

福島県葛尾村で実施した TRT による見かけ熱伝導率について

新協地水株式会社 ○幸田 英顕, 藤沼 伸幸

1. はじめに

地中熱利用は、省エネルギーによって脱炭素に寄与する有力な手段であり、その利用のためには地下水の流れの影響を含む地盤の見かけ熱伝導率を求めることが重要である。見かけ熱伝導率は、熱応答試験 (TRT) ¹⁾ やケーブル方式熱応答試験 (ケーブル TCP) ^{2), 3)} などの方法によって求めることができる。これまでに福島県内の粘性土や凝灰岩を主とする 2 地点において 2022 年から 2024 年 1 月にかけて測定した見かけ熱伝導率について報告した ⁴⁾, ⁵⁾。今回は阿武隈山地の花崗岩地帯に位置する福島県葛尾村内 (図-1) において 2015 年 4 月および 2023 年 8 月に TRT によって見かけ熱伝導率を求めた結果について報告する。

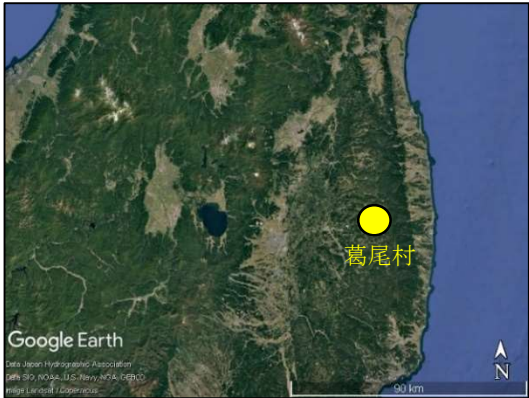


図-1 調査位置図

2. 方法

葛尾村の図-2 に示す地点の 2015 年 4 月と 2023 年 8 月に概ね深度 GL-100m を対象とした TRT を実施した。TRT は、一定加熱・温水循環方式熱応答試験 (TRT) 技術書 ¹⁾ に準拠して温水循環試験を実施した。地点 E は温水循環試験に続いて、地中熱交換器に 10m 間隔の深度に設置した T 型熱電対を使用して温度回復試験を実施した。TRT 装置は NPO 法人地中熱利用促進協会から発行された TRT 装置認定申請の手引き ⁶⁾ に則った認定装置である。なお、TRT とは別に 2023 年に地点 E から 20m 程度の距離に当社が揚水井戸を掘削している。

3. 結果

表-1 に TRT の結果である見かけ熱伝導率を示す。地点 E の温度回復試験の結果は、深度 10m ごとに求めた見かけ熱伝導率の平均値を示している。見かけ熱伝導率は 2.6 ～ 2.9W/(m・K) であった。

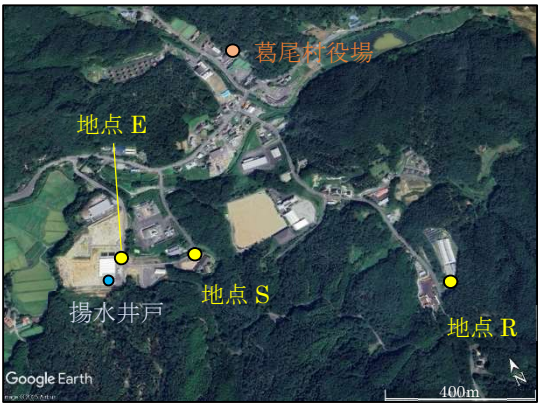


図-2 測定箇所

図-3 に揚水井戸と地点 E (ボアホール型地中熱交換器) 掘削時のさく井柱状図を示す。GL-10～15m まではまさ土であり、それ以深は風化花崗岩である。揚水井戸の掘削時は GL-24m, GL-45m, GL-60～67m において地下水の増量を確認し、GL-86～93m では 200L/min 程度の地下水量であった。施工後の適正揚水量は 160L/min である。また、地点 E の TRT の地中熱交換器設置のための掘削時には、GL-22m～23m において地下水の湧出量は数 L/min 程度であった。

表-1 熱応答試験測定結果

地点名	方法	測定期間	地中熱交換器長 m	見かけ熱伝導率 W/(m・K)
S	温水循環	2015/4/14 ～ 2015/4/17	102.0	2.97
R	温水循環	2023/7/7 ～ 2024/7/10	80.7	2.67
E	温水循環	2023/8/22 ～ 2023/8/25	100.5	2.94
E	温度回復	2023/8/25 ～ 2023/8/28	100.5	2.92

図-4 に地点 E の深度ごとの TRT (温度回復試験) の結果を示す。見かけ熱伝導率は 2.2 ～ 3.3W/(m・K) であり、GL-20m～30m 間、GL-50m～70m 間において見かけ熱伝導率が大きく変化し、より深い深度で大きな値を示している。

近接する揚水井戸の掘削時の地下水量の増加と比較すると、地点 E の深度ごとの見かけ熱伝導率が変化する深度が GL-20m～30m 間、GL-50m～70m 間において重複している。地点 E の地中熱交換器設置のための掘削時には地下水の湧出量はあまりなかったが、近接する揚水井戸の深度ごとの地下水量との関連が推定できる。

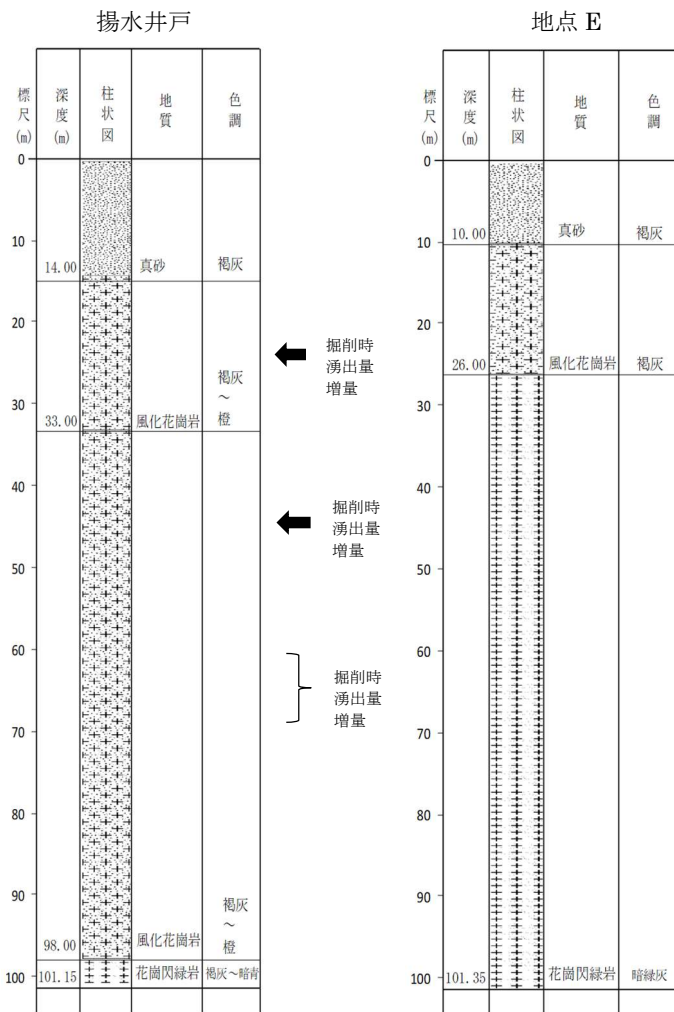


図-3 さく井柱状図

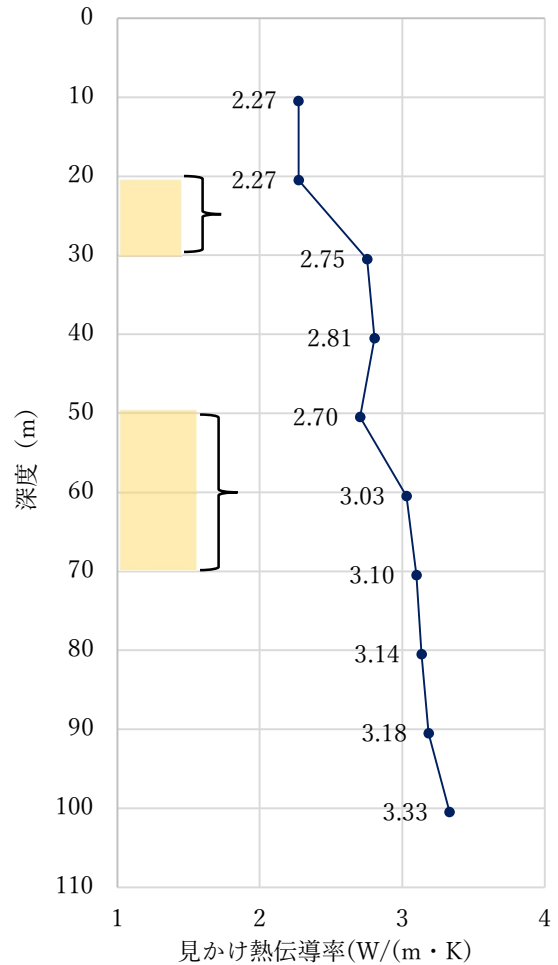


図-4 深度別の見かけ熱伝導率(地点 E)

4. まとめと今後の課題

本調査地の福島県葛尾村は花崗岩地帯であり、TRT の試験孔およびその付近の井戸のさく井柱状図から地質、地下水の状況を推定・比較した。さく井柱状図と温度回復試験の対比から、揚水井戸の湧出量が増加する深度付近において見かけ熱伝導率が増加することを確認した。TRT の試験孔にて地下水の湧出が確認できなくても、付近に揚水井戸があれば深度ごとの見かけ熱伝導率を推定できるときがあると考えられる。

揚水井戸掘削時の湧出量と温度試験結果の対比から、井戸掘削時の湧出量が増加する深度で見かけ熱伝導率が大幅に大きくなっており、原位置で地下水が確認されなくとも周辺の地下水の影響により数値が変化する可能性が示唆された。今後、揚水井戸のデータをボアホール型地中熱交換器の適地目安とできるよう同様の調査事例を増やす必要がある。

《引用・参考文献》

- 1) NPO 法人地中熱利用促進協会編：一定加熱・温水循環方式熱応答試験 (TRT) 技術書，2018. 8，p1-11.
<https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>.
- 2) 神宮寺元治，竹原孝，山口勉，国松直(2002)：貫入試験装置を用いた原位置地盤熱伝導率探査法，日本地熱学会誌，第24巻，第4号，p349-356.
- 3) 石原武志，富樫 聡，シュレスタ ガウラブ，内田洋平(2023)：地質調査孔を用いたケーブル方式熱応答試験の有効性実証，日本地熱学会誌，第45巻，第2号，p103-119.
- 4) 幸田 英顕，原 勝重，藤沼 伸幸(2023)：福島県内で測定した見かけ熱伝導率の季節変動について，全地連技術フォーラム 2023 論文集，論文 No. C049.
- 5) 幸田 英顕，原 勝重，藤沼 伸幸，富樫 聡，石原武志(2024)：福島県内で実施した TRT と TCP による見かけ熱伝導率について，全地連技術フォーラム 2024 論文集，論文 No. C074.
- 6))NPO 法人地中熱利用促進協会編：TRT 装置認定申請の手引き，2019. 10，p1-9.

現地浸透試験と室内透水試験の相関性に関する考察

株式会社新東京ジオ・システム ○村形 悠稀、清野 裕丈、高橋 健介、斉藤香織

1. はじめに

浸透施設の設計に際し、現地の透水性を把握するには、ボーリング孔や現地浸透試験等が必要となる。しかし、現場状況によっては重機を入れるスペースが無い場合や、試験で使用する多量の水の確保や運搬が出来ない等の理由で、現地浸透試験が実施出来ないことがある。この場合、土の透水試験（JISA1218:2020）¹⁾や一般値で推定することがある。だが、乱した試料で室内透水試験を行った場合、現地の地盤状況を反映していないと思われ、その再現性が問題となっている。よって今回は、現地盤の透水性を室内で再現できるのかを考えた。その一つに密度(湿潤密度)が関係していると推測し、締固めで密度を合わせれば、透水係数も近い値を示すかを検証する。

2. 試験概要

今回の検証では、試験地盤の透水係数と密度を確認し、室内試験で締固めの回数を変化させ試験地盤の密度を再現し、室内透水試験を実施する。本試験では3地点を対象に行った。それぞれ、試料A（砂礫）と試料B（砂）の地点で砂置換法による土の密度試験（JISA1214:2013）²⁾及び土研法³⁾による現地浸透試験を行った。試料C(粘性土)は現地の状況により、ブロックサンプリングで土の湿潤密度及び室内透水試験を測定した。なお、試験地盤の物理特性を把握するために試験箇所から採取した試料で物理試験を行った。

表-1 物理試験結果一覧

	試料A(砂礫)	試料B(砂)	試料C(粘性土)
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.669	2.499	2.562
自然含水比 (%)	8.2	18.0	32.6
礫分 (%)	71.3	19.9	0.9
粗砂分 (%)	11.1	18.8	0.6
中砂分 (%)	7.6	30.8	3.0
細砂分 (%)	2.1	18.5	24.0
シルト分 (%)	4.6	7.4	63.4
粘土分 (%)	3.3	4.6	8.1
最大粒径 (mm)	53	26.5	19
均等係数 (U _c)	37.73	15.09	7.44
曲率係数 (U _{c'})	2.03	1.39	2.06
20%粒径 (mm)	1.0492	0.1564	0.0229
地盤材料の分類名	細粒分まじり砂質礫	礫質砂	砂質粘性土
分類記号	(GS-F)	(SG)	(CsS)

試験の結果、上表に示す土質分類となり、これを考慮し室内透水試験は試料A、Bが定水位透水試験、試料Cが変水位透水試験で実施した。締固め回数は、物理特性を踏まえて3段階に分けて行う。

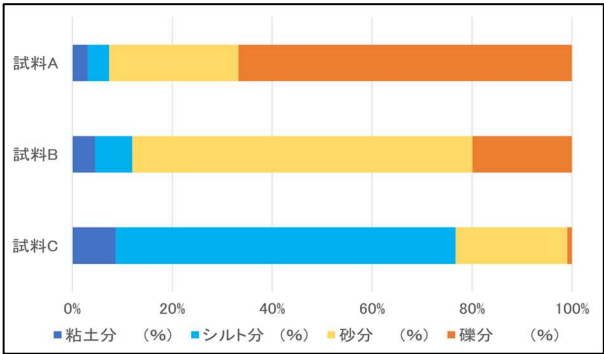


図-1 粒度分布

3. 試験結果

(1) 湿潤密度

湿潤密度の結果を表-2 に比較を図-2～4 に示す。
試料A、Bは下図より 14～18 回程度で現場の地盤と近い密度が得られることがわかった。試料Cは乱さない土で行った結果と締固め 6 回で近似し、締固めの回数が多くなるに従い、湿潤密度が上がる傾向にある。

表-2 湿潤密度結果表

試料名	締固め回数	湿潤密度 (g/cm ³)					
		現場密度試験	乱さない土	6回	7回	12回	21回
試料A(砂礫)		1.806			1.732		1.890
試料B(砂)		1.571			1.432		1.628
試料C(粘性土)			1.651	1.668		1.702	1.727

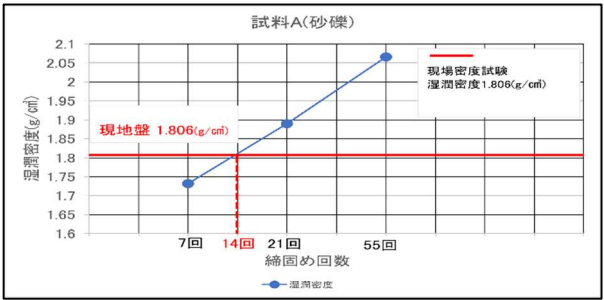


図-2 湿潤密度の比較(試料 A)

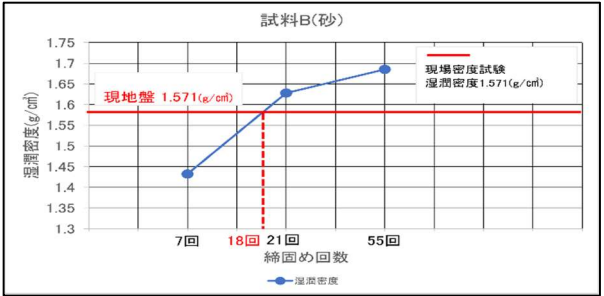


図-3 湿潤密度の比較(試料 B)

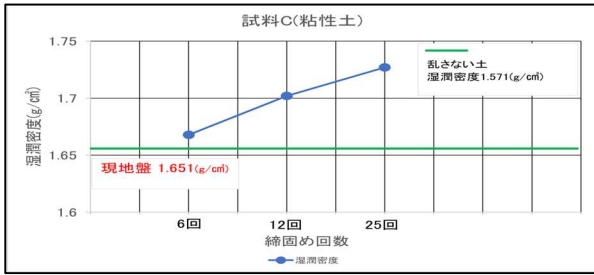


図-4 湿潤密度の比較(試料 C)

(2) 現地浸透試験結果

現地浸透試験の結果を表-3 に示す。結果は全試料で概ね一般的な値を得た。試料 C は粘性土のため土研法を行わず、乱さない土を採取し室内透水試験を実施した。

表-3 現地浸透試験の透水係数

試験方法 試料名	透水係数(m/s)	
	現地浸透試験	乱さない土
試料 A (砂礫)	1.78E-04	
試料 B (砂)	2.28E-05	
試料 C (粘性土)		3.88E-06

(3) 室内透水試験結果

室内透水試験の結果を表-4 と図-5～7 に示す。これらの試験の結果から、定水位法で行った試料の場合、下図によれば、約 38～43 回程度で現地浸透試験の透水係数と近くなる傾向となった。

変水位法で行った試料 C (粘性土) の場合は、締固めの回数が増えていく度に、透水性は低くなっている。

表-4 室内透水試験の透水係数

試料名	透水係数(m/s)				
	6回	7回	12回	21回	25回
試料 A (砂礫)		2.45E-03		3.57E-04	
試料 B (砂)		5.80E-05		3.76E-05	
試料 C (粘性土)	1.20E-06		2.02E-07		1.70E-07

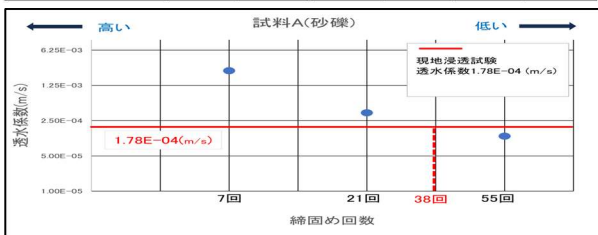


図-5 透水試験結果(試料 A)

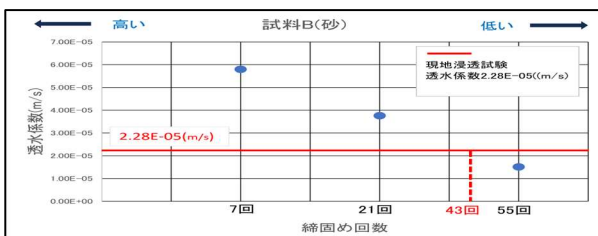


図-6 透水試験結果(試料 B)

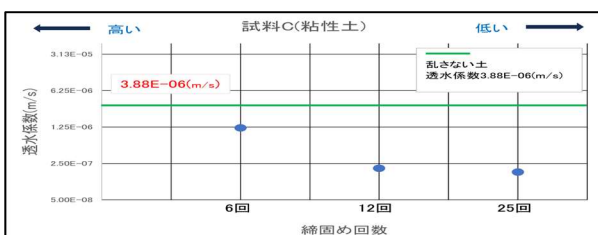


図-7 透水試験結果(試料 C)

4. 考察

今回の試験の結果では、密度は試料 A (砂礫)、B (砂) で締固め回数が 14～18 回付近で現状土と近い値を示した。透水係数については、約 38～43 回程度で現状土に近い値を示した。この結果より、JISA1218:2020 に記載されている試験方法は現状土に近い結果が得られることが解った。

試料 C (粘性土) については、密度と透水係数も締固め回数 6 回の値が最も現地の地盤と近似する結果となった。但し、締固めの回数が少ないため、モールドとの空隙ができる場合や供試体が不均質な状態になるなどの影響が懸念される。よって、粘性土については乱さない土を採取し不攪乱試料で室内透水試験を行うことが、望ましいと判断される。

次に、Creager による D_{20} (mm) の値 (表-1 参照) を用いた透水係数との比較を表-5 に示す。この比較では、試料 B (砂) は極めて近い値を示すが、試料 A (砂礫)、試料 C (粘性土) については相関性はみられなかった。

表-5 Creager による透水係数

試験方法 試料名	締固め回数	透水係数(m/s)		
		現地浸透試験	乱さない土	Creagerによる一般値
試料 A (砂礫)		1.78E-04		3.60E-03
試料 B (砂)		2.28E-05		3.80E-05
試料 C (粘性土)			3.88E-06	4.00E-07

5. 結論

密度は、試料 A (砂礫)、B (砂) の場合 14～18 回、試料 C (粘性土) が 6 回での締固めにおいて、現地の地盤と近い値を示した。

透水係数については、試料 A (砂礫)、B (砂) の場合 38 回～43 回、試料 C (粘性土) は締固め回数 6 回で現状土に近い値となった。よって、礫および砂は試料の密度を現状土の値に調整した透水係数はやや高めになることを示しており、実際は 40 回程度の回数で締固めが必要となる結果となった。

6. 今後の課題

今回は、室内透水試験の締固め回数を三段階に分けて行ったが、様々な土質を対象に回数変化をさらに調整し、含水比や飽和度、間隙率等も管理した詳細な検証を行いたい。今後もより多くのデータを用いて検証すれば一定の傾向が得られる可能性があると思われる。

《引用・参考文献》

- 1) 地盤工学会編(2020):地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版], pp, 467～478
- 2) 地盤工学会編(2013):地盤調査の方法と解説, pp, 770～777
- 3) 社団法人 雨水貯留浸透技術協会編:雨水浸透施設技術指針[案]調査・計画編, pp, 33～34

地形解析・判読に基づく地山地下水位の推定と施工影響評価

株式会社エイト日本技術開発 澤田 弦一郎

1. はじめに

我が国においてはトンネル掘削に伴う湧水問題が多数生じており、施工影響の予測・評価、湧水影響対策の検討にあたり、施工前の地山地下水位および地下水流動状況を把握することは重要な課題といえる。施工前に十分に地質・地下水状況の調査が行われている場合は、精度よく地山の地下水位等を推定できるが、必ずしも十分な調査を実施できない場合もある。

このような場合において、本論文では、国土地理院にて公開されている高解像度の数値標高モデル(1m メッシュ)に基づく地形解析・地形判読により地下水面および源頭(湧水)位置を推定した。さらに現地踏査により実際の湧水位置を確認することで、地山地下水位を推定し、施工影響を予測・評価した。

2. 予測手順・方法

(1) 地山地下水位

トンネル施工による周辺地下水影響を予測するにあたっては、施工前の地下水位を把握することが重要となる。

一般的に、地下水面の形状は、地形面形状と調和的となることがいわれている。山地においては、山麓斜面と谷底面の境界部に地下水が湧出し、沢水を形成していることが多い。このため、①図-1に示すように谷底面の標高を面的に抽出し(いわゆる接谷面図を作成)、これを仮想的に地下水面の形状とみなした。②地形判読を行い、源頭地形(源頭位置)を抽出した。その後、③水文踏査を行い、源頭位置を把握し、①、②で推定した地下水面形状および源頭位置について検証した。

以上①、②、③の工程を踏まえ地山地下水位を推定した。なお接谷面図は、国土地理院にて公開されている1m メッシュ数値標高モデルを基に、GIS ソフトを用いて方眼法により作成した。

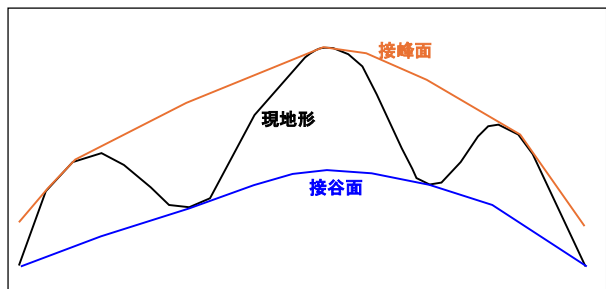


図-1 接谷面図の概念

(2) 施工影響の評価

トンネル施工影響範囲については、高橋の水文学的方法¹⁾により事前に算出している。(1)で予測した地山地下水位とトンネルの高さとの関係より、施工影響を予測し、

高橋の水文学的方法で評価されたトンネル施工影響の妥当性についても検証した。

3. 地山地下水位の推定結果

(1) 地形解析・判読に基づく地下水面形状と推定源頭位置

谷底面の標高を面的に抽出し、作成した地下水面形状(接谷面図)と推定源頭位置をプロットした図を図-2、図-3に示す。

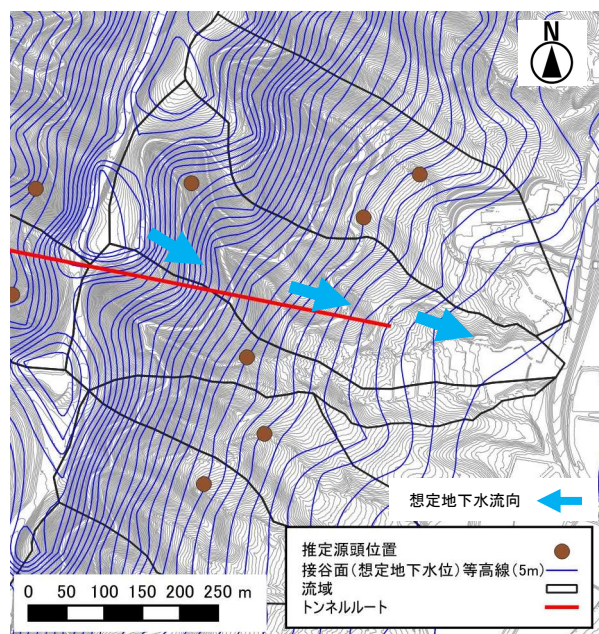


図-2 接谷面図と推定源頭(湧水)位置①

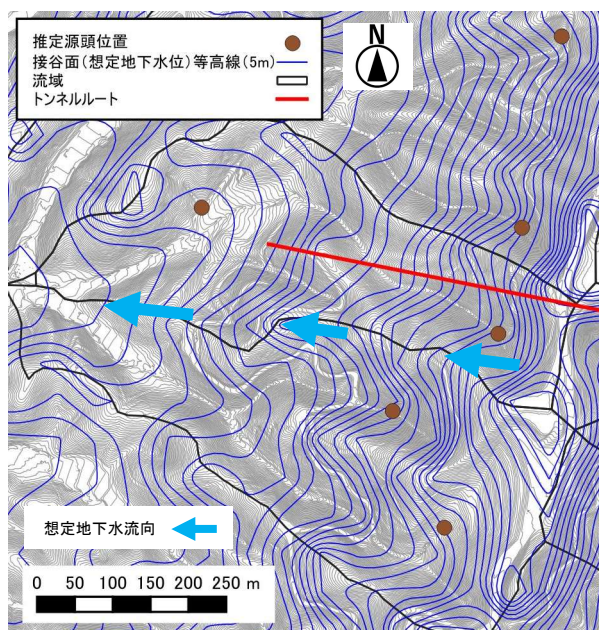


図-3 接谷面図と推定源頭(湧水)位置②

(2) 水文踏査による源頭位置の確認

図-4は地形解析・地形判読で推定した源頭標高について

て、水文踏査により検証したものである。水文踏査によって確認した源頭位置は、地形図により周辺の地形的な特徴から確認するとともに、GPSにより記録した。

図-4に示すように、地形解析・地形判読と水文踏査の源頭位置の平均標高差は、8m程度であった。また、最大の標高差は44m、最小の標高差は1mであった。図-5には図-3に実際の源頭位置をプロットしたものを示す。

地形解析・地形判読と水文踏査による源頭位置の標高差が大きく乖離した地点（標高差44m）について現地を確認した結果、谷筋に堆積した土砂に沢水が伏流しており、湧水地点が下流側にシフトしていたことが一因である。また、現地で確認した源頭位置の読み取り精度が低かった可能性もある。

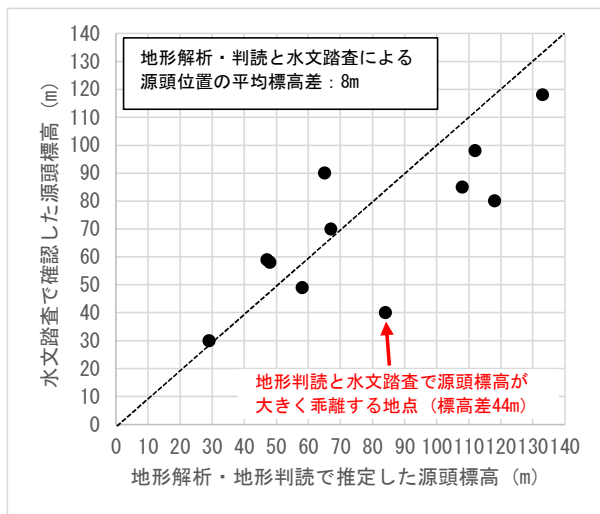


図-4 水文踏査による源頭位置の検証結果

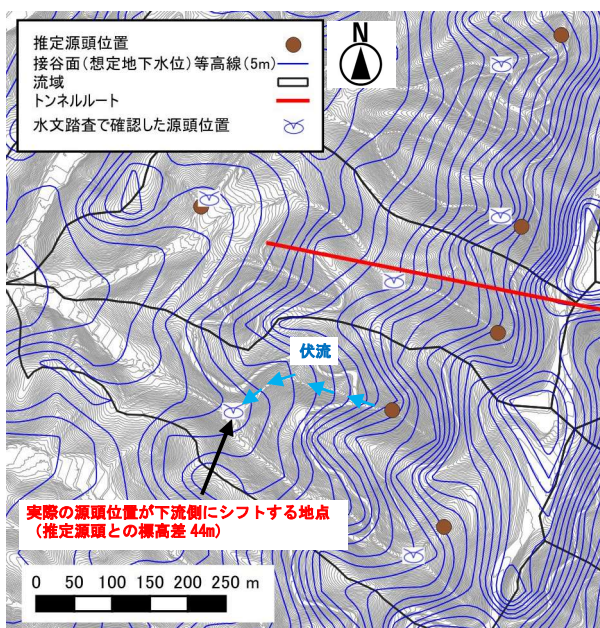


図-5 水文踏査による源頭位置（湧水地点）のプロット

(3) 実際に推定した地山地下水位

図-6には、(1)、(2)の工程を踏まえて推定したトンネル地山の地下水位を示す。なお、地山は泥岩優勢の砂岩・

泥岩互層からなる。

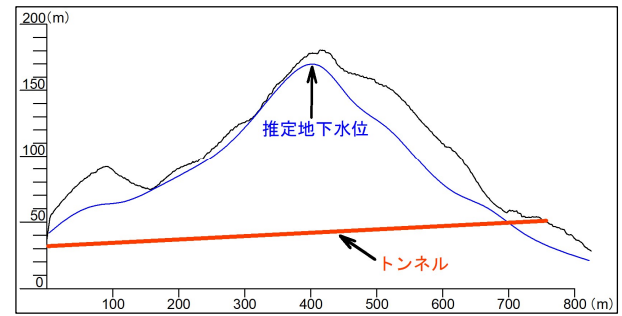


図-6 実際に推定した地山地下水位（縦横比2:1）

4. 施工影響評価

図-7には、事前に高橋の水文学的方法で推定した地下水影響範囲を示す。トンネルルート近傍の流域は、地下水影響範囲との重複率が高いことから、「工事による影響発生の可能性が高い」と評価していた。ただし、高橋の水文学的方法は、トンネル近傍流域の地形データ（流域面積、流路長、比高差）のみから地下水影響範囲を推定するものであり、地山の地質・地下水状況を考慮することができない。

本論文では、上記に示すように地山地下水位が高い状況にあることが実証された。トンネルの高さとの関係からは、施工影響発生の可能性が高く、高橋の水文学的方法に基づいて評価した工事影響を支持するものであった。

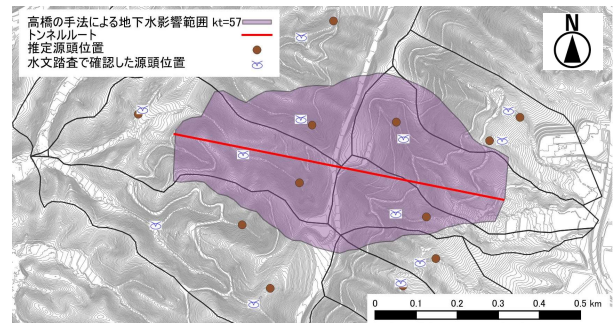


図-7 高橋の水文学的方法で推定した地下水影響範囲

5. まとめ

本論文では、高解像度の数値標高モデル（1mメッシュ）に基づいた地形解析・地形判読および水文踏査により地山地下水位を推定した。特に推定した源頭位置と水文踏査で確認した源頭位置は、地形的に特殊な地点を除けば概ね良い一致を見せた。このことは、机上の検討のみでも、ある程度は地山地下水位の想定が可能であることを示す。ただし、現地での源頭位置の把握精度の向上は、今後の課題である。

また、推定した地山地下水位とトンネル高さの関係は、事前に評価した施工影響を支持するものであった。

《引用・参考文献》

- 1) 高橋彦治（1962）：トンネルの湧水に関する応用地質学的考察, 鉄道技研報告, 279.

大規模道路建設工事に伴う周辺地下水利用への影響検討事例

株式会社日さく ○高橋 沙也加, 堀 信雄, 藤田 祥代

1. はじめに

関東地方の某所にて、大規模道路建設に伴い台地部から低地部へ下る区間を対象に延長約 600m、最大高さ約 18m の切土工が計画された。調査地周辺には上水道が敷設されていないことから、本道路建設により地下水環境が変化し、住民の生活に深刻な支障が生じる可能性が懸念された。

本発表では、大規模道路建設工事に伴う地下水利用への影響について、地下水質に着目して検討した事例を示す。

2. 調査地の概要

(1) 地形地質概要

図-1 に推定地質断面図を示し、図-2 に調査位置図および影響検討範囲を示す。台地部では表層よりローム層、凝灰質粘土層、洪積砂質土層が分布し、低地部の表層には沖積砂質土層、沖積粘土層が分布する。これらの地層の下部には洪積砂質土層、洪積粘性土層が分布する。切土工区間における地下水は、洪積砂質土層が分布する T. P. 13m 付近に確認されている。

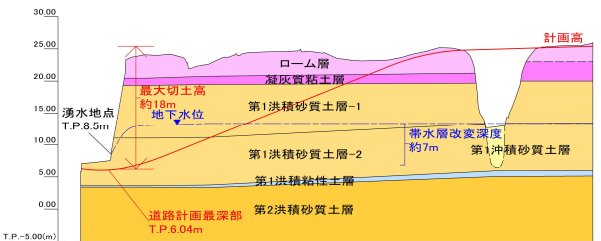


図-1 調査地における推定地質断面図(道路縦断方向)

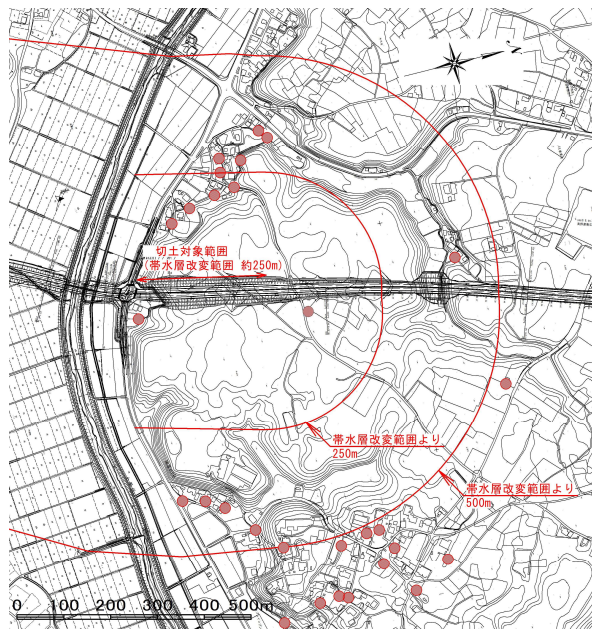


図-2 調査位置図および影響検討範囲

(2) 工事概要

切土工区間のうち、帯水層改変範囲は延長約 250m、深度は最大深さ約 7m であり、洪積砂質土層中を流動する地下水の一部が切土工の影響を受けると考える。なお、図-1 に示すように、切土工末端部の斜面からは湧水が確認された。本湧水は、切土工により改変される帯水層に賦存する地下水が湧出したものと考えられる。

3. 調査範囲の設定

本調査結果に先立ち、①文献による一般値②経験式による影響範囲を検討した。①については東京都「工事に伴う環境調査標準書及び環境調査要領 (H28. 4)」および土質区分による推定により算出した。②については、以下の3式に従い、試算した。

・Kusakin(クサキン)の式 $R=575s\sqrt{Dk}$ ・式-1

・Seichardt(ジハルト)の式 $R=3000s\sqrt{k}$ ・式-2

・非定常浸透(不圧帯水層) $R=a\sqrt{\frac{Hkt}{S_y}}$ ・式-3

R : 影響圏半径(m)、 s : 水位低下量(m)、 D : 帯水層厚(m)、 H : 不圧帯水層圧(m)、 k : 透水係数(m/s)、 t : 揚水時間(s)、 S_y : 有効間隙

検討結果を表-1に示す。

表-1 工事影響範囲の検討

検討項目		影響範囲
①文献による一般値	東京都標準書 ¹⁾	500m
	土質区分による推定 ²⁾	10～100m
②経験式 ²⁾	クサキン式(式-1)	90m
	ジハルト式(式-2)	148m
	非定常浸透不圧(式-3)	34m

調査地における切土工による周辺地下水への影響範囲は、表-1に示すように最大で500mと判断される。以上より、帯水層調査範囲から500mを目安とし、地下水への影響調査を実施した。

4. 調査方法

主な調査方法を以下に示す。

- ・井戸分布調査: 工事箇所周辺の既設井戸の分布状況および井戸諸元の確認を行った。
- ・地下水位・吐出量調査: 井戸分布調査にて確認された井戸を対象に6月と12月の2回測定を実施した。井戸構造により地下水位が測定できない井戸は、吐出量調査を実施した。なお、地下水位測定等とあわせ、温度、pH、電気伝導率の現場測定を実施した。
- ・水質分析: 既設井戸および湧水を対象に水質分析を実施した。水質分析は、主要イオン8項目、酸素素素安定同位体について実施した。

5. 調査結果

井戸分布調査による聞き取りの結果、既設井戸の多くは、切土工対象深度より深い地下水を取水していると想定される。ただし、既設井戸のほとんどで井戸構造上、地下水位を測定できなかった。

(1) 現場水質測定

図-3に現場水質測定結果を示す。地下水の pH を測定した結果、pH と井戸底標高には負の相関が認められ、井戸底標高が低いほどアルカリ性になる傾向が見られた。

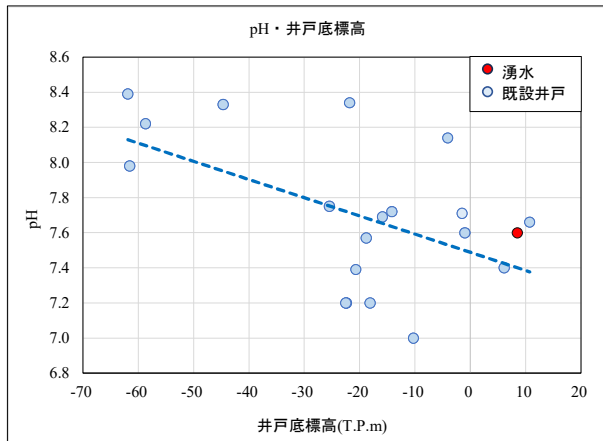


図-3 pHと井戸底標高の関係

(2) 主要イオン分析

図-4にトリリニアダイアグラムと代表的なシュティフダイアグラムを示す。ほとんどの既設井戸が浅層地下水等に代表されるⅠ型（炭酸カルシウム型）もしくはⅤ型（中間型）に分類される。1地点のみ硝酸イオンが非常に多く含まれており、Ⅲ型（非炭酸カルシウム型）に分類される³⁾。

また、湧水もⅠ型に分類されるが、周辺の既設井戸と異なり、マグネシウムイオンの割合がやや多い傾向が認められた。

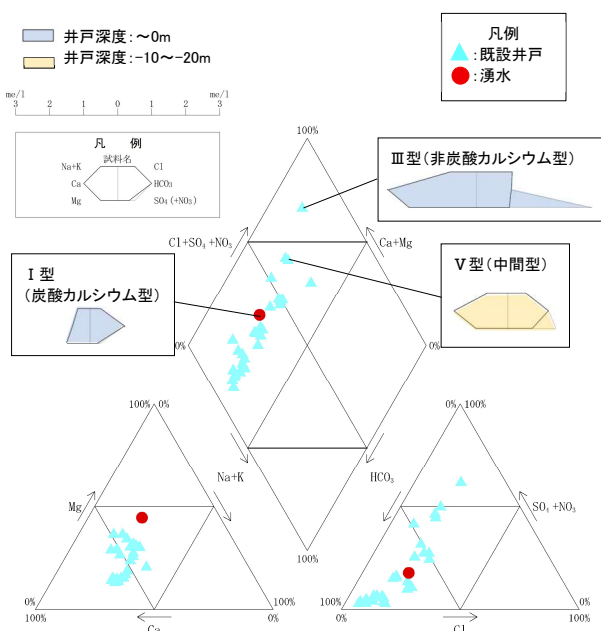


図-4 主要イオン分析結果

(3) 酸素水素安定同位体

図-5にデルタダイアグラムを示す。浅い井戸の地下水は重く、深い井戸の地下水は軽い傾向が認められた。また、湧水は、とくに重い水と評価される。

一般に関東地方における降水は、海沿いで重く、内陸部もしくは山間部で軽くなる傾向が認められる⁴⁾。ほとんどの既設井戸の地下水は湧水より軽いことから、調査地よりも上流側へ広い涵養域を有すると考えられる。

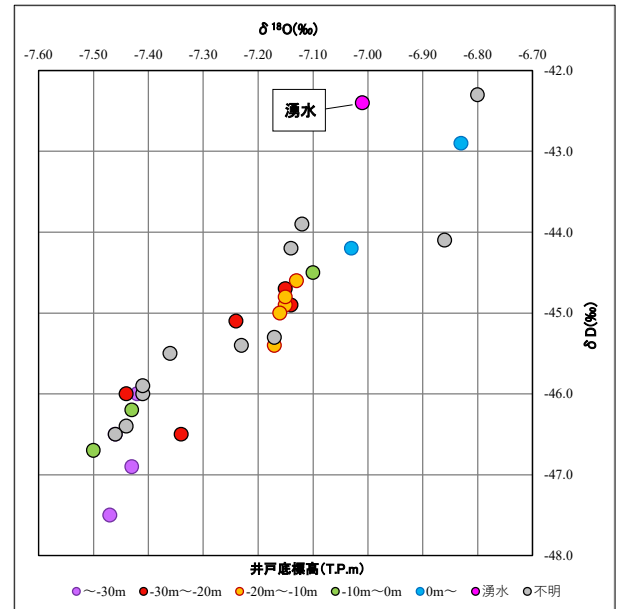


図-5 デルタダイアグラム

6. まとめ

井戸深度が不明である井戸を含め、ほとんどの既設井戸の地下水の酸素水素安定同位体は、湧水と比較して明瞭に異なる結果を示した。このことから湧水と既設井戸の地下水は、異なる涵養源、流動経路を持つものと想定される。以上より調査地における切土工が周辺地下水へ与える影響は、局所的なもので既設井戸において利水障害が生じる恐れは低いものと結論づけられた。

一般に地下水調査は水位と水質等を把握し、調査地における地下水流動機構を検討するケースが多い。本調査では現地状況に基づく制約から、主に地下水質に着目した検討を行い、工事影響を評価できたものとする。

《引用・参考文献》

- 1) 工事に伴う環境調査標準書及び環境調査要領 (H28) : 東京都建設局
- 2) 『根切り工事と地下水:調査・設計から施工まで』: 土質工学会
- 3) 『地下水ハンドブック』: 建設産業調査会, 1998. 8
- 4) 国立研究開発法人産業総合研究所地質調査総合センター: 水文環境図 No. 3 「関東平野」 (最終閲覧日 2025. 6. 9)

水の酸素安定同位体の水文地質調査への適用

サンコーコンサルタント株式会社 ○徳永 貴大, 飯野 竜一, 渡辺 喜彦

1. はじめに

建設工事では、地下掘削や地形改変により周辺水源に影響が生じることが多々ある。工事との関連性を把握するための一般的な水文調査として、流量、水位、簡易水質測定その他、溶存イオンの水質分析が行われるが、従来から地下水の涵養源と流動機構の解明に使用されてきた水の酸素・水素安定同位体は、まだメジャーな手法として取り扱われていない。

本稿では、水の酸素安定同位体について、日本各地のデータを用いて特性をとりまとめた上で、水文地質調査へ適用した事例について述べる。

2. 水の酸素・水素安定同位体について

水を構成する酸素と水素は、質量数の異なる安定同位体が存在し、水が蒸発する際に軽い同位体から選択的に水蒸気となり、水蒸気が凝縮する際に重い同位体から選択的に水となる特性（同位体分別）がある。これにより降水の同位体比の空間的な分布に差異が生じ、大陸～地球規模では、低緯度地域から高緯度地域に向かって同位体比が低下する（緯度効果・温度効果）。流域～大陸規模では、海岸部から内陸部に向かって同位体比が低下する（内陸効果）。また局所的な規模では、山地の低標高域から高標高域に向かって同位体比が低下する（高度効果）¹⁾。一方、同位体比は地下水の流動過程において変化しないため、地下水の起源、涵養した環境、貯留・流動中の混合の検討に有効なトレーサーとして利用される。

しかしながら、安定同位体が各水質基準項目でないことや地形条件に適用性があることなどから、水文調査業務の中で容易に利用できる段階まで至っていない。本稿では、適用条件と効率化を考慮して、より実績が多い酸素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）に焦点をあてた内容を記載する。

3. 日本各地の酸素安定同位体比

(1) 降雨・沢水・湧水・地下水の時系列変動

図-1は、九州地方および中部地方における酸素安定同位体比の時系列変動図であり、降水の同位体比は降雨イベントによって大きく変化しているが、沢水・湧水・地下水の同位体比は、降水と比較して安定している。これは、水が地下で混合し、降水が持つ同位体の季節変化などが打ち消されるためである¹⁾。図-2のとおり、地表水や浅層地下水に関しては、日本全国の同位体比分布が示されており、同位体比が地域によって異なることがわかる。

ただし、沢水・湧水・地下水の同位体比は安定するものの、蒸発や他水系からの流入によって大きく変動する可能性があるため、調査時期などには留意する必要がある。

逆に言えば、他水系からの混合などを検討する場合に有効なトレーサーであるともいえる。

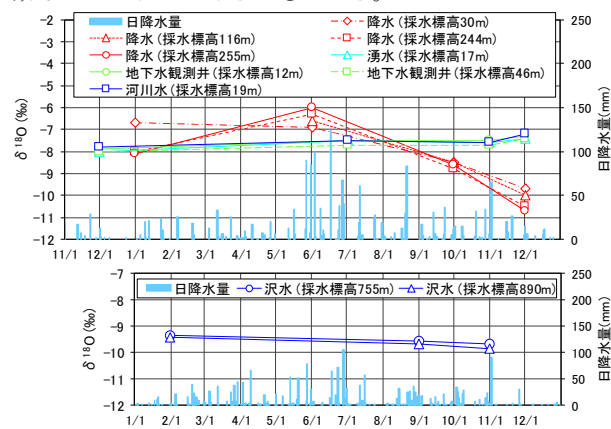


図-1 酸素安定同位体比の時系列変動図²⁾

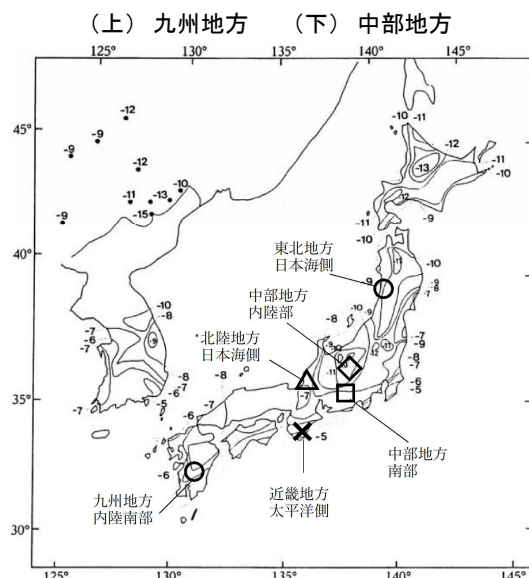


図-2 日本における地表水・浅層地下水の酸素安定同位体比の分布および本発表で調査した対象地区³⁾

(2) 地表水の酸素安定同位体比を用いた高度効果

高度効果や地下水流動において同位体分別が生じないことを利用して、地下水の平均涵養標高を求める調査や研究が多く行われている。以下に地下水の同位体比と標高との関係式（地下水涵養線）を求める方法を示す⁴⁾。

- ① 地形的に判断して集水域が限定される湧水・沢水を標高別に選定する。
- ② 集水域の平均標高（平均涵養標高）を求める。
- ③ 同位体比と涵養標高との関係式を作成する。

図-3は、日本各地の地表水の酸素安定同位体比と採水流域平均標高の関係図に近似式から求まる地下水涵養線をプロットした図である。図から中部地方内陸部の同位体比は内陸効果とみられる低い値を示す。また、各地域の地表水の涵養線は $\delta^{18}\text{O}$: $-0.30 \sim -0.08\text{‰}/100\text{m}$ であり、

地域によって異なる傾向を示す。なお、地表水の涵養線は、日本海側で傾きが小さく、太平洋側で傾きが大きい傾向がみられたが、全国的な傾向であるかは不明である。

ここで、一般的な酸素安定同位体比の分析誤差は±0.1‰程度であることから、今回対象とした地域の地表水の高度効果の誤差を試算すると、±20～100m 程度の誤差が生じることとなる。これを考慮すると、採水地点と涵養地点の標高差が最低でも200m 程度ないと有効な検討ができない可能性がある。

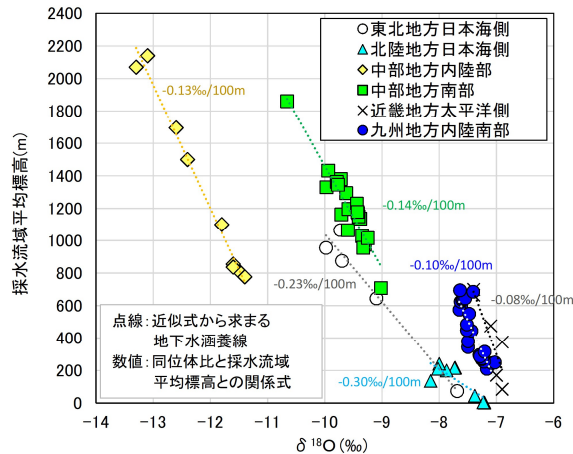


図-3 酸素安定同位体比と採水流域平均標高の関係図

4. 水文地質調査への適用例

水文地質調査では、水文地質・地下水流動特性を把握することで工事による影響を予測するとともに、対策検討に資する情報を取得しなければならない。ここでは、酸素安定同位体を併用したことで、解明できた地下水流動や工事との関連性を評価した事例を述べる。

図-4は、採水地点の標高と酸素安定同位体比の関係図である。前述したとおり、調査対象水源の酸素安定同位体比を地下水涵養線と比較することで、水源水の平均的な涵養標高を把握することが可能になる。例えば、湧水Aの平均涵養標高は1700m 程度と推測できる。

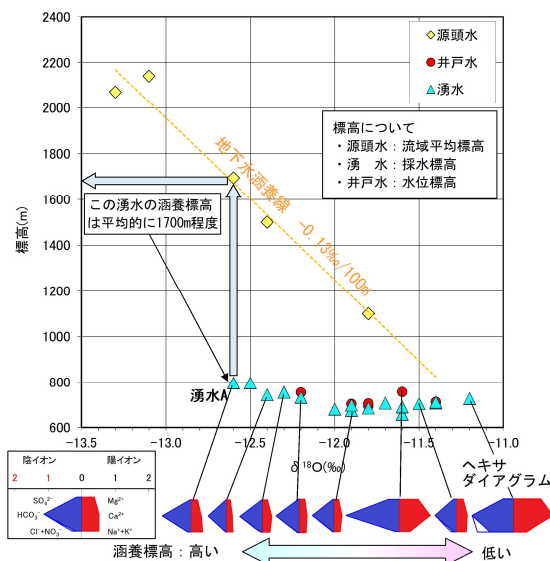


図-4 酸素安定同位体比による涵養標高とヘキサダイアグラム

涵養標高とヘキサダイアグラムの関係を見ると、涵養標高の低い湧水・井戸は溶存成分が多いものも含む。標高の低い地下水には、循環の遅い地下水、溶出性の高い地質の存在、人為的現象などの要因が考えられる。

一般に地下流動期間が長い地下水ほど溶存成分が多くなると解釈することもあるが、溶存イオンの他に酸素安定同位体分析を併用することにより、涵養標高や循環性を含めた地下水の性状を区分することが可能になる。

地下水の性状を把握することは、工事との関連性を検討する際に非常に有効である。例えば、図-5に示す条件の場合、地下水系統の区分結果と工事域でのボーリング調査・地下水観測孔による帯水層深度・水位・酸素安定同位体比の比較により、工事との関連性を評価できる。

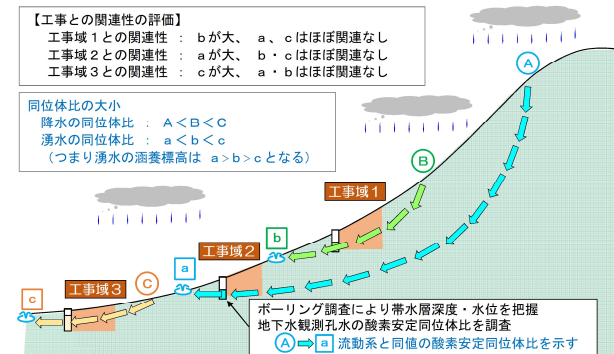


図-5 地下水流動と工事位置の模式図

5. まとめ

本稿では、日本各地の酸素安定同位体比のデータを取りまとめて、水文地質調査による適用事例を紹介した。以下に酸素安定同位体の適用性についてまとめる。

- ① 沢水・湧水・地下水の酸素安定同位体比は年間を通じて安定しており、地下水流動特性や涵養標高の検討に資する情報などを効果的に取得できる。
- ② 分析誤差を考慮すると、採水地点と涵養地点の標高差が200m 以上あれば適用性が高い。
- ③ 水文地質調査時に酸素安定同位体を併用することで、地下水系統を区分し、工事との関連性をより詳細に解明できる可能性がある。

《引用・参考文献》

- 1) 林武司 (2005) : 酸素・水素安定同位体比を用いた地下水調査, 地下水技術, 第47巻, 第8号, 27
- 2) 気象庁アメダス : (最終閲覧日2025. 5. 15), <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
- 3) Mizota. C., Kusakabe. M. (1994) (に加筆) : Spatial distribution of δD - $\delta^{18}O$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China, Geochemical Journal, 28, pp.387-410
- 4) 中井信之・菊田直子・土 隆一 (1995) : 富士山及び周辺の地下水・河川水の安定同位体組成とその水文学への応用, ハイドロロジー, 25 (2), 71-81

道路改良事業に伴う温泉泉源への影響評価事例

大日本ダイヤコンサルタント株式会社 ○吉川 洸希, 半田 義人, 本田 実礼

1. はじめに

通常の水文調査では、トンネルや橋梁、切土盛土施工に伴う周辺の井戸水や湧水、河川等の周辺水文環境に与える影響を調査することが多く、温泉を対象とした調査は少ない。そこで、今回経験した温泉泉源を対象とした水文環境影響調査事例を紹介する。

今回対象とした地区は、古く平安時代から利用されている温泉泉源が多数分布する地区であり、道路改良工事（トンネルや切土等）の施工に伴い自噴量の減少や泉質の変化が懸念されていた。本調査では、施工前段階におけるモニタリング計画の立案から施工中、施工後の影響評価を実施した。泉源モニタリング調査の結果、温泉自噴量に降水量と相関性が認められたため、実効雨量解析による影響判定解析を実施した。解析の結果、実効雨量による再現自噴量と実測自噴量が比較的精度よく整理され、影響評価ができた。このことから、通常の水文調査の経験が温泉を対象とした業務にも十分有効であると判断した。

2. 泉源分布調査

通常の水文調査の場合、調査範囲は地質分布や分水嶺、行政境、高橋の方法等による影響予測範囲を基に検討されるが、今回は広域的に分布する温泉泉源を対象としたことから、既存調査資料を基に、温泉水の流下方向に広く設定した。具体的には、自治体の保険所が所管している温泉泉源台帳を基に泉源の分布や利用状況を確認（通常の水文調査では井戸調査 A, B に相当）すると共に、既存の温泉賦存量調査資料（熱水変動モデル）から熱水はリニアメント沿いに流れていることを確認し、流下方向にモニタリング地点を設定した（図-1）。

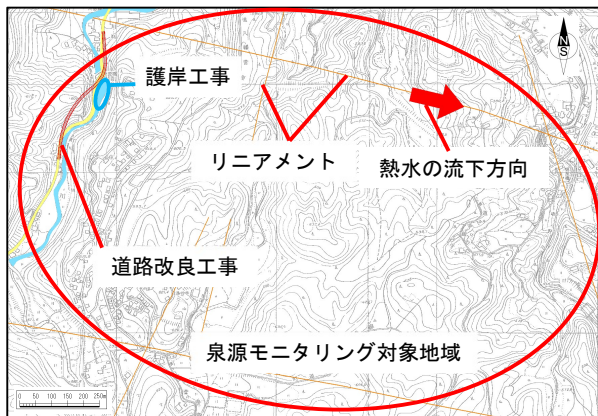


図-1 熱水変動モデルと調査対象位置図

3. 泉源調査

設置したモニタリング地点において、施工前～施工中、施工後に定期的な観測を実施した。泉源モニタリング調

査は「温泉モニタリングマニュアル」¹⁾に準じて湧出量、泉温、簡易水質（pH, EC）の観測を実施し、湧出量の観測は容器法を用いて実施したが、自噴量が0L/分の場合、コンプレッサーを使用した揚水量を参考値として観測した。通常の水文調査と異なる点として、温泉は高温であることから、観測時は耐熱グローブを利用した。また、温泉の泉質変化（単純温泉やアルカリ性単純温泉等の区分）を把握するために「鉱泉分析法指針」²⁾で規定されている鉱泉分析試験を実施した。

そのうち本発表では、トンネル近傍に位置する温泉泉源（以下、泉源 A と称する）を対象に調査結果を紹介する。施工箇所と泉源 A の位置関係を図-2に示す。

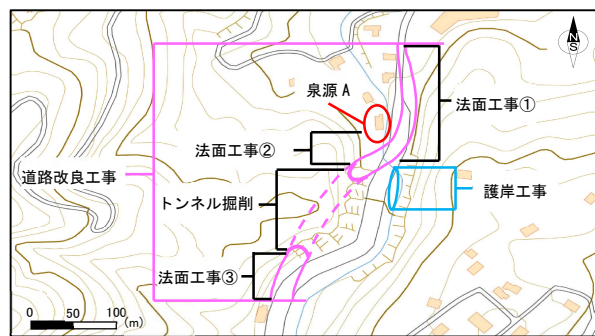


図-2 道路改良工事と泉源 A の位置図³⁾

4. 泉源モニタリング結果

道路改良施工前～施工後におけるモニタリングの結果、ほとんどの地点において施工前後で大きな影響は認められなかった。しかし、いくつかの箇所では、湧出量や泉温のわずかな減少・低下傾向が認められ、これらの傾向は施工前段階から確認できていた。その原因としては温泉の供給量に比べ使用量が増加したため、温泉の自噴量や揚湯量、泉温が減少傾向を示したと判断される。

泉源 A では、施工前段階から次第に湧水期の自噴量が0L/分となる頻度が増加し、泉温が緩やかに低下する傾向が認められた。自噴量は日雨量が増加する豊水期以降は明瞭に増加する傾向が認められた（図-3）。

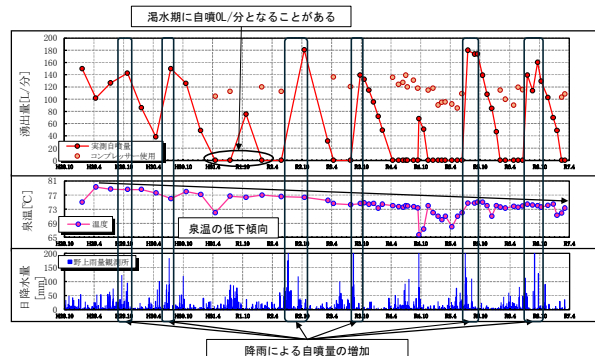


図-3 泉源モニタリング結果⁴⁾

5. 工事影響評価検討

自噴量は降雨との相関傾向が見られたため(図-3)、道路改良工事による影響評価を目的として、実効雨量による解析を実施した。

実効雨量とは、降雨が地中に貯留されている量を便宜的に示した値を示す。本地域の温泉水は地下水に由来するとされ、地下水が浸透・貯留され噴出すると考えられる。そのため、泉源は一つの流出孔を持つ、1段のタンクモデルとも言い換えられる。

泉源モニタリング結果および施工期間を整理した実効雨量解析結果を図-4、再現自噴量と実測自噴量の各年度の相関係数を図-5に示す。

道路改良工事による温泉泉源への影響評価は、通常的水文調査と同様、モニタリングデータと施工時期の関係や時系列解析により行った。

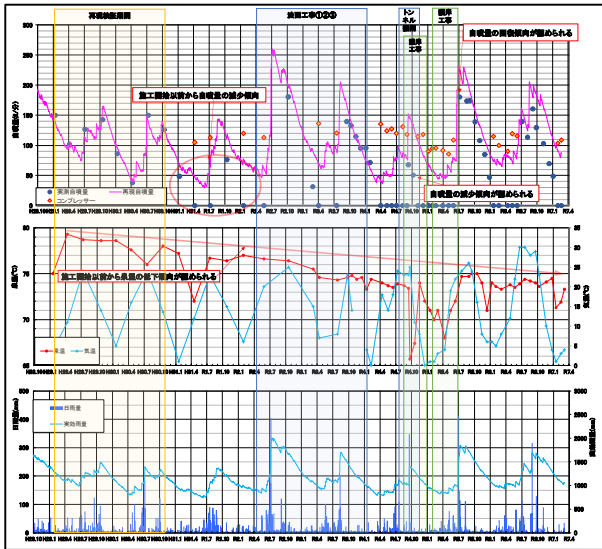


図-4 実効雨量解析結果図⁴⁾

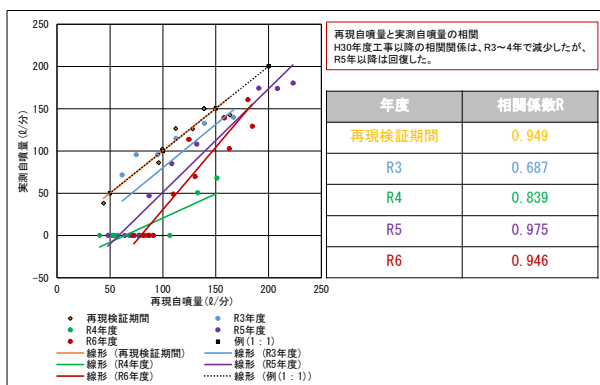


図-5 再現自噴量と実測自噴量の相関

(1) 解析結果

解析の結果、道路改良工事開始前段階(H28年10月～R2年4月間)では、実測自噴量と再現自噴量の乖離は少なく、湧水期は実測自噴量が減少する傾向があるものの、概ね実測自噴量を再現する結果であった。しかし施工中であるR2年4月～R5年7月間では再現自噴量と実測自噴量に大きな乖離が認められるようになっている。さらに施工

が完了したR5年7月～R7年3月間は概ね施工前段階と同様の再現率までの回復が確認された。

この再現率が低下した原因としては、令和2年7月の豪雨により温泉泉源が含まれる河川が氾濫し、温泉施設や河川護岸が被災したことが直接の影響であると考えられる。この災害により温泉泉源に河川の濁水が流入する事象も認められていることから、自噴した温泉が河川に流出した可能性も否定できない。

その後、河川護岸の復旧が完了した段階では、概ね施工前段階と同様の再現率までの回復が確認された。

(2) 水文環境特性

泉源モニタリングの結果から、調査地域の泉源では、施工開始前から湧水期には自噴量の減少傾向が認められていた。加えて、泉温の継続的な低下傾向が見られたことから、調査地全域の温泉水の供給量が減少傾向にあると判断できる。一方で、今回実施した道路改良工事による温泉泉源への顕著な影響はなかったと判断する。

なお、豪雨災害の影響により一部の泉源で若干の自噴量の減少が認められたが、復旧後には概ね回復が認められている。

6. まとめ

通常的水文調査では、トンネルや橋梁、切土盛土施工に伴う井戸水や湧水、河川等の周辺水文環境に与える影響を調査することが多く、温泉を対象とした調査事例は少ない。しかし対象とする保全対象水源が異なるのみで、調査や解析手法としてはほぼ同様の手法で対応することができる。

今回はリニアメント沿いに流れる温泉水を対象とした水文調査を実施したが、長期的な降雨量(先行雨量≒実効雨量)と良い相関が認められた。このことから、温泉湧出量の解析に実効雨量やタンクモデルが適用できることが分かった。

今後も温泉泉源分布域を通過する道路改良やバイナリー発電の開発などの際には、これまでの水文調査解析の経験を活かした調査が有効であると考えられる。

《引用・参考文献》

- 1) 環境省自然環境局(2015): 温泉モニタリングマニュアル。
- 2) 環境省自然環境局(2014): 鉱泉分析法指針。
- 3) 国土地理院地形図(に加筆),(最終閲覧日2025年5月14日)。<https://maps.gsi.go.jp/>
- 4) 国土交通省水文水質データベース(最終閲覧日2025.5.14),
<http://www1.river.go.jp/contents.html>

融雪量を考慮した実効雨量解析による工事影響評価

株式会社エイト日本技術開発 ○沖田 孝行, 原 伸匡, 風見 健太郎

1. はじめに

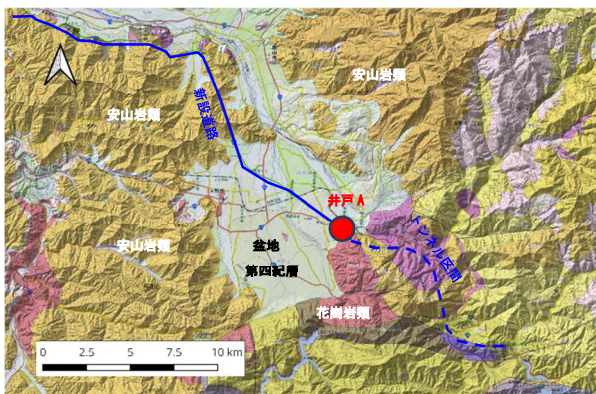
本検討は、福井県における新設道路工事に伴う周辺井戸への地下水影響を評価した事例である。施工による地下水への影響を評価する手法として、従来から実効雨量解析がよく用いられている。本業務で対象とした井戸 A における解析では、多雪による予測水位と実測水位との乖離が見られた。また、工事影響の判断指標がないため、水位変動と工事影響との関連性を評価することが難しいという課題があった。上記課題に対し、本業務では「①現地の気象条件（多雪地域）を考慮した実効雨量解析」、「②統計学的手法による客観的な指標を基にした工事影響評価」を実施した。以下より検討事例を紹介する。

2. 業務地の概要

本業務地は、周辺を山地に囲まれた盆地地形をなしており、中世代ジュラ紀の花崗岩類、新生代新第三紀の安山岩等を基盤とし、表層を第四紀層が被覆している。

降水量は例年2500mm 程度を記録する地域となっており、冬季は積雪も多く、周辺山地からの地下水涵養が盛んであり、盆地内では井戸水を主体とした水利用がなされている。新設道路は盆地中心部を縦断する形で施工されており、観測対象の井戸付近では盛土や掘削切土、橋梁掘削、トンネル掘削が実施された。

井戸 A は盆地と山地の境界部に位置しており、付近では盛土、橋梁掘削が施工された。工事開始1年前から自記水位計による水位観測を実施している。

図-1 業務地位置図¹⁾

3. 解析方法

(1) 実効雨量解析

1) 実効雨量の算定

実効雨量とは、過去の降水量を考慮した指標で、土中の水分量を表現したものである。本検討では以下の算定式²⁾により実効雨量を求めた(式-1)。

$$E_0 = \alpha \cdot R_0 + \alpha^2 \cdot R_1 + \dots + \alpha^{n+1} \cdot R_n$$

$$\alpha = 0.5^{\frac{1}{M}} \quad \dots \text{(式-1)}$$

ここで、 E_0 ：実効雨量
 R_0 ：当日雨量 R_n ：n 日前の日雨量
 α ：1 日単位の減少係数 ($0 < \alpha < 1$)
 M ：半減期

実効雨量の算定時に採用する半減期 M（降雨の減少度合が半減する時期を示すパラメータ）は、工事前期間の水位データと最も相関の高い値とした。その後、実効雨量と水位データの回帰分析を行い、予測式（回帰式）を導いた。

2) 融雪量の考慮

適切な工事影響判断のためには観測値を再現できる精度の良い予測が重要である。業務地は冬季の積雪が多く、井戸 A では融雪量が地下水位に与える影響は大きい可能性が考えられた。そのため、融雪が見込まれる観測箇所については以下の式³⁾より量を見積もり、降雨量に加算した(最低気温が 0°C を下回る場合は融雪は起きないものとし、降雨量には加算していない) (式-2)。

$$1 \text{ 日のおよその融雪量} = \Delta H \cdot \rho_s (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}) \quad \dots \text{(式-2)}$$

ここで、 ΔH ：一日の雪面低下量（前日との積雪深との差）

ρ_s ： ΔH までの平均密度（平均密度は 0.4 g/cm^3 と仮定）

(2) 予測区間の推定

回帰式のみでは「どれだけ予測と実測の乖離があれば工事影響と判断するのか」という目安がない。そのため、工事前データから「値の取りうる範囲（予測区間）」を設定し、工事後データがこの範囲に含まれるかどうかで工事影響を判定する方法を採用した。

具体的には、有意水準 5% ⁴⁾の考え方を踏襲し、施工前データから 95% 信頼区間を求めた。工事前後で水文環境が変わらなければ、ほとんどの観測値がこの区間の中に含まれることになり、外れた値は 5% 未満の事象（≒偶然ではなく工事影響によるもの）と評価した（図-2）。

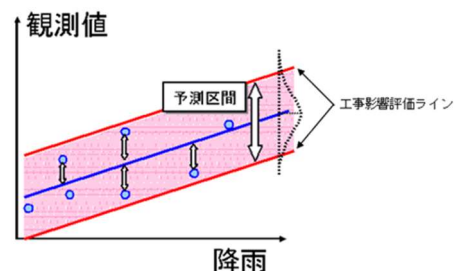


図-2 予測区間の考え方

4. 解析結果

降水量のみの場合と降水量に融雪量を加算した場合の予測水位の変化と、予測区間を基に工事影響を評価した

井戸Aの解析結果を示す。

(1) 融雪量考慮による予測水位の変化

1) 降水量のみ

図-3に解析結果の時系列グラフを示す。地下水位は降水に対して鋭敏に反応している。しかし、冬季(12月～3月)には降雨量に対して実測水位が異常に上昇しており、予測式と大きく乖離していることが確認できる。回帰式と実測値の決定係数は工事前データにおいて $R^2 = 0.32$ である。

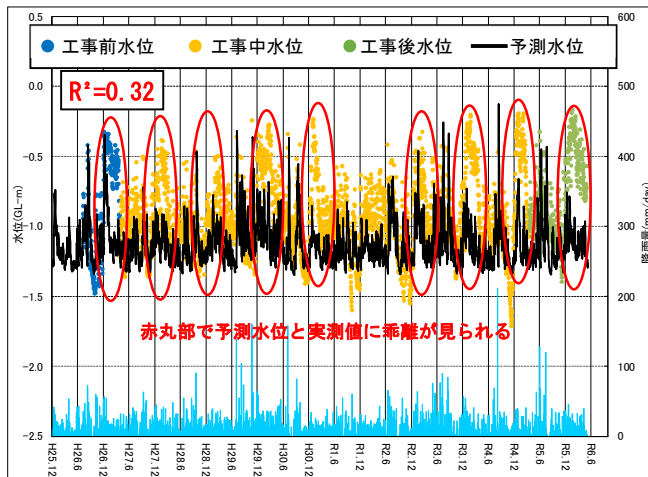


図-3 解析結果(融雪量未考慮時)⁵⁾

2) 融雪量考慮時

1) の予測式と実測値との乖離は、①工事前から確認されること、②毎年同時期(12～3月)にかけて起こっているため、工事影響ではなく融雪による影響と考え、式-2から融雪量を見積もり、降雨量に加算した上で解析を行った(図-4)。再解析の結果、降雨量のみでは再現できない冬季の水位上昇を予測することができ、工事前データにおける決定係数は $R^2 = 0.87$ となり、より実際の水位変動を説明するモデルとすることができた。

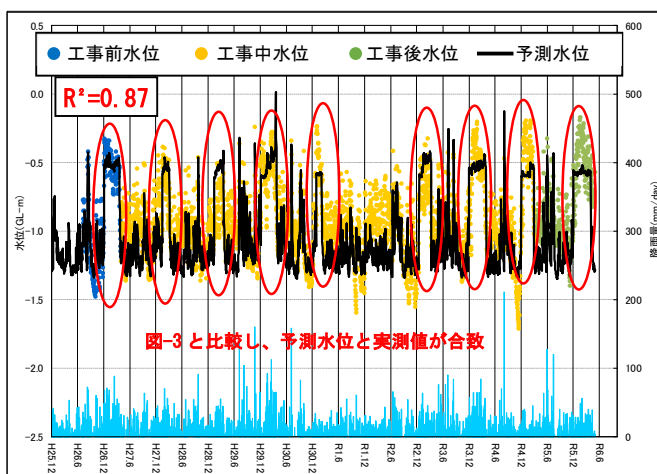


図-4 解析結果(融雪量考慮時)

(2) 予測区間の設定による工事影響評価

図-5に予測区間を記載した時系列グラフを示す。

工事前データから予測区間(濃青線・赤線)を設定し、水文環境が変わらなければこの区間に入ることになる

(≒工事影響が無い)。

結果はほとんどが予測区間内に含まれ、工事期間中～後の顕著な水位低下は無かった。一時的に予測区間を下回る箇所についても、継続的な水位低下が確認されないことから、井戸Aは「工事影響無し」と評価した。予測区間を一時的に下回った要因は、井戸利用のほか、工事前データの期間・水位変動が限定的であり、かつ回帰式は線形近似による一次式であるため、少雨時の水位や複雑な変動を再現できなかったためと考えられる。

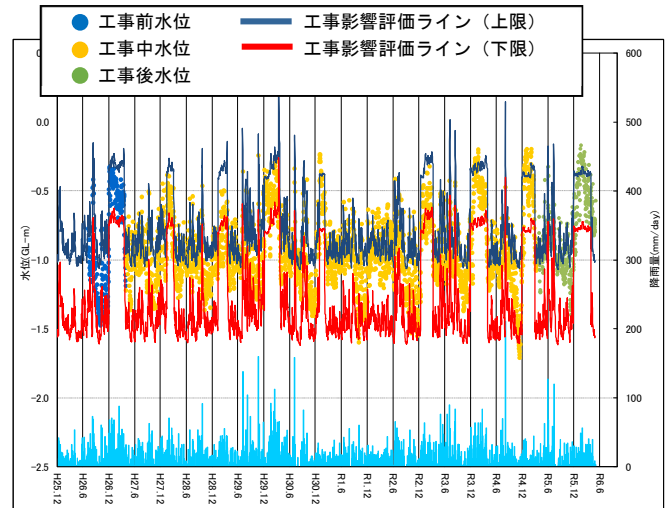


図-5 解析結果(時系列グラフ)

5. まとめと課題

現地の気象条件を考慮した実効雨量解析と、統計学的指標による工事影響評価を実施した事例を紹介した。

井戸Aの解析では、冬季の水位変動の予測が融雪量を考慮することで可能となった。その要因として、井戸Aが平均水位GL-1.0m程度と浅く、周囲の地質が透水性の高い砂礫質な地盤であったことで、融雪後の水が時間の遅れを伴わず地下へ浸透し、水位上昇へ反映されるためと考えられる。一方で、令和元年～令和2年の冬季等、融雪量を考慮したにも関わらず水位の変動を再現できていない箇所もあり、値の算出方法や抽出条件など検討が必要な点が課題である。

《引用・参考文献》

- 1) 国土地理院地形図(に加筆),(最終閲覧日2025年6月2日).
<https://service.gsi.go.jp/geolib/app/address?q=>
- 2) 地すべり観測便覧編集委員会(2012),地すべり観測便覧, pp. 346-345.
- 3) 小島賢治(1979):融雪機構と熱収支,気象研究ノート, 136.
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局編(2016):河川砂防技術指針調査編, pp. 115.
- 5) 気象庁アメダス:観測地点「大野」,(最終閲覧日2025年6月2日).<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>.

地下水観測孔の仕上げ方が与える流向流速測定結果への影響

日本物理探査(株) ○都築孝之

自然地下水研究所 竹内篤雄

芙蓉地質(株) 宮崎基浩, 原澤剛史

キタイ設計(株) 岩瀬信行, 五十嵐慎久

1. はじめに

ボーリング孔のように単一の観測孔を利用した地下水の流向流速を調べる方法としては、固体粒子追跡型と溶液濃度追跡型の二つに大別される¹⁾。例として、前者は地下水中に浮遊する微細粒子の移動をテレビカメラなどで追跡する「テレビ法」が、後者にはヒーターによって加熱された地下水をトレーサーに温度センサを用いてその移動を検出する「熱量法」がそれぞれ挙げられる。いずれの方法も観測孔内を流れる地下水の速さを求めるもので、地盤内を流れている地下水の流速とは異なる。このため、各方法においてダルシー流速または真の流速への変換が行われており、その変換方法は測定装置によって異なっている¹⁾。

筆者らが扱う単孔式加熱型流向流速計²⁾（以降、「竹内式測定器」と呼ぶ）は、大型水槽を使った実験により開口率1%, 5%, 8%, 10%, 13%, 20%に対してダルシー流速に変換する回帰式が得られている。なお、実験に使用したストレーナーの形状はφ5～φ6の丸穴である。

竹内式測定器は、ヒーター周囲に複数の測温体を配置し、ヒーター加熱前後の測温体の温度差から流速を、温度差分布図から流向を求めている²⁾。その原理を図-1に示す。地下水の流れがない場合、センサ中心部のヒーターを加熱すると発生した熱は周囲に均等に拡散し中心部から外側へ同心円状に温度分布が形成される（図-1左）。地下水の流れがある場合、発生した熱は地下水の流れに乗って下流方向に移流する（図-1右）。そのために上流側は低温域を、下流側は高温域をそれぞれ示すことになり、この温度分布から流向を推定することが可能となる。ま

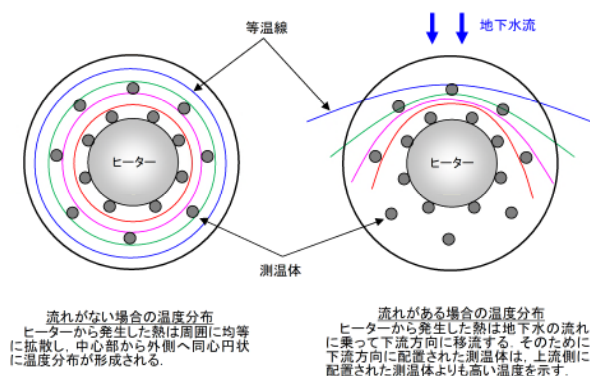


図-1 竹内式測定器の流向判定の原理

た、ヒーター周囲に配置された測温体の加熱前の温度と加熱後の温度との差は、地下水の流速が遅いほど大きく、速いほど小さくなる。これらのことから、ヒーター周囲

に配置した各測温体の温度差を求めることで地下水の流動方向と流速値に関する情報を得ることが可能となる。

近年、横スリットタイプのストレーナーを用いた流向流速測定で、複数の箇所これまでとは異なる温度差分布図が得られたことをきっかけに、観測孔の状態やストレーナーの違いによる観測孔内の水の流れを調べる目的で、小型水槽による実験を行った³⁾。

2. 小型水槽による地下水流動の可視化実験

実験用水槽はアクリル樹脂を使い、長さ1.0m、幅0.13m、深さ0.1mの箱型に作製した。そこに地盤材として目地材（φ5）を詰め、水槽の中央に観測孔として20#のステンレス網で作成した円筒（φ95）を設置し、その中にストレーナー管（VP50）を入れた。ストレーナー管は、比較のために開口率10%および13%の丸穴タイプと開口率12.06%の横スリットタイプ（スリット幅0.5mm）の3種を用意した。また、間詰材（地盤材と同じ材質）については、入れた場合と入れない場合とで行った。

実験は、水槽の上流側から水を入れ、下流側でその排水量と水深から水槽（地盤に相当）内を流れる水の流速（ダルシー流速）を求めた（図-2）。水の流れは蛍光試薬（Fluorescein Sodium）で可視化した（図-3）。



図-2 小型水槽による実験風景

この実験の結果、以下のことがわかった。

- (1) 間詰材を入れない場合は、管の抵抗により水は管の外周をまわって下流へ流れるため、管内に水はほとんど入ってこないことが確認された（図-3左）。
- (2) 間詰材を入れた場合は、管内に水が速やかに浸入し下流へと流れることが確認された（図-3右）。また、管内を流れる水の速さは、丸穴タイプに比べて横スリットタイプでは1/2前後遅いことが確認された。

(1)の結果から、間詰材を入れない観測孔では正確な地下水流動が計測されないことが推測される。

(2)の結果から、横スリットタイプのストレーナーを観測孔として使用した場合、丸穴タイプのストレーナーで回帰式を得ている竹内式測定器では流速の算出値に誤

差が生じる可能性が高いことが予想され、これを確認するために、大型水槽による実験を行った。



図-3 可視化した観測孔内の水の流れ

(左:間詰材無し, 右:間詰材あり, いずれも写真上が上流)

3. 大型水槽による横スリットストレーナー実験

実験水槽は長さ1.5m, 幅0.6m, 深さ0.6mの箱型で, 上下流側に受水槽と排水槽が設置されている(図-4)。受水量は流量計または定量器で, 排水量は定量器でそれぞれ測り, ストレーナー管位置で水深を測ることで水槽内の水の流速(ダルシー流速)を算出した。与えたダルシー流速は $3.787 \times 10^{-6} \text{m/s} \sim 1.800 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 間の19種(各2~3回測定)で, 地盤材と間詰材には $\phi 2 \sim 5$ の豆砂利を使用した。



図-4 大型水槽による実験風景

図-5に実験結果を示す。実験の結果, 以下のことが判明した。

- ①温度差 4.15°C 以下は, 流速と温度差に明瞭な相関がある。
- ②その傾向は温度差 4.86°C まで最大速度値として得ることができる。
- ③ただし, 4.36°C 以上になると, 温度差に対して流速にばらつきが生じる。換言すると, 同じ流速に対して複数の異なる温度差が得られる。

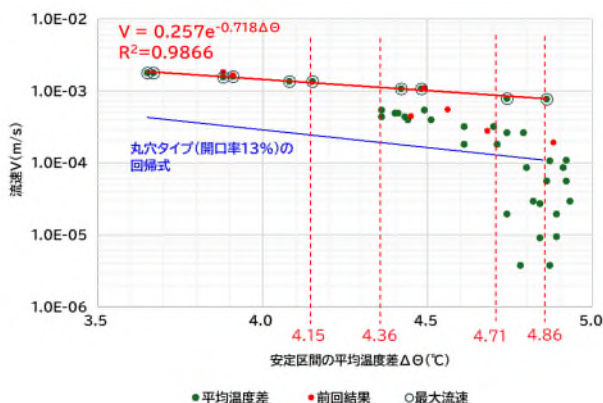


図-5 実験の結果得られた平均温度差と流速との関係

④さらに 4.71°C 以上になるとそのばらつきの幅が2オーダー以上に広がる。

⑤回帰式は類似開口率の丸穴タイプと比べて0.5~1オーダー近い差がある。

これらのことから, 竹内式測定器をはじめとする熱量法では, 同じ開口率でもストレーナーの形状によって異なる回帰式が得られることが判明した。

4. 間詰材の必要性

地下水観測孔の仕上げにおいて, 施工上などの理由で観測孔の残置ができず, 回収に手間がかかるために間詰材を入れないケースが少なくない。2章で述べたように, 間詰材が無いケースでは観測孔内に地下水はほとんど入ってこない。この状態で地下水が孔内に入るのは, ストレーナー管がボーリング孔の上流側の孔壁に接触している場合のみであることも小型水槽実験で確認できている。実際は孔壁崩壊により間詰材を入れた時と同じ状況になっているケースも少なくはないであろうが, このようなケースを除けば, 間詰材の入っていない観測孔での測定で得られたデータの精度はあまり期待できないであろう。

5. まとめ

いろいろなシーンで使われている流向流速測定装置の多くは, 開口率についての条件はあるものの, 間詰材の有無やストレーナーの形状(丸穴, 横スリット, 縦スリットなど)についてはあまり触れていないのが現状である。今回実施した小型水槽および大型水槽による実験結果は, 間詰材の重要性を示すとともに, 実験水槽に与えたダルシー流速と観測孔内を流れる水の速さとの相関から流向流速を求める方法では, 開口率だけでなくストレーナーの形状に応じた回帰式を得る必要があることを示すものである。

なお, 観測孔の仕上げ方については, 全地連のホームページに資料⁴⁾が掲載されているので, それを参考に精度の高い流向流速測定を行うことが望まれる。

《引用・参考文献》

- 1) 地盤調査の方法と解説 (2013): 公益社団法人地盤工学会, pp. 629-633.
- 2) 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法, p. 480, 古今書院
- 3) 都築孝之, 竹内篤雄, 山西正朗, 宮崎基浩, 五十嵐慎久 (2023): 地下水観測孔内部の流動状況の可視化実験報告(その1), 日本応用地質学会, 令和5年度 研究発表会講演論文集, 論文 No. 67.
- 4) 全地連ホームページ内資料「地下水調査のための観測孔の仕上げ方マニュアル(案)」, (最終閲覧日2025年4月17日)。

<https://www.zenchiren.or.jp/geocenter/>

河川近傍における地下水利用を目的とした地下水調査の事例

上山試錐工業㈱ ○佐藤皓星，高木博道，中野利広，神山裕幸

1. はじめに

一般に、河川の伏流水を水利使用する場合には、河川法に基づく許可が必要となる¹⁾。そのため、河川近傍における地下水開発においては、取水対象となる地下水が河川に由来するの否かを特定することが重要となる。

本調査対象地では、これまでも工業用水として地下水が利用されてきたが、図-1に示すように取水井が河川の近傍に位置していることから、これまでの地下水利用は河川管理者から水利使用許可を得たうえで行われてきた。しかしながら、これまでに当該地の地下水が河川の伏流水であるか否かは特定されていない。

本論では、新規取水井設置に先立ち既存取水井（深度5m）の近傍において行った調査ボーリング（B-1）の結果と、孔内水及び河川水の水質分析結果をもとに、当該地の地下水と河川水の関係について考察する。

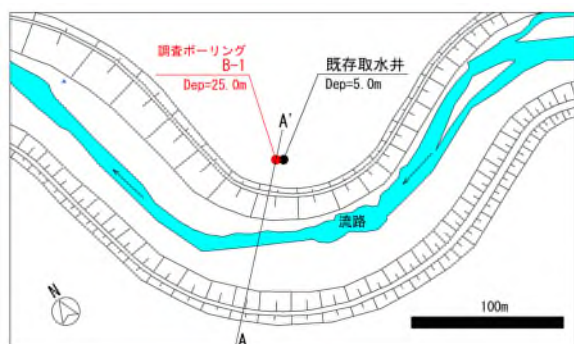


図-1 平面図

2. 地形・地質概要

調査地は洞爺カルデラ北方の火砕流台地を侵食した河川により形成された谷底低地に位置する。谷底低地は幅800m程度で、完新世の河床堆積物に被覆されている。河床堆積物の下位には約11万年前の大規模火砕流噴火により形成された洞爺火砕流堆積物が分布する。

調査箇所の近傍を流下する河川は網状流路を有する礫床河川であり、平常時における流路幅は10m程度である。調査箇所（B-1）は現河道から約50mの箇所に位置する。

3. 調査箇所の地質構成

図-2に調査地の地質断面図を示す。B-1孔におけるボーリング調査の結果より、調査箇所においては、深度17.9mまで火山灰質の砂・砂礫からなる河床堆積物（rd）が分布しており、その下位には洞爺火砕流堆積物に属する弱溶結の凝灰岩（Twt）が分布することが把握された。河床堆積物（rd）は、現場透水試験の結果から砂・砂礫としてごく一般的な透水係数²⁾（ $k=10^{-5} \sim 10^{-4}$ m/secのオーダー）を有することが把握されている。溶結凝灰岩

（Twt）は緻密で相対的な難透水層を構成するものとみられる。

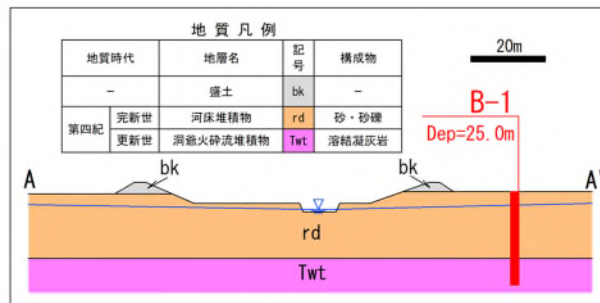


図-2 地質断面図

4. 孔内水位

図-3(a)にB-1孔における掘削深度と水位深度の関係を示すとともに、図-3(b)に観測孔仕上げ後（孔口仕上げ前）の孔内水位を示す。

ボーリング掘削時には、初期水位が近傍の河川水位よりも1.13m高い位置（深度3.54m）で確認されて以降、孔内水位（平衡水位）は掘進に伴い一貫して上昇する傾向を示す。掘進終了後（孔底深度25m）には、孔内水位は深度2.10mまで上昇する。帯水層の深さによる水位の違いは、図-3(b)に示すとおり、観測孔仕上げ後のVP管内側（深度9.5m以深の水位を測定）と外側（深度5.0m以浅の水位を測定）の水位の違いにも表れている。このことから、掘進に伴う水位上昇は、融雪や降雨などに伴う経時的な水位上昇ではなく、深度方向の水理ポテンシャルの上昇を反映しているものと判断される。

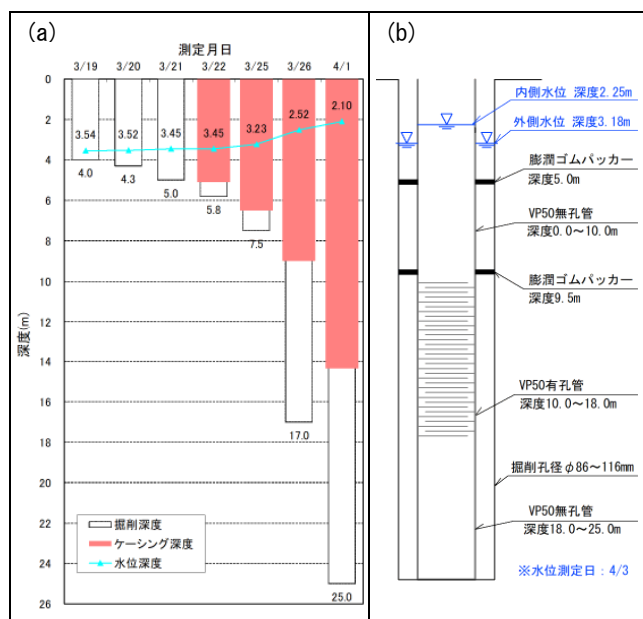


図-3 (a) ボーリング掘削時の孔底深度と水位深度の関係
(b) 観測孔仕上げ後のVP管内側と外側の孔内水位

5. 水質

図-4にヘキサダイアグラムを示すとともに、図-5に電気伝導度 (EC)、pH、溶存酸素 (DO) の深度方向変化を示す。

B-1孔及び既存井で採取された地下水と河川水を比較した場合、ヘキサダイアグラム (図-4) にみられるように河川水と地下水の違いは明瞭であり、河川水は地下水よりもイオン濃度が低く、これを反映して電気伝導度 (EC) も低い。また、溶存酸素 (DO) は、河川水で高く、大気と遮断されている地下水で低い値となっている。

多くの項目において、地下水は採取深度が浅くなるほど河川水の値に近づく傾向を示しているが、pH はこの傾向に当てはまらない。pH は河川水でより高い値を示すが、地下水の pH は採取深度が浅くなるほど低くなり、河川水の値から遠ざかる傾向を示す。すなわち、少なくとも pH の変化傾向については、河川水の地下水への混入では説明できない。地下水の溶存イオン濃度や溶存酸素 (DO)、pH の深度方向の変化は、滞留時間の違いを反映していると推察される。

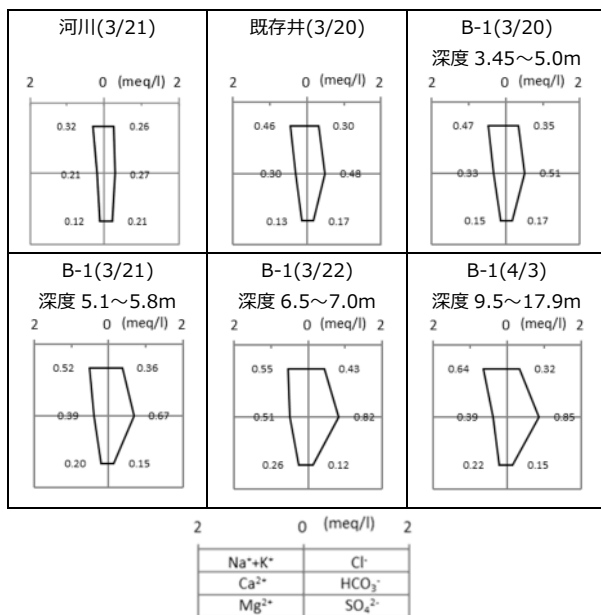


図-4 ヘキサダイアグラム

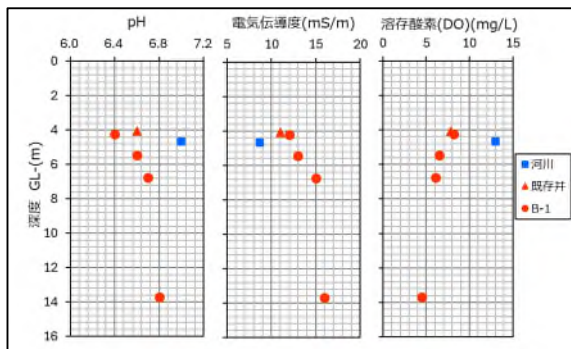


図-5 pH、EC、DO の深度方向変化
※B-1孔の孔口高さを深度0mとした。
※深度は採水区間の中心深度

6. 考察

以上のデータから想定される地下水流動系の概念図を図-6 に示すとともに、以下に説明を加える。

- ①調査地においては、地下水位は近傍の河川水位よりも 1m 以上高い位置にあり、加えて深部ほど水理ポテンシャルが高く、地下深部からの湧昇流の存在が推定される。このことから、調査地の地下水は近傍河川に由来するものではなく、反対に河川に流出しているものと考えられる。
- ②地下水と河川水の間には、溶存イオン濃度及び溶存酸素 (DO) に明瞭な違いが認められ、地下水の方が高い溶存イオン濃度及び低い溶存酸素 (DO) を有する。すなわち、河川水は地下水に比べて滞留時間の短い地下水や融雪水・雨水を多く含むものと推察される。
- ③地下水は、深部ほど溶存イオン濃度が高く、溶存酸素 (DO) が低くなる傾向を示す。すなわち、深部のものほどより遠方で涵養された、滞留時間の長い地下水であると考えられる。

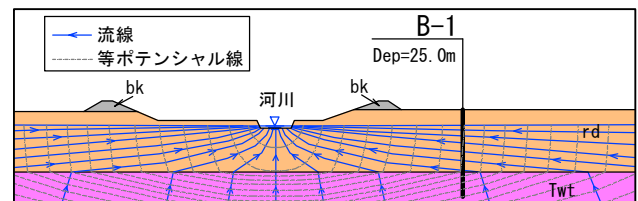


図-6 流線網図 (概念図)

7. おわりに

上述のとおり、調査地の地下水は、近傍河川に由来する伏流水に該当するものではないと考えられる。すなわち、調査地の地下水は、「河川の流水を占用しようとする者は国土交通省令で定めるところにより、河川管理者の許可を受けなければならない。」とする河川法第23条の対象外と判断される。

本事例では、深度方向の孔内水位及び水質の変化と、地下水と河川水の水位及び水質の違いより、当該地における地下水流動系についての一つのイメージを提示するとともに、当該地の地下水が伏流水に該当するものではないとする結論を導いた。本事例が水利使用許可の要否判断や伏流水に関する検討を行う際の一助となれば幸いである。

《引用・参考文献》

- 1) 矢神洋一 (2012) : 水道 Q&A 「河川法の適用を受ける伏流水の水利権の考え方について教えてください」、水道技術ジャーナル、第 65 号、p. 28.
- 2) 地盤調査の方法と解説 (2013) : 公益社団法人地盤工学会、p. 488.

水位観測業務における観測井戸の管理手法に関する事例紹介

千葉エンジニアリング㈱ ○和田 優作, 若月 洋朗
浅野 滋行, 鈴木 太樹, 中島 淳之介

1. はじめに

地質調査の一貫として発注される観測井戸設置および観測業務では一般的にVP-50による小口径の井戸設置を行い、水位観測と併せて水質分析を行う場合がある。本事例において、道路整備工事に伴い工事による周辺井戸の水位の変化、改良工事による水質の変化がないかを観測するために水位観測・水質分析を実施した。

その際、一部の分析項目において基準値の超過がみられた中で、観測井戸の経年劣化、藻やバクテリアなどの繁殖の影響で正確な水質が計測できない懸念があったため、通常行うエアリフト法に加えて、スワビング法を適用することにより正確な水質観測に寄与できた事例を報告する。

2. 水質分析および各洗浄方法の概要

当該調査においては、2箇所で3年程度の水位観測を実施しており、水質分析は3年間の内で各8回実施している。水位観測および水質分析は今後も継続するものである。

なお、水質分析は観測井戸から採取した地下水を使用し実施している。

(1) 水質分析項目

飲用井戸の検査項目である11項目（一般細菌・大腸菌・亜硝酸態窒素・硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素・塩化物イオン・有機物（全有機炭素（TOC）の量）・pH値・味・臭気・色度・濁度）およびヒ素・2-メチルイソボルネオール（MIB）の13項目を行っている。

(2) エアリフト法による洗浄について

エアリフト法による井戸洗浄はエアホースと接続した塩化ビニル製の揚砂管を井戸内に挿入し、エアーコンプレッサーから送られる圧縮空気によって、揚砂管内に圧力差を生じさせることで、地下水と共に沈積物を浚渫する方法である。基本的には、スクリーン部に沈積する砂を浚渫するとともに地下水を置換することを目的として実施される。

(3) スワビング法による洗浄について

鉄およびゴム製などのスワブ玉と呼ばれるピストン状の器具を井戸内で上下させることによって地下水の動揺を大きくさせ、強制的に地下水を呼び込むことで起きる衝撃作用でスクリーン部の洗浄を行う方法である。

基本的には揚水管や井戸管のスクリーン部に付着したスケール（水中の無機塩類が付着したもの）を、除去するために行われる。

なお本事例においては、スポンジ製のスワブ玉を使用し、先端にブラシを備えたスワビング法とブラッシング法を並行して行うことができるものを使用した。使用し



写真-1 実際に使用したスワビング資材

た資材を写真-1に示す。

3. 分析結果の推移とスワビング法の実施

例年の水質分析において、エアリフト法を使用していたが、1箇所の井戸で硝酸態窒素および亜硝酸態窒素の分析値が、基準値を大きく超過した。数値の妥当性を判断するうえで、藻やバクテリアなどの繁殖の可能性が考えられたため、より強力に井戸内を洗浄できるスワビング法を試みた。

スワビング後の分析結果に基づいて、特徴的な傾向を示した3項目について、図-1～3に示す。

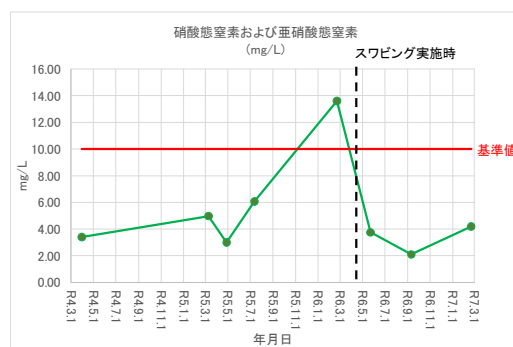


図-1 硝酸態窒素および亜硝酸態窒素の推移グラフ

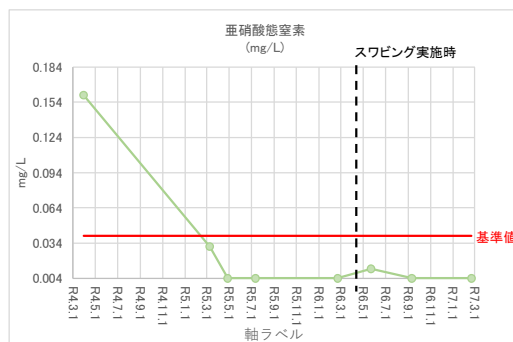


図-2 亜硝酸態窒素の推移グラフ

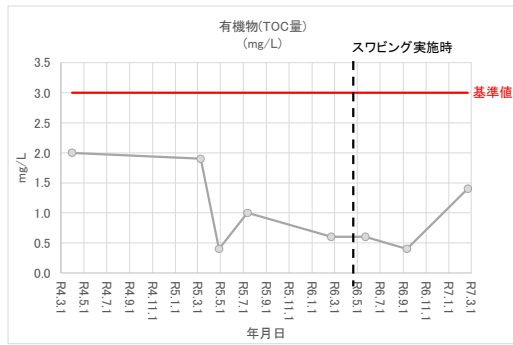


図-3 有機物(TOC量)の推移グラフ

(1) スワビング法で改善された項目

図-1の硝酸態窒素および亜硝酸態窒素を見ると、年々増加傾向を示した値が5回目の分析時に基準値を大きく上回っていることが確認できる。硝酸態窒素および亜硝酸態窒素は植物の死骸などから還元される物質であり、その中で、各観測井戸の結果を比べて他の観測井戸では基準値の超過がみられなかったこと、もともと一般細菌の値が高かったことなどから藻やバクテリアが繁殖しやすい環境であると仮定した。このことから水質の変化ではなく観測井戸の環境下によるものであると考え、より強力な洗浄を試行するため、スワビング法を採用した。

スワビング法を実施した後の分析では、過年度並みに数値が下がった結果を示したため、正確な分析結果が得られたと判断できた。

(2) スワビング法で上昇した項目

図-2の亜硝酸態窒素を見ると、低下傾向を示しているがスワビング法を実施した後の分析では若干上昇している。これは、スワビング法で強制的に地下水を呼び込んだため、原因物質の流入による一時的な上昇が起きたと考えられ、次の分析では数値が低下していることが、継続的な分析で確認できる。このためスワビング法を実施した後は一部の項目では一時的に数値が上昇する可能性がある。

(3) スワビング法の影響を受けていないと思われる項目

図-3の有機物(TOC量)を見ると通年で低下傾向を示しており、スワビング法を実施した後の分析結果もほぼ変わらない傾向を示しており、スワビング法の影響は特に受けていないと考えられる。

4. スワビング法の活用

今回、観測井戸内の洗浄がエアリフト法のみで不十分であったが、これは採水試料の目視による観察だけでは判断が難しいためである。本事例においては目視による確認では難しかったため、超過を確認した後にスワビング法を実施している。そのため、分析結果が増加傾向を示す場合など必要に応じて、スワビング法の適用を推奨したい。また、スワビング法は、経年によって藻や微細な砂、蓄積されたスケール等による目詰まりの対策にも

なるため、地下水位の正確な把握にも寄与すると考えられる。

5. スワビング法の適用事例に対する考察

本事例は観測井戸内の環境(汚れ)による分析結果の異常であると判断されるため、スワビング法の併用による洗浄が有効であった。観測井戸内の汚れによって実際の自然的水質の変化ではなく、工事に関連する数値の変化ではないと判断することができ、本事例においては当該工事の中止などは起案されなかった。しかし、洗浄によって値に変化が起きない等、観測井戸内とは別の要因による異常値であった場合は、工事の影響である可能性は否定できないため、即時の報告が必要と考えられる。また、本事例のような経年劣化などの自然による水質の変化以外で全く別の要因により異常値が確認されるケースも想定されるため、分析項目と不具合事例の関連性や組み合わせについて、整理が必要と考えられる。

6. まとめ

これまでの観測結果から、井戸環境に大きく影響を受けている事象に関して、スワビング法が有効的と考えられる。本事例の経験から、観測井戸の水質分析などにおいて以下の知見を得た。

- ① 観測井戸の設置環境や地下水の性質等によって、エアリフト法では洗浄が不十分となる可能性がある。
- ② 本事例の水質分析の基準値超過は、スワビング法による洗浄で自然的水質の変化ではないことが確認された。
- ③ 水質分析の多くの項目は目視による異常の確認が難しいことから、必要に応じてスワビング法を実施し、井戸内環境の正常化を図ることを推奨する。
- ④ スワビング法は、経年によって藻や微細な砂、蓄積されたスケール等による目詰まりの対策にもなるため、地下水位の正確な把握にも寄与すると考えられる。
- ⑤ 本事例では工事による影響ではないと判断されたため、工事の中止などはなかった。ただし、水質の変化以外で、全く別の要因によって異常値が確認されるケースも想定されるため、分析項目と不具合事例の関連を整理する必要がある。