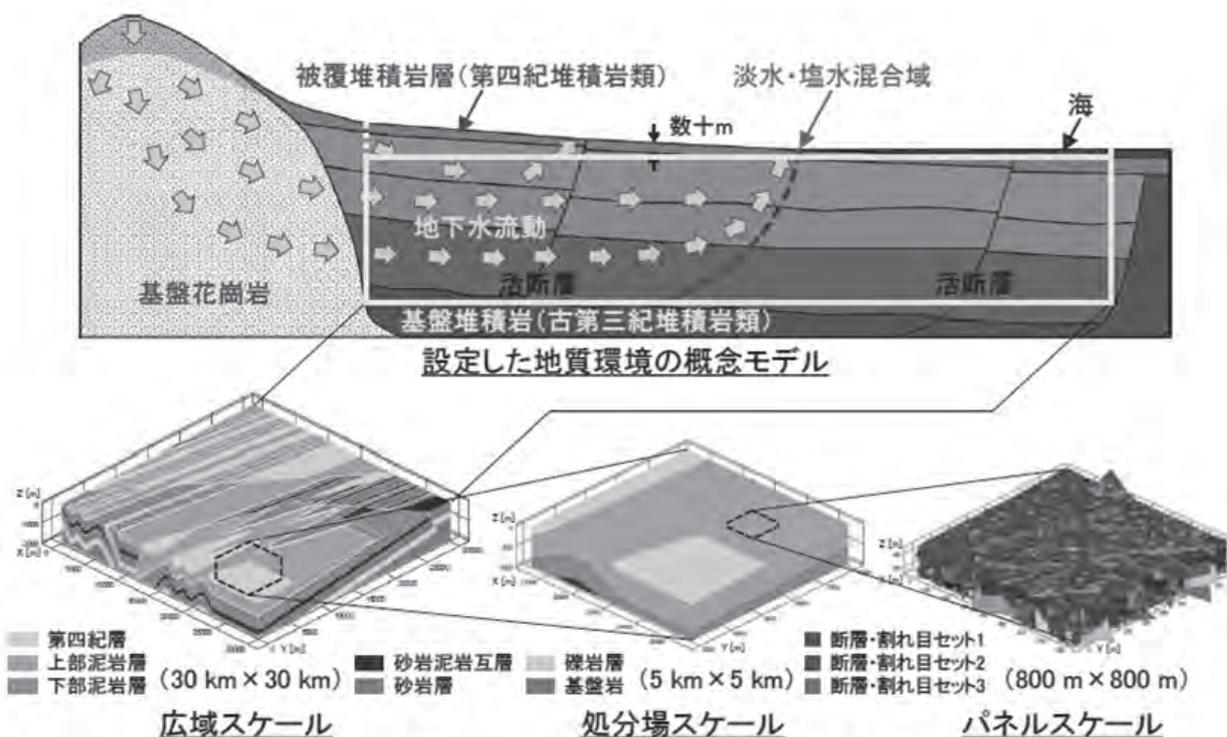


図2 新第三紀堆積岩類を検討対象母岩としたときの地質環境の概念モデル及びそれぞれの空間スケールに応じた地質構造モデル (NUMO, 2021)

たせた処分場を設計し、安全評価において必要となる地質環境情報として提供するために用いられる。

サイト選定の各段階において、構築された地質環境モデルに基づいた処分場の工学的実現性及び閉鎖後長期の安全性に係る検討を通じて、閉鎖前と閉鎖後長期の安全性、及び建設・操業・閉鎖の工学的実現性を充足する処分場の仕様例を具体的に示す。また、この検討を通じて優先的に調査・評価すべき地質環境情報を特定し、これを踏まえつつ次段階の調査地区の選定や、調査計画を策定する。このように、処分場の設計及び安全評価に係る一連の検討において、地質環境モデルは重要な基盤となっている。

実際に地質環境モデルの構築とそれを活用した処分場の設計と安全評価を行った事例として、包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で行われたものを紹介する。包括的技術報告書では、全国規模で収集した最新の地質環境情報などをもとに、我が国の多様な地質環境を処分場の設計及び安全評価の観点から重要となる特徴に着目して類型化し、サイト選定において対象となる可能性がある岩石として深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類を代表的な母岩 (検討対象母岩) と設定した。

そのうえで、岩体や地層の規模、地下深部において認められる断層・割れ目の卓越方位、長さ、分布密度に加え、岩盤基質及び断層・割れの透水係数な

どを考慮して、空間スケールに応じた地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築した。例として、新第三紀堆積岩類の地質を検討対象母岩としたときの地質環境の概念モデル及び広域スケール、処分場スケール、パネルスケールの地質構造モデルを図2に示す。あわせて、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) が実施する幌延での深地層の研究施設計画や東濃鉱山における地層科学研究の成果 (Yoshida, 1994, Yoshida et al. 1994, 杉山ほか, 2003) などに基づき、放射性物質の移行・遅延を支配する数十 mm スケールの微細透水構造の概念モデル化を行うとともに、全国規模で収集した地質環境情報によって地下水水質及び岩盤の力学的特性のモデル化を行った。

同報告書で行われた、構築した地質環境モデルを用いた処分場の設計から安全評価までの一連の検討の一部として、新第三紀堆積岩類を検討対象母岩とした地下施設レイアウトの設計を行った事例を図3に示す。図3では、処分場スケールの地質環境モデルを対象として、閉鎖後長期の安全確保の観点から相対的に長い地下水移行時間を確保できること、建設・操業時に支障となる大量湧水などの発生可能性が高いと考えられる、長さ1～10 km程度の規模の大きな断層を避けることといった観点から処分区画を設置するとともに、効率的に建設・操業・閉鎖

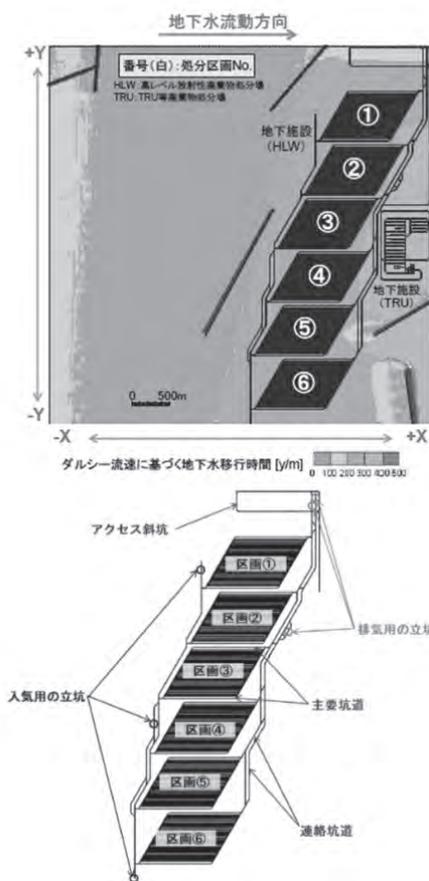


図3 廃棄体豎置き・緩衝材ブロック方式のパネル型坑道における地下施設のレイアウト例(上)と各種坑道の配置図(下)(カラー版は引用先を参照)(NUMO, 2021)

を行えるかという観点から連絡坑道・アクセス坑道などを配置している。地質環境モデルと、それに対応して設計された地下施設の仕様といった情報は、最新の科学的知見に基づいた安全評価に使用され、処分場閉鎖後の長期安全性の議論に活用される。

11. 北海道寿都町及び神恵内村を対象とした文献調査の実施

次に、実際に行われたサイト選定における法定プロセスとして、北海道二地点での文献調査について紹介する。

文献調査のプロセスは「文献調査の開始」、「文献・データの収集」、「文献・データに基づく評価」、「報告書の作成／地域の皆さまへのご説明」の4つから構成される。このプロセスのうち、「文献・データの収集」では、地質などに関して、学会や国の研究機関により地域別に整備されている文献・データや、特定の地域に関する学術論文等の文献・データを詳細に調べる。「文献・データに基づく評価」で

は、収集した文献・データをもとに、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(以下、「最終処分法」という。)に定める文献調査で評価する要件に基づいて概要調査地区の候補を検討する。

2020年11月17日より、北海道の寿都町及び神恵内村で文献調査を開始した。それぞれの陸域の町全域や村全域に加えて海岸線から15 km程度以内の大陸棚の範囲を文献調査対象地区とした。

この調査は、最終処分法及び「特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項」(NRA, 2022; 以下、「考慮事項」という。)などを参照して策定された「文献調査段階の評価の考え方」(経済産業省資源エネルギー庁, 2023)を主なよりどころとした。これに従って、最終処分法に定められた要件(以下、「法定要件」という。)に対応した「地震・活断層」、「噴火」、「隆起・侵食」、「第四紀の未固結堆積物」、「鉱物資源」に加えて「考慮事項」において示されている地熱資源については避けるべき基準に基づいて評価するとともに、地層や岩体、断層などの分布や地質環境特性を取りまとめ、閉じ込め機能や建設可能性の観点からの検討を行う技術的観点からの検討、土地の利用制限などの経済社会的観点からの検討を実施した。

寿都町では避けるべき基準に該当する場所は無く文献調査対象地区全域を概要調査地区の候補としたが、このような避けるべき基準に該当するとまでは評価できなかったものの概要調査に向けて留意すべきと考えられる事項として、白炭断層などを挙げている。

神恵内村では、文献調査対象地区外の北東に位置する積丹岳から15 km以内の範囲を除外し、その他の場所を概要調査対象地区の候補とした。概要調査に向けて留意すべきと考えられる事項として、熊追山などを挙げている。

技術的観点からの検討については、両町村とも適切ではない場所の回避やより好ましい場所の選択には至らず、地形から推定される比較的大きい動水勾配(閉じ込め機能の観点)やハイアロクラスタイト(現地調査における地質環境特性データ取得の観点)などを概要調査に向けて留意すべきと考えられる事項とした。

経済社会的観点からの検討については、神恵内村の積丹岳から15 km以内にある神恵内トドマツ遣伝資源希少固体保護林が土地利用が原則許可されない地域であることを確認した。

12. 文献調査報告書の公表とその後のプロセスについて

前章で示した文献調査のプロセスの「報告書の作成／地域の皆さまへのご説明」では、上記の北海道二地点における調査・評価の内容を「文献調査報告書」（NUMO, 2024）としてまとめて2024年11月22日に対象自治体の首長に提出し、法令に基づいて文献調査報告書等の縦覧・説明会の開催・意見書の提出に関する公告を実施した。そして法令に基づく説明会について、寿都町においては2024年11月30日に、神恵内村においては2024年12月6、7日に文献調査報告書等に関する説明会を開催し、北海道内の振興局所在自治体においては2024年12月12日から順次開催した。この後、報告書に対するご意見を受理、集約及びこれらに対するNUMOとしての見解を作成したのち、NUMOから経済産業大臣へ申請を行う。経済産業大臣は対象の市町村長及び都道府県知事へ意見照会を行い、経済産業大臣により概要調査の実施是非が判断される。この時、対象の市町村長及び都道府県知事の意見が反対の場合には先の概要調査には進まないこととなる。

なお、概要調査に関しても、最終処分法において調査事項・評価要件が定められており、例えば、文献調査では「地震等の自然現象による地層の著しい変動」の「記録がないこと」や「将来のリスクが少ないこと」となっているのに対し、概要調査では「長期間生じていないこと」が求められている。また、「坑道の掘削に支障がないこと」や「活断層、破碎帯又は地下水の水流が地下施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないこと」が求められていることも概要調査の特徴の一つとなっている。原子力規制委員会の「考慮事項」において、各段階で得られた情報に基づき適切に考慮されるべきとされており、概要調査では、これらの考慮事項について、最終処分法における概要調査の位置づけなどを踏まえた調査・評価が実施される。

13. 地層処分事業の視点からの地質調査業界への期待

地層処分の実現には段階的なサイト選定調査により長期的なリスクを回避すること、安全な建設・操業が可能な地点を選定することが重要である。そのため、各段階の情報の詳細度に応じた処分場の設計及び安全評価に係る検討を行いながら、調査地区の処分場を設置する場所として各段階の法定要件や考慮事項の要件などを満たし、技術的及び経済社会的観点から適性を判断していく。

今後、概要調査に進むことができた場合は、一連の地質環境調査について体系的に調査計画を考えていくことになる。具体的には、地表踏査、物理探査、ボーリング調査などの空中、海上及び地上からの調査により、概要調査段階の法定要件ならびに考慮事項などの要件を満たす対象地層等を選ぶために、概要調査地区の候補の地区ごとの特徴も参照しながら、まずは概要調査地区の候補全体を見たうえで、次に対象地層等を中心に段階的調査していくことが考えられる。

NUMOが2021年に公表した包括的技術報告書（NUMO, 2021）においては、調査によって把握される地質構造や地質環境特性に基づいて地質環境モデルの精緻化を図るとともに、地質環境特性の長期変遷に係る概念モデルを構築することが示されている。これらの作業を通じて、法定要件や考慮事項の要件などを満たし、選定する精密調査地区に不適格な範囲が含まれないことを確認するとともに、経済社会的な観点なども含めてより適切と判断される範囲が精密調査地区として選定されることになる。

また、処分場の安全性を説明するためには、サイト選定、処分場の設計及び安全評価という三つの主要な分野における作業を統合して説明を行うことが必要であり、それぞれの作業に関するさまざまな活動を連携しながら全体として効果的に実施するためのマネジメントを行う。

以上から、地層処分事業の確実な進展には、上記に関わる調査、設計、評価等の技術が必須であり、これまで地質調査業界で培われてきた手法や知見、経験を最大限活用していくことが望まれる。その中で、さまざまな分野で実績がある技術や方法を活用して地質関係の調査を進めるためには、地表踏査や物理探査、ボーリング調査などに携わる地質調査業界とのより緊密な関わりが不可欠であり、今後の地層処分事業における関係各位の一層の協力を期待する。

NUMO
原子力発電環境整備機構

文献調査の状況はこちらのリンクから
https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/

NUMOの技術開発の成果はこちらのリンクから
https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/pdf/NUMO-TR-24-03.pdf

包括的技術報告書はこちらのリンクから
https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html

〈参考文献〉

- 原子力規制庁 (NRA) : 「特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項」, 原子力規制庁ホームページ, 2022
<https://www.nra.go.jp/data/000402076.pdf>
(2025年2月確認)
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) : 「包括的技術報告書: わが国における安全な地層処分の実現 —適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—」, NUMO-TR-20-03, 2021
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) : 「北海道古宇郡神恵内村文献調査報告書」, NUMO ホームページ, 2024
https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/kamoenai/pdf/01_kamoenai_honbun.pdf
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) : 「北海道寿都郡寿都町文献調査報告書」, NUMO ホームページ, 2024
https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/suttu/pdf/01_suttu_honbun.pdf
- 経済産業省 資源エネルギー庁 : 「総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ 中間とりまとめ」, 経済産業省ホームページ, 2014
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/chiso_shobun/201405_report.html
(2025年2月確認)
- 経済産業省 資源エネルギー庁 : 「文献調査段階の評価の考え方」, 経済産業省ホームページ, 2023
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/pdf/20231102.pdf (2025年2月確認)
- 杉山和稔, 池田則生, 齋藤茂幸, 諸岡幸一, 内田雅大 : 露頭観察に基づく新第三紀堆積岩中の水理・物質移行経路抽出の試み, 応用地質, Vol.43, pp.372-381, 2003
- Yoshida, H. : Relation between U-series nuclide migration and microstructural properties of sedimentary rocks, Applied Geochemistry, Vol.9, pp.479-490, 1994
- Yoshida, H., Yui, M. and Shibutani, T. : Flow-path structure in relation to nuclide migration in sedimentary rocks: An approach with field investigations and experiments for uranium migration at Tono uranium deposit, central Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.31, pp.803-812, 1994

地質調査の機械等損料

あいざわ たかお*
相澤 隆生*

K
ey Word

全国標準積算基準書，建設機械等損料表，減価償却，機械等損料，維持管理費，償却費，管理費，市場単価

1. はじめに

地質調査では、ボーリングマシン、計測機器、物理探査装置、センサーおよび室内試験器具など、様々な機材を使用する。これらの使用機材、それを使用する技術者および消耗品が、地質調査を行うために直接必要なものとなる。これらは直接調査費として、機械等損料、技術者の人件費および消耗品費の費目に分類されて積算されている。機械等損料は、直接調査費を構成する重要な費目であるにもかかわらず、技術者の間では、標準貫入試験の実施手順や、現地試験・物理探査の実施方法または室内土質試験の実施手順ほどには理解されていないことが多く、機材の減価償却費程度との理解しかなされていない場面に出くわすことが多い。ここでは、地質調査における機械等損料の内訳や全体構成について解説し、その理解を深めていただくことを目的としている。

機械等損料の算出方法については、これまで長い間、内訳や構成に特段の変更はなく、建設機械等損料表¹⁾(日本建設機械施工協会)または、全国標準積算基準書 土質調査・地質調査²⁾(全国地質調査業協会連合会；以降「赤本」と称する)では、改訂に合わせて損料や損料率が見直され³⁾ているが、機械等損料の算出方法は、これまでの間、内訳や構成に特段の変更はなく、特に赤本では30年以上に渡って地質調査における機械等損料としての算出方法が示されており、ここではその解説という位置づけも含んでいる。

2. 機械等損料の構成

地質調査を実施する際に使用する機材について、運転時の損料(運転損料)と供用時の損料(供用損料)

とを合算したものとして機械等損料が構成されている。その機械等損料は、図1に示すように、機材類の標準使用年数の期間中における、償却費、維持修繕費および管理費によって算定されるものである。

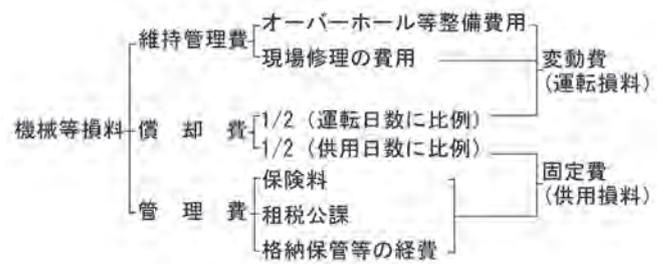


図1 機械等損料の概要図

ここで、

償却費：機械の使用又は経年による価値の減価額⁴⁾

維持修繕費：機械を標準使用年数の間使用するのに必要となる維持修理費の総額

管理費：年間管理費は、1年間に必要な、保険料・税金・格納保管等経費によって構成される

- 保険料：機械等の損害保険
- 税金：固定資産税、取得にかかる税
- 納保管等維持費：機械の格納費用、格納施設の費用、機械運用管理の事務経費

ここでのポイントは、機械等損料には、償却にかかる費用に加えて、維持修繕費および管理費の経費が含まれているという点である。2014年の改正品確法及びその後の改正法の考え方を引き合いに出すまでもなく、業務実施に必要なものは全て費用として支払われるため、地質調査の現場で使用される機材についても、減価償却・維持修繕・管理にかかる

*一般社団法人 全国地質調査業協会連合会 技術部長 工学博士

全ての費用は機械等損料として積算の対象となっている。

3. 地質調査の機械等損料

前項で、「全ての費用は機械等損料として積算の対象となっている」と述べたが、地質調査では、多くの業務種別が市場単価の対象となっていることから、市場単価の対象となるものについては、機械等損料が設計書・積算の内訳に示されていない。従って、市場単価は、既に機械等損料が含まれた価格構成となっている。

市場単価では、経済調査会及び建設物価調査会が、地質調査会社を対象に行うアンケート調査によって価格が形成されていることから、この市場調査アンケートに回答する際には、その業務単価には単位当たり（ボーリング調査であれば1m掘削当たり）の機械等損料を含めなければならない。市場単価が適用される対象としては、ボーリング調査、サウンディング、原位置試験、現場内小運搬（モノレール運搬を除く）、室内土質試験等があげられる。これらの単価について、作業にかかる人件費および消耗品費に加えて、機械等損料として償却費、維持修繕費および管理費を全て含めた価格を回答しなければならないことになっている。

4. 地質調査の機械等損料は万全か

第1章で地質調査での機械等損料について述べたが本来、機械等損料には調査を運転日（実際に機械器具を用いている間）に対するものと供用日（倉庫を出てから倉庫に戻るまでの全体日数）に対するものが、その対象となっている。従って、第3章で述べた市場単価での回答の際には、機器を使用した日数に加えて、機材の出庫から入庫までの期間である供用日に対する機械等損料も考慮しなければならないことになる。

全地連では、地質調査の機材類の利用・積算方法が公示とは異なる点を勘案し、運転日数によって供用日数分を含めた換算式を提案し、『機械等損料率』として赤本に示している。赤本に示された調査項目毎の機械等損料率を用いることによって、日当たり損料＝基礎価格×機械等損料率として、運転日損料と供用日損料を併せた機械等損料を求めることができる。

赤本に示されている、機械等損料率算定の基礎となる計算式を以下に示す。

$$\begin{aligned} & \text{運転日当たり損料率} \\ & = \frac{0.5 \times \text{償却費率} + \text{維持修繕費率}}{\text{標準使用年数} \times \text{年間標準運転日数}} \quad \text{式①} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{供用日当たり損料率} \\ & = \frac{0.5 \times \text{償却費率} + \text{年間管理費率} \times \text{標準使用年数}}{\text{標準使用年数} \times \text{年間標準供用日数}} \quad \text{式②} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{地質調査の運転日当たりの損料率} \\ & = \frac{\text{①} \times \text{年間標準運転日数} + \text{②} \times \text{年間標準供用日数}}{\text{年間標準運転日数}} \quad \text{式③} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{機械等損料率} \\ & = \frac{\text{償却費率} + \text{維持修繕費率} + \text{年間管理費率} \times \text{標準使用年数}}{\text{標準使用年数} \times \text{年間標準運転日数}} \quad \text{式④} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{地質調査機械の1日当たり損料} \\ & = \text{基礎価格} \times \text{機械等損料率} \quad \text{式⑤} \end{aligned}$$

ここで、

- 標準使用年数：必要な維持修理を行い、機械の効率を十分発揮して使用できる年数
- 年間標準運転日数：1年間の標準的な運転日数（平均）
- 年間標準供用日数：1年間の標準的な供用日数（平均）
- 償却費率：(1-残存率)で求められる。残存率は機械が使用年数を終え、廃棄される際に残る経済価値の基礎価格に対する割合
- 維持修繕費率：機械を標準使用年数の間使用するのに必要となる維持修理費の総額の、基礎価格に対する割合を%で示す
- 年間管理費率：1年間に必要な管理費の割合を基礎価格に対する%で示す
- 機械等損料率：地質調査機械の1日当たりの損料率
- 基礎価格：国内での標準仕様による機械の実勢取引価格

式①・式②は、請負工事機械経費積算要領⁴⁾（昭和49.15建設省機発第44号、最終改正令和6.228国官参イ第158号）で示された内容。式③は、式①および式②を用いて、地質調査の機材類の利用・積算方法を勘案し、運転日数によって供用日数分を含めた換算式。式④は、式③を変形した地質調査における機械等損料率の式。式⑤は、機械等損料率を用いた地質調査1日当たりの機械等損料の計算方法である。

5. まとめ

機械等損料は、“運転日当たり損料”と“供用日当たり損料”とを用いて算出するものであるが、地質調査の積算では、運転日毎に機械等損料を算出する構成となっているため、機械等損料率として、運転日当たり損料と供用日当たり損料とを運転日に換

算して1日当たりの機械等損料の算出を行っている。地質調査の機械等損料は、直接調査費と間接調査費とに計上されるものがあり、その中で市場単価に含まれたり、運転日当たりの価格として計上したりすることから、“分かりにくい”傾向にあるが、今後も分かり易い解説と、実態調査等による適正水準の策定に注力したい。

〈参考文献〉

- 1) 一般社団法人 日本建設機械施工協会：「令和6年度版 建設機械等損料表」2024年6月
- 2) 一般社団法人 全国地質調査業協会連合会：「全国標準積算基準書 土質調査・地質調査 令和5年度改訂歩掛版」
- 3) 国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室：「令和6年度建設機械等損料の改定について」，建設マネジメント技術，一般財団法人経済調査会2024年4月号，pp.28-30.
- 4) 一般社団法人 日本建設機械施工協会：「令和6年度版 建設機械等損料表」,pp. (24) - (27) ,2024年6月

令和6年度「応用地形判読士資格検定試験」, 「地質リスク・エンジニア認定試験」の合格者の決定

全地連理事会は令和6年2月、応用地形判読士資格検定試験および地質リスク・エンジニア認定試験の合格者を決定しました。各試験の合格者数は次の通りです。

応用地形判読士：	合格者数 10 名	*合格率 19%
地質リスク・エンジニア：	合格者数 10 名	*合格率 48%

全地連「技術フォーラム2025」の開催について

全地連技術フォーラムにつきまして、2025年度は下記のとおり開催する予定です。募集案内の詳細は全地連ホームページをご覧ください。

全地連「技術フォーラム2025」山形 開催概要（予定）

- 主 催：一般社団法人全国地質調査業協会連合会
- 協 力：一般社団法人東北地質調査業協会
- 開催日程：令和7年9月11日（木）～12日（金） 2日間
- 開催場所：メイン会場
山形テルサ（山形県山形市双葉町1丁目2-3）
技術者交流懇親会会場
ホテルメトロポリタン山形（山形県山形市香澄町1丁目1-1）
- 行事予定：・特別講演会 ・技術者交流懇親会 ・展示会
・技術発表会（一般セッション、現場調査技術セッション、
地質リスクマネジメント事例研究セッション）
- 募集内容 ○技術発表会の発表者募集 2月17日～4月11日
○展示会出展の募集 3月3日～4月18日
○技術発表会の聴講参加および
技術者交流懇親会の参加募集 6月20日～8月12日（予定）



全地連 HP

国土交通省「設計業務等標準積算基準書」の改定について

国土交通省は、令和7年度の積算基準書を改定し、公表しました。調査業務の主な改定ポイントは次の4点です。

- ◆ 標準貫入試験の日当たり作業量が更新
- ◆ 調査孔埋戻しの日当たり作業量が新設
- ◆ 軟弱地盤技術解析の歩掛が更新
- ◆ 旅費宿泊費の改定（公務員旅費規程の規定に伴う）

特に旅費交通費の積算では、当初は宿泊費・宿泊日当は計上せず、精算時にエビデンスを提出して国家公務員旅費規程の金額と比較して安い方で精算処理となっているようですので、今後の情報を注視してください。

全地連資格制度 令和7年度の検定試験および登録更新の実施概要について

令和7年度に実施します全地連資格制度の検定試験および登録更新は、下記のとおり実施いたします。詳しくは、申込受付の時期が近づきましたら全地連のホームページでご案内いたします。



全地連 HP

検定試験の実施予定

資格制度	地質調査技士	地質情報管理士	応用地形判読士	地質リスク・エンジニア
試験日	7月12日	同左	10月11日	10月17日
試験地	全国10会場 (北海道～沖縄)	同左	東京	東京
願書受付	4月10日～5月10日	同左	7月15日～8月15日	8月1日～9月10日
合格発表	9月10日	同左	翌年2月24日	翌年2月27日

登録更新の実施予定

資格制度	地質調査技士	地質情報管理士	応用地形判読士	地質リスク・エンジニア
更新対象者	次の年度に実施した検定試験に合格し資格登録した方 または 次の年度に実施した登録更新の手続きを完了された方			
	2020年度	2022年度	2020年度	2020年度
申込受付	9月10日～10月10日 ^{*注}	12月1日～翌年1月15日	12月1日～翌年1月15日	12月1日～翌年1月15日
更新形式	講習会受講形式または CPD記録報告形式	CPD記録報告形式	CPD記録報告形式	業務実績等報告形式

*注 CPD 記録報告形式の場合は 12 月 10 日締切

講習会の開催情報（令和7年度）

令和7年度に実施予定の全地連主催講習会および関連講習会は、下記のとおりです。なお、今後新たな講習会の開催が決まりましたら、全地連のホームページでご案内いたします。

●「応用地形判読基礎講習会」（新規）

主催：（一社）全国地質調査業協会連合会

後援：（準備中）

開催地・日程：東京：7月1日（連合会館；駿河台）

その他：開催内容に関する詳細は4月下旬に全地連ホームページに掲載予定。

●「道路防災点検技術講習会」

主催：（一社）全国地質調査業協会連合会

後援：国立研究開発法人土木研究所（予定）

開催地・日程：東京（1）：6月20日 広島：9月19日 大阪：9月26日

福岡：10月3日 東京（2）：11月14日

その他：全地連のホームページにて申込みを受け付け中です。



全地連 HP

●「地質リスクマネジメントに関わる発表会（仮称）」（新規）

主催：（一社）日本応用地質学会

（一社）全国地質調査業協会連合会

後援：（国研）土木研究所 予定

開催地・日程：東京 6月30日

その他：開催内容に関する詳細は4月下旬に全地連ホームページに掲載予定

●その他関係機関における講習会

●（一財）全国建設研修センターとの共催の研修会および研修期間

・地質調査研修 4月22日～4月22日 集合＋ライブ形式

・やさしい土質力学の基礎 6月12日～6月14日 集合＋ライブ形式

・土質設計計算（基礎講座） 7月22日～7月27日 集合＋オンデマンド形式

・土質設計計算（構造物基礎設計の演習） 9月2日～9月5日 集合＋ライブ形式

※開催内容や申し込みは、全国建設研修センターのホームページをご覧ください。



研修センター HP

●関連研修団体 富士教育訓練センターの研修会および研修期間

・地質調査技術者の入職時教育 6月23日～6月27日 集合形式

※開催内容や申し込みは、富士教育訓練センターのホームページをご覧ください。



訓練センター HP

全地連「新マーケット創出・提案型事業」 参加企業募集のご案内（VIBRES® コンソーシアム二次募集）

全地連は、需要創出に積極的に取り組む会員企業や会員企業グループの活動を支援するため、「新マーケット創出・提案型事業」を平成19年度に開始いたしました。現在、令和6年度に採択されました以下の実施テーマに基づく事業が展開しており、本事業への参加企業を募集中です（二次募集）。

この機会に、本事業への参加につきましてご検討いただければと存じます。

実施テーマ	グラウンドアンカー残存緊張力の振動式測定手法の品質確保
活動概要	<p>グラウンドアンカー（以下、アンカー）の残存緊張力は、これまでリフトオフ試験や荷重計で確認されていますが、多数のアンカーを対象として定期的に測定していくことは、安全面、費用面から、課題は大きいです。</p> <p>そこで、最近開発された安全かつ作業性に優れた振動式測定手法（VIBRES®）の測定品質を確保し、市場普及の促進を通して社会に貢献することを目的として、コンソーシアムを立ち上げ、活動を実施してきています。コンソーシアムでは、以下の3つのワーキンググループ（以下、WG）を設置し、活動を実施しています。</p> <p>(1) 技術課題WG・・・作業手順の標準化と品質の確保 (2) 標準積算WG・・・標準積算資料の作成 (3) 普及活動WG・・・啓発・普及活動募集要項</p>
募集要項	<p>二次募集のご案内</p> <p>*事業活動の詳細につきましては、4月10日開設予定の専用ホームページをご覧ください。申し込みにつきましては、次項の問い合わせ先へメールにてお願いいたします。</p> <p>①募集対象 本事業の趣旨に賛同する全地連会員企業（コア企業）、および日本国内に本社を有し、アンカーの設計・施工・施工管理・点検・調査の実績があって、本事業の趣旨に賛同する全地連非会員企業（オブザーバ企業）</p> <p>②拠出金 コア企業 40万円/年 オブザーバ企業 10万円/年</p> <p>③募集締切 令和7年5月21日</p>
お問合せ先	事業幹事会社：応用地質株式会社 vibres_unei@oyonet.oyo.co.jp

編集後記

地下水は私たちの生活や社会を支える重要な資源ですが、目に見えない存在であるため、注目される機会が少ないのが現状です。しかし、気候変動や人口増加、産業活動の拡大に伴い、地下水資源が直面する課題が顕在化し、その管理・保全の重要性がますます高まっています。

そこで本号では、地下水の科学的側面から文化的・社会的側面に至るまで幅広く取り上げ、各分野の専門家の皆様から貴重な寄稿をいただきました。巻頭言では、地下水の循環・保全をはじめ、地盤の安定や地中処分等との関係などを取り上げ、現状の解説と将来に向けての提言をいただきました。総論では、特集テーマに沿って、地下水流動の仕組みについて詳しく論じています。

小特集では、企業や自治体による地下水涵養の実践例、持続可能な資源利用に向けた取り組み、地域社会と連携した地下水保全の政策などを紹介し、地下水が「目に見えない資源」か

ら「次世代のための資産」へと位置づけられつつある変化を明らかにしました。また、地下水ガバナンスの観点から、こうした変化が2021年の水循環基本法の改正と密接に関連している点についても言及しています。

さらに、技術の進歩による地下水調査・分析の発展を取り上げ、地下水への理解が深まっている現状を紹介するとともに、地下水に関する伝承や法律を通じて、地下水が古くから人々の生活と密接に結びついてきた歴史についても掘り下げています。

その他コーナーでも、美味しい水の科学的要件や地下水を学ぶための書籍の紹介、水文調査の解説など、読者の知識を深める内容を掲載しています。是非ご一読いただけると幸いです。

最後になりましたが、本号の執筆にご協力いただいた執筆者の皆様に、心より感謝申し上げます。

(2025年4月 山田 茂治 記)

機関誌「地質と調査」編集委員会

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

委員長 鹿野 浩司

委員 尾高 潤一郎、谷川 正志、堀尾 淳、細矢 卓志、山田 茂治、杉田 健

各地区地質調査業協会

委員 北海道：舟田 幸太郎 東北：庄子 夕里絵 北陸：津嶋 剣星 関東：赤坂 幸洋 中部：今井 良則
関西：甲斐 誠士 中国：西田 宣一 四国：大岡 和俊 九州：原田 克之 沖縄県：井上 英将

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階 TEL. (03) 3518-8873 FAX. (03) 3518-8876

北海道地質調査業協会	〒060-0003	北海道札幌市中央区北 3 条西 7 丁目 1 (第 1 水産ビル 5 階)	TEL. (011) 251-5766
東北地質調査業協会	〒983-0852	宮城県仙台市宮城野区榴岡 4-1-8 (パルシティ仙台 1 階)	TEL. (022) 299-9470
北陸地質調査業協会	〒951-8051	新潟県新潟市中央区新島町通 1 ノ町 1977 番地 2 (ロイヤル礎 406)	TEL. (025) 225-8360
関東地質調査業協会	〒101-0047	東京都千代田区内神田 2-6-8 (内神田クレストビル)	TEL. (03) 3252-2961
中部地質調査業協会	〒461-0004	愛知県名古屋市中区葵 3-25-20 (ニューコーポ千種橋 403)	TEL. (052) 937-4606
関西地質調査業協会	〒550-0004	大阪府大阪市西区靱本町 1-14-15 (本町クィーパービル)	TEL. (06) 6441-0056
中国地質調査業協会	〒730-0017	広島県広島市中区鉄砲町 1-18 (佐々木ビル)	TEL. (082) 221-2666
四国地質調査業協会	〒761-8056	香川県高松市上天神町 231-1 (マリッチ F1 101)	TEL. (087) 899-5410
九州地質調査業協会	〒812-0013	福岡県福岡市博多区博多駅東 2-4-30 (いわきビル)	TEL. (092) 471-0059
沖縄県地質調査業協会	〒903-0128	沖縄県中頭郡西原町森川 143-2 (森川 106)	TEL. (098) 988-8350

機関誌 「地質と調査」 '25 年 1 号 No.165

2025 年 4 月 10 日 印刷

2025 年 4 月 20 日 発行

編集 一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階

発行所 株式会社ワコー

〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-11-7 TEL. (03) 3230-2511 FAX. (03) 3230-1381

印刷所 株式会社 高山

無断転載厳禁

印刷物・Web 上等に本誌記事を掲載する場合は、一般社団法人全国地質調査業協会連合会に許可を受けてください。

標準貫入試験の安全対策に…

40㉥× 50㉥の作業スペース。
作業床の規則に準拠し、
しゃがんでも問題ない広さを確保。

ゆったり
スペース

設置時間は
驚きの150秒

細かな
やさしさ

角をとり、丸みがあります。
手足の接触によるケガや、作業
服等のひっかかりを避けられる
よう配慮しています。

滑らない

組立が
安全

『落下防止ガイド』が付いて
ステージの取付が一人でも安全

床にはエキスバンドメタルを採用。
表面の隆起により強力に滑り止め。
軽量で強度があります。

安全デッキの使用で 『不安全な状態』を解消

組立動画



緩まない
ロッド



緩まないと評判のガイドロッド
(SWT)はこちら



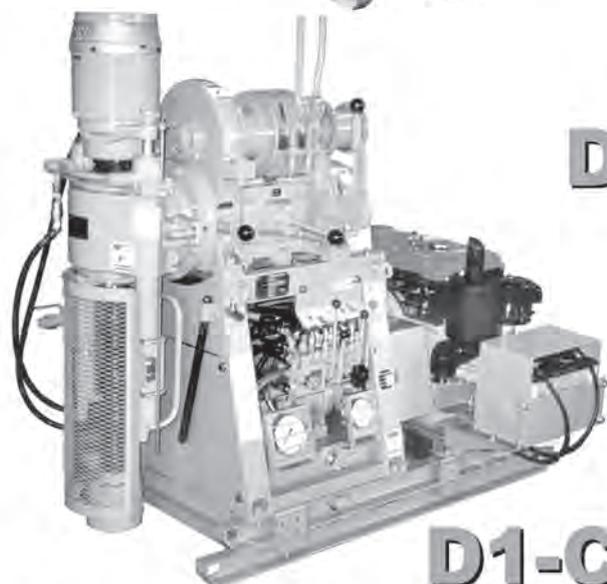
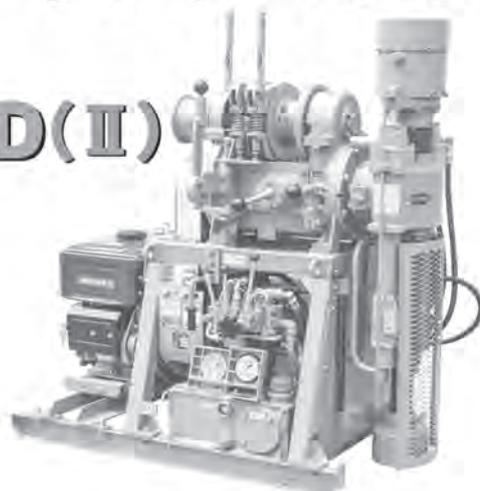
TOHO
DRILLING EQUIPMENT

小型ボーリングマシン

DM-03

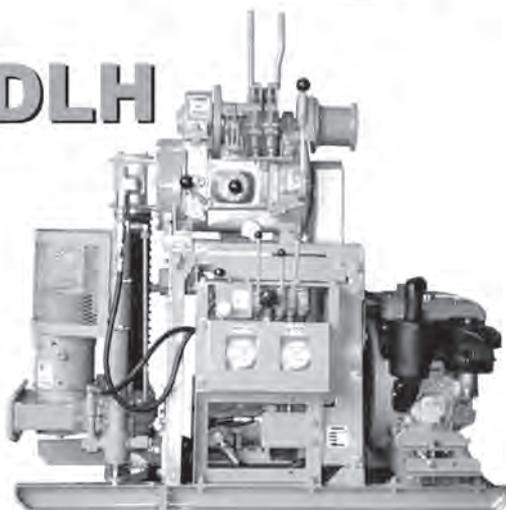


D0-D(Ⅱ)



D1-C

D0-DLH



試錐機には小型ボーリングポンプが内蔵できます。(DM-03を除く)

機種名		DM-03	D0-D(Ⅱ)	D0-DLH	D1-C
穿孔能力	m	30	100	100	280
回転数	min ⁻¹	65,125,370	(A)60,170,330 (B)110,320,625※	(A)60,170,330 (B)110,320,625※	(A)65,130,170,370 (B)90,170,320,490※
スピンドル内径	mm	47	43	43	48,58
ストローク	mm	400	500	500	500
巻上げ力	kN(kgf)	3.9(400)	5.9(600)	5.9(600)	10.8(1100)
スライド	mm		油圧式300※	油圧式300※	油圧式300
動力	kW/HP	3.7/5	3.7/5	3.7/5	5.5/8
質量	kg	180	350(油圧チャック装着時)	475	550
寸法	H×W×L mm	960×550×1115	1225×655×1285	1440×890×1415	1390×735×1580

右操作、左操作をご用意しております。 ※はオプションです。



東邦地下工機株式会社

東京都品川区東品川 3-15-8 TEL 03 (3474) 4141
福岡市博多区西月隈 5-19-53 TEL 092 (581) 3031
URL: <http://www.tohochikakoki.co.jp>

福岡 ☎ 092(581)3031
東京 ☎ 03(3474)4141
札幌 ☎ 011(376)1156
仙台 ☎ 022(235)0821
新潟 ☎ 025(284)5164
金沢 ☎ 076(235)3235

名古屋 ☎ 052(798)6667
大阪 ☎ 072(924)5022
山松 ☎ 089(953)2301
広島 ☎ 082(533)7377
熊本 ☎ 096(232)4763

地質調査

通巻165号