

3. 調査結果

3.1 井戸掘削

(1) 掘削工事

掘削工事は、平成 22 年 11 月 15 日より着手した。

工事概要は、以下のとおり

掘削口径 : ϕ 450 mm

掘削深度 : GL-84.0m

完成深度 : 同上

管種 : SGP300A

管径 : ϕ 300 mm

ストレーナー種 : SUS 巻線型ストレーナー (丸孔パイプベース)

(延長 : $@5.5\text{m} \times 6 = 33.0\text{m}$ 、有効長 : $@5.0\text{m} \times 6 = 30.0\text{m}$)

ストレーナー位置 : GL -18.0~-23.5m

GL -40.0~-56.5m

GL -67.5~-78.5m

本調査では、コアボーリングによる地質確認は実施していないため、掘削時の状況および電気検層結果などから、地質を想定している。これに基づき作成した地質柱状図を図 4-3-1 に示す。

今回の掘削により想定される地質は、粘土や玉石などを混入する砂礫層を主体として構成されているものとみられる。基盤を構成している地質が、浅間山起源の火山岩や火山砕屑岩類であることをふまえると、礫や粘土の混入率や硬軟に差異がある砂礫層が複雑に入り組んで分布していることが想定される。

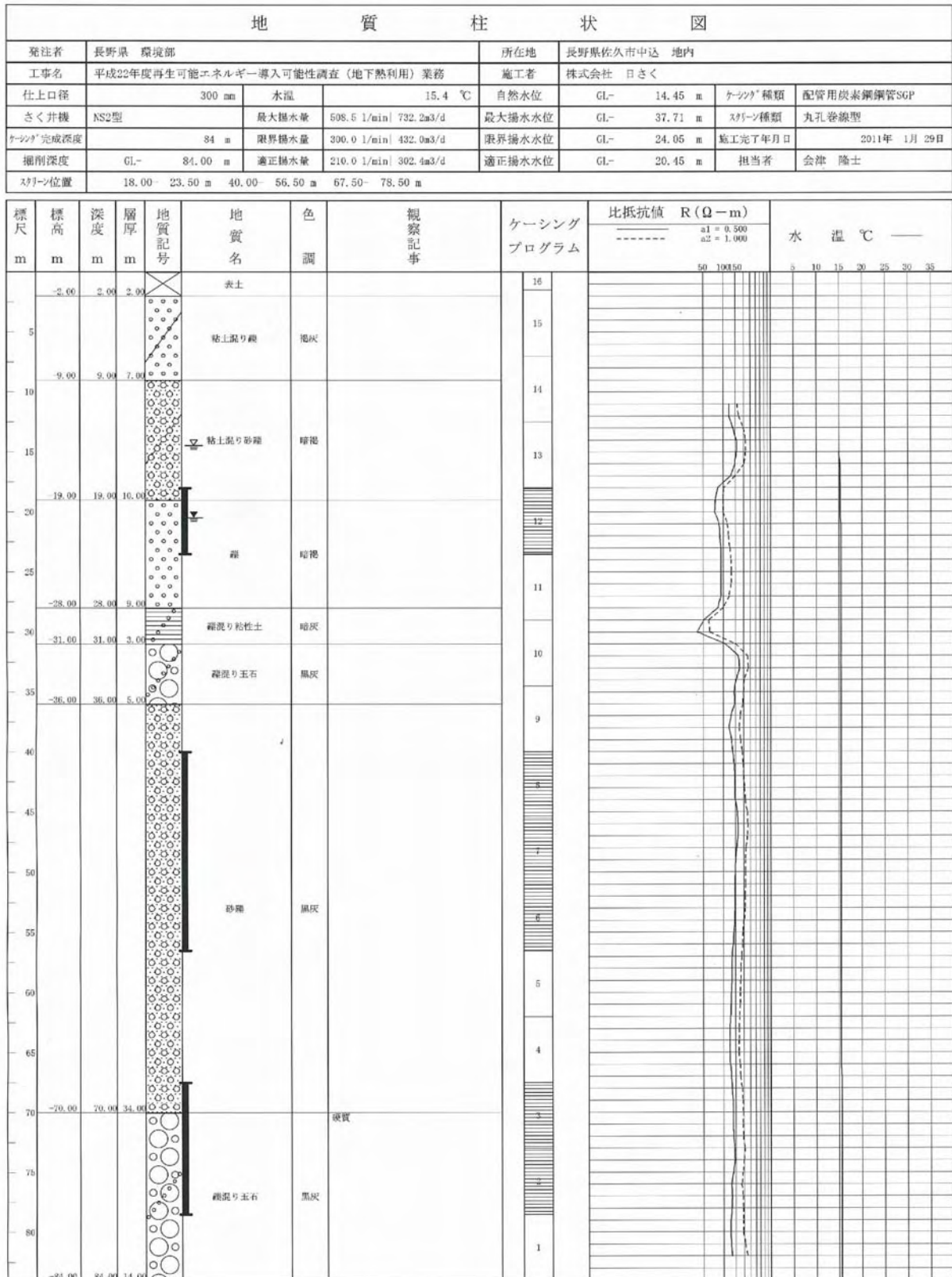


図 4-3-1 地質柱状図

(2) 電気検層

井戸の掘削終了後、裸孔状態で電気検層を実施した。

電気検層は、地層の性質および深さと厚さを知るとともに、帯水層の位置とその良否の判定をするうえで必要である。

電気検層には、比抵抗検層と自然電位（sp）検層があるが、今回は一般的に行われている比抵抗検層を実施した。

1) 検層方法

裸孔内の地層電気抵抗を測定するには、泥水で満たされた裸孔の中に電極を降下させて、電流を流し電位を測定する方法で測定した電位差から比抵抗値を求める。

比抵抗検層の電極配置は数種類あるが、主としては2極法および4極法が用いられる。今回は2極法を実施した。

2極法は、2個の電極を用い通常2種類もしくはそれ以上の電極間隔で測定する。最小の電極間隔は裸孔の口径に近似し、最大電極間隔は一般に裸孔径の2～4倍とする。最小電極間隔は地層区分の対比目的に、最大電極間隔は地層の見掛比抵抗値を求めるものである。

本井では、電極間隔を2種類とし最小電極間隔を0.5m、最大電極間隔を1.0mで測定を実施した。

比抵抗(ρ)は次式により求められる。

$$\begin{aligned}\rho &= 4\pi a \frac{V}{I} \\ &= 4\pi a R \quad (\Omega - m)\end{aligned}$$

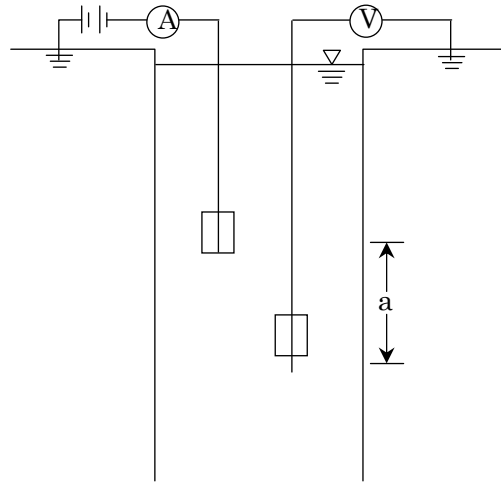
I : 電 流

V : 電位差

a : 電極間隔

R : 抵抗値

2 極法



求められた比抵抗値は、孔内の泥水、地層の性質、地下水の水質、裸孔の口径などの影響をうけている。これらの影響が最小限になるようにしていくつかの比抵抗曲線（電気検層図）を作図する。比抵抗は、地層の含水量とは関係が薄く、間隙水のイオン濃度・粘土鉱物・間隙率に関係する。たとえば、一般的に頁岩・粘土・塩水を含む砂の比抵抗は低く、淡水を含む砂・礫・割れ目の少ない溶岩・石灰岩などでは高い。

見掛比抵抗値と帯水層区分は一般につきのようになる。

(a)	溶岩地帯	300～1,000	(Ω -m)
(b)	礫層	150～500	(Ω -m)
(c)	砂礫	100～300	(Ω -m)
(d)	砂	30～200	(Ω -m)

採水条件としては、(a)は地下水の供給源の大きさに左右されるので比抵抗値のみでは比較されない。また、一般には(b)がよいとされているが比産出量(有効空隙率)からみると必ずしも礫の粒径が大きいほどよいとはいえない。むしろ粒径の揃った粗砂等のほうが良い条件といえる。比抵抗値も100～300(Ω -m)が良好な帯水層となる場合が多く、比抵抗値が80(Ω -m)以下の地層は難帯水層または非帯水層である。

砂礫層で低比抵抗値を示すのは、固形物総量が多いことを意味している。

電気検層は最小、最大の2種類の電極間隔で測定するが、両曲線の間隔が大きいほど良好な帯水層である。海水汚染等により固形物総量が増えた場合には、最小電極間隔の曲線が逆に大きくなり、粘土質層では両曲線は一致する。

2) 電気検層結果

比抵抗検層は2極法にて実施、測定結果は図4-3-1の地質柱状図の電気検層図の通りである。

掘削時に掘削泥水とともに排出されてくるスライムや掘進状況などもふまえ、本井は砂礫層が主体で、礫や粘土の混入率が変化する砂礫層で構成されるものとみられる。深度31m付近までは粘土混じりの砂礫が主体であり、これ以深は玉石混じりの砂礫もしくは砂礫であるとみられる。

比抵抗値の傾向としては、深度30m付近を境に異なり、境界となっている深度GL -28.0~-31.0m間の比抵抗値が極端に低くなっていることから、この区間は粘土を主体に構成されている地質であるものと判断した。

31m以深の砂礫層は100~250(Ω -m)と良好な値を示しており、帯水層として期待をもてる地層である。

ストレーナー位置は上記検層の結果、深度GL -28.0~-31.0m間に認められる礫混じり粘土層の分布と比抵抗値の高い区間をふまえ、下記のとおり設置することとした。

GL -18.0~-23.5m

GL -40.0~-56.5m

GL -67.5~-78.5m

(延長 : @5.5m × 6本 = 33.0m 有孔長 : @5.0m × 6本 = 30.0m)

(3) 温度検層

井戸工事終了後（揚水試験終了から4日後）、温度検層を実施した。

温度検層は、地下水位以下1m毎の温度を測定した。測定結果は表4-3-1と図4-3-1の温度検層図に示したとおりである。

地下水位面から井戸最深部までの温度変化は、14.9℃から15.5℃とあまり大きな温度上昇は認められず、地下水位面から4m程度（GL -18m付近）で温度は安定してしまい、その後深度67m以降で0.1℃ほど上昇するのがみられただけであった。

本井における温度上昇勾配をみると1℃程度であり、一般的な地層の地温上昇勾配（3℃）よりも低いといえる。

表 4-3-1 温度検層結果一覧

深度 (m)	水温 (°C)	深度 (m)	水温 (°C)	深度 (m)	水温 (°C)	深度 (m)	水温 (°C)
1		26	15.4	51	15.4	76	15.5
2		27	15.4	52	15.4	77	15.5
3		28	15.4	53	15.4	78	15.5
4		29	15.4	54	15.4	79	15.5
5		30	15.4	55	15.4	80	15.5
6		31	15.4	56	15.4	81	15.5
7		32	15.4	57	15.4	82	15.5
8		33	15.4	58	15.4	83	15.5
9		34	15.4	59	15.4	84	15.5
10		35	15.4	60	15.4	85	
11		36	15.4	61	15.4	86	
12		37	15.4	62	15.4	87	
13		38	15.4	63	15.4	88	
14		39	15.4	64	15.4	89	
15	14.9	40	15.4	65	15.4	90	
16	15.1	41	15.4	66	15.4	91	
17	15.1	42	15.4	67	15.5	92	
18	15.2	43	15.4	68	15.5	93	
19	15.2	44	15.4	69	15.5	94	
20	15.2	45	15.4	70	15.5	95	
21	15.4	46	15.4	71	15.5	96	
22	15.4	47	15.4	72	15.5	97	
23	15.4	48	15.4	73	15.5	98	
24	15.4	49	15.4	74	15.5	99	
25	15.4	50	15.4	75	15.5	100	

3.2 揚水試験

(1) 適正揚水量について

適正揚水量については、段階揚水試験を実施することにより設定する。

段階揚水試験は井戸試験とも呼ばれ、各試験中最も重要なものであり、井戸の揚水能力を判定するために行われるものである。

試験の方法は、揚水量をいくつかの段階に区分して、1つの段階の揚水量で水量を維持し、水位が安定すると次の段階の揚水量に増加または減少させ、再び水位が安定するまで揚水量を一定のまま揚水を続け、数段階にわたってこの方法を行い、揚水量と水位を記録して各段階での水位の安定した時点での水位降下量と揚水量の関係をグラフで解析する方法である。

地下水の流れは大別すると整流と乱流の二つに分けられる。

流れが整流であれば Darcy の公式により

$$V = K \cdot I \quad (V : \text{流速} \quad K : \text{定数} \quad I : \text{動水勾配})$$

と表わされるが、乱流になると上式は

$$V = K \cdot I^n \quad (n > 1)$$

これは揚水井の場合も同じであって、揚水量と水位降下との関係は一般式として

$$Q = C \cdot S^n$$

(Q : 揚水量 C : 地質の透水性に関する常数 S : 水位降下量)

で表わされる。

両対数座標の X 軸に揚水量(Q)、Y 軸に水位降下量(S)をとり、プロットすれば整流の場合 $n = 1$ であるから、直線の角度は 45 度となる。45 度あるいは 45 度以下の直線の部分における地下水の流れは整流であるが、これがある限界に達すると水位降下が大きくなるわりに揚水量が増加しなくなる。すなわち、地下水の補給と揚水量がバランスしている範囲においては、 $Q \sim S$ 曲線は直線となり、その限界を越えた場合は急カーブで水位の降下量が増加する。いわゆる $Q \sim S$ 曲線に変曲点がみられる事が多い。この変曲点における揚水量を一般的に、限界揚水量と呼んでいる。

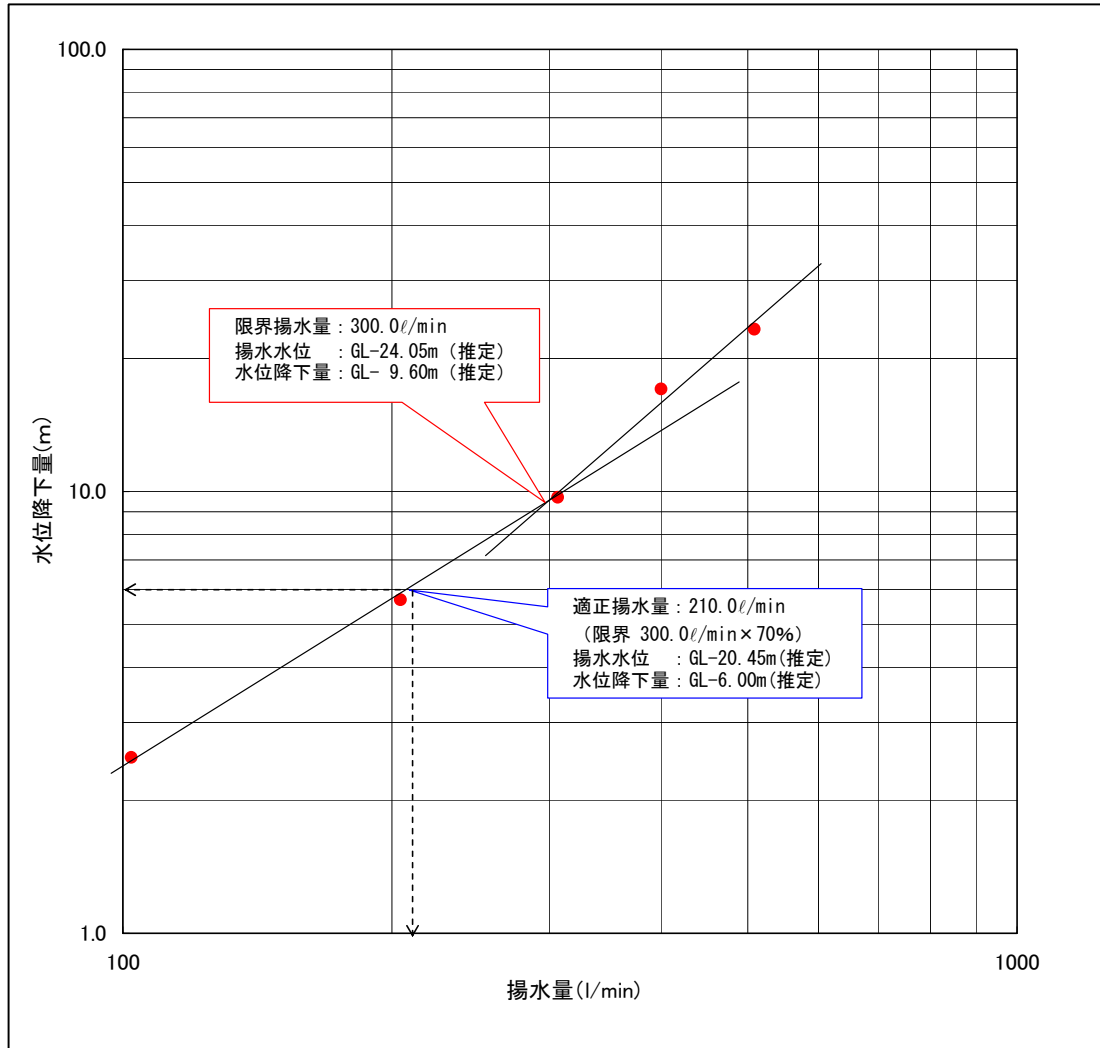
試験では、仮設ポンプを本井戸の GL -60.0m の深度に設置して、100 ℓ/min を第 1 段階として、その後 100 ℓ/min を目安に揚水量を増加、500 ℓ/min までの 5 段階でそれぞれ 1 時間の揚水を行った。

試験結果は、図 4-3-2 の段階揚水試験グラフに示したとおりである。概ね 300 ℓ/min が $Q \sim S$ 曲線の変化点に相当するものとみられることから、これが本井の限界揚水量であると設定した。また、適正揚水量については、とくに決められた設定基準は定められていないものの、一般的な水源井などでは限界揚水量の 7 割程度を目安に適正揚水量を設定していることをふまえ、本井もこれを参考として限界揚水 (300 ℓ/min) の 7 割を適正揚水量 (210 ℓ/min) とした。

段階揚水試験グラフ

工事名：平成22年度 再生可能エネルギー導入可能性（地下熱利用）事業

井戸番号： 測場 所：佐久市中込 佐久総合病院建設予定地 試験日： H23.1.26 自然水位： 14.45 m



段階	揚水量 Q(l/min)	水位(m)	水位降下量 s (m)	Q/s(l/min/m)	備考
1	102.2	16.95	2.50	40.9	
2	204.5	20.13	5.68	36.0	
3	306.6	24.14	9.69	31.6	限界揚水量
4	400.0	31.49	17.04	23.5	
5	508.5	37.71	23.26	21.9	
6					

図 4-3-2 段階揚水試験グラフ

(2) 水理定数の算出について

電気検層などの結果をふまえ、本井戸については深度 28.0～31.0m間に分布している礫混じり粘土層を難透水層として、それ以浅に第1帯水層、それ以深に第2帯水層が存在するものと判断し、ストレーナー設置区間を決定し井戸仕上げをした。しかしながら、段階揚水試験では、200 ℓ/min を揚水している時点で GL -20.13m まで水位低下してしまい、第1帯水層に設置したストレーナーの半分程度しか水没していない状況となってしまった。これは第1帯水層に賦存する地下水がきわめて少ないことを反映している結果であるとみられると同時に、通常自然水位も GL -14.0～15.0m間に存在していることもふまえ、バッカー使用による第1帯水層での各層揚水試験の実施は非常に困難であると判断し、本井戸では段階揚水試験で実施したのと同様、GL -60.0mに仮設ポンプを設置した状態での連続揚水試験および回復試験を実施することにより、その試験結果から水理定数を算出し、将来揚水による周辺への影響（地下水位低下）を予測するための基礎資料とした。

1) 水理定数の算出方法

揚水中の揚水井においては、スクリーンや埋め戻し部などで大きな水頭損失が生じることが懸念される。したがって、揚水試験結果から水理定数を求めるには、揚水井本井の水位変動データではなく、揚水井の周辺に設けた観測井の水位変動データを用いて解析を行うことが適切である。ただし、本調査においては、観測井戸を別途設置することや、周辺に代用可能な井戸の存在も確認できなかったことにより、観測井の水位変動による解析を実施することができなかつたため、以下のように水理定数を試算した。

透水量係数は、揚水停止後の揚水井本井における水位回復量に基づき、回復法（ホーナー法）による非定常流解析を行うことで試算した。透水係数は、求められた透水量係数を帯水層厚で除することで試算した。

一方、貯留係数は、回復法（ホーナー法）では求めることができないため、これについてはヤコブ法、タイス法およびハンタッシュ・ヤコブ法を用いた非定常流解析を行い、貯留係数を試算した。

2) 水理定数の算出

本井戸における連続揚水試験および回復試験の経過図を、図 4-3-3 に示す。

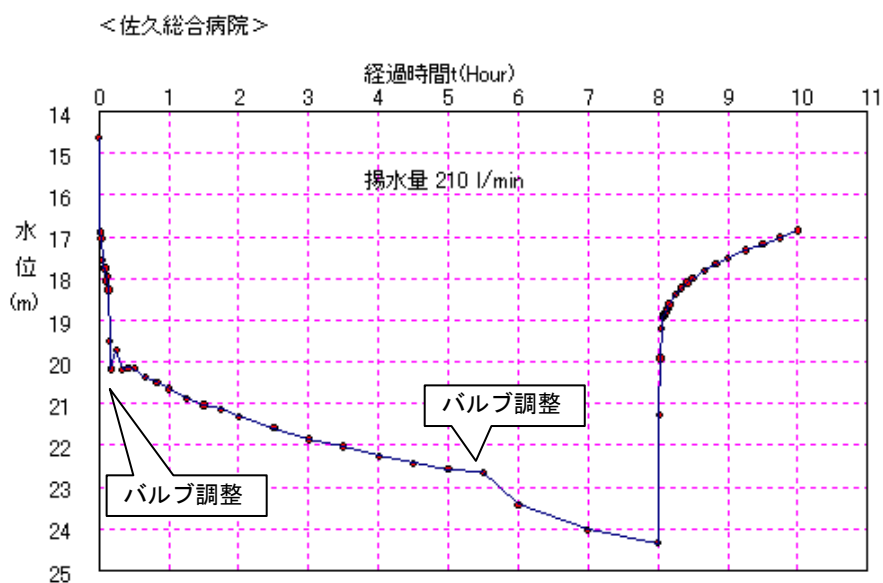


図 4-3-3 揚水試験および回復試験経過図

- ・回復法（ホーナー法）による算出

図 4-3-4 に回復法（ホーナー法）による水理定数の算出結果を示す。

透水量係数 T は、 $3.77 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ となり、帯水層厚 33m（スクリーン長）とすると、透水係数 K は、 $1.02 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ となった。

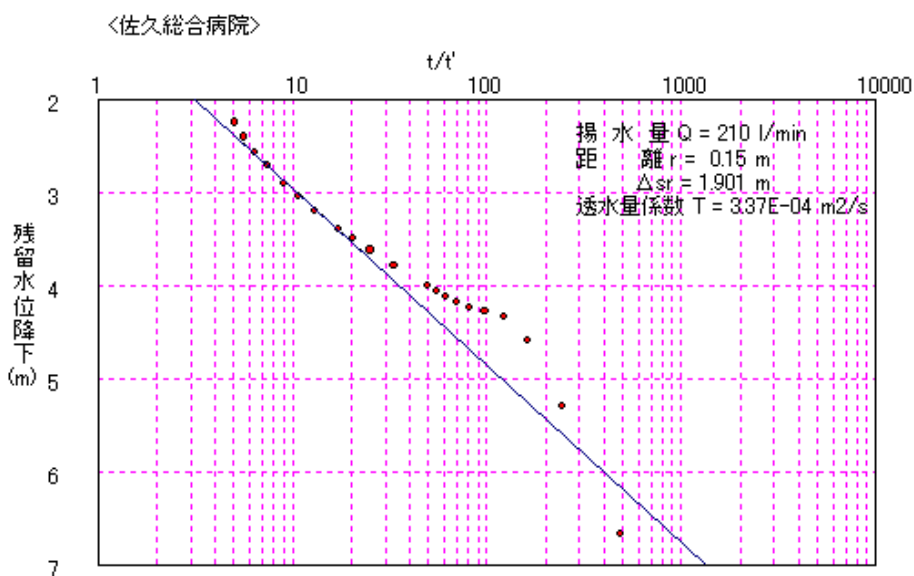


図 4-3-4 回復法（ホーナー法）による水理定数の算出結果

- Jacob の直線解析法による算出

図 4-3-5 に Jacob の直線解析法による水理定数の算出結果を示す。

揚水開始から十分に時間を経過し、水位降下がある程度安定したとみられるプロットをもとに解析を行うと、貯留係数 S は、 5.12×10^{-1} と算出された。なお、透水量係数 T は、 $2.39 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ となり、帯水層厚 33m (スクリーン長) とすると、透水係数 K は、 $7.24 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ となった。

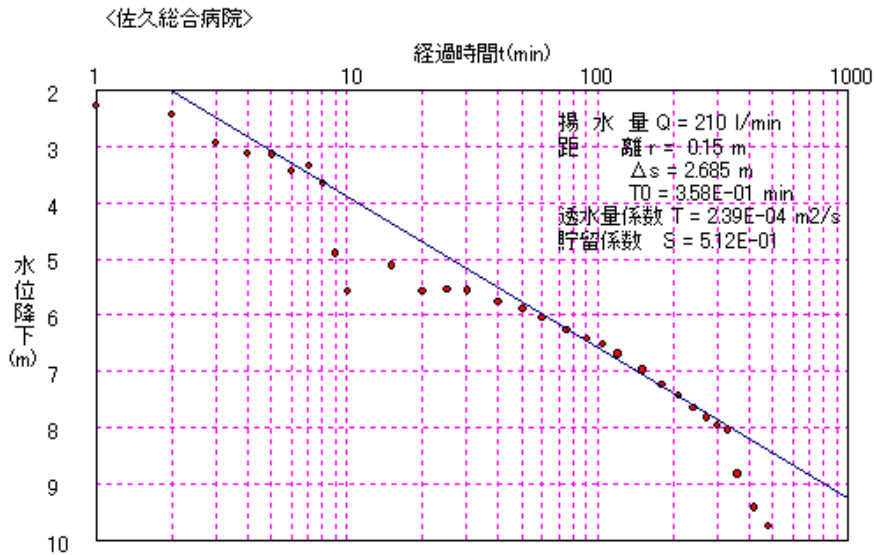


図 4-3-5 Jacob の直線解析法による水理定数の算出結果

- Theis の標準曲線法による算出

図 4-3-6 に Theis の標準曲線法による水理定数の算出結果を示す。

ここで貯留係数 S は、 2.97×10^{-1} と算出された。なお、透水量係数 T は、 $2.79 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ となり、帯水層厚 33m (スクリーン長) とすると、透水係数 K は、 $8.45 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ となった。

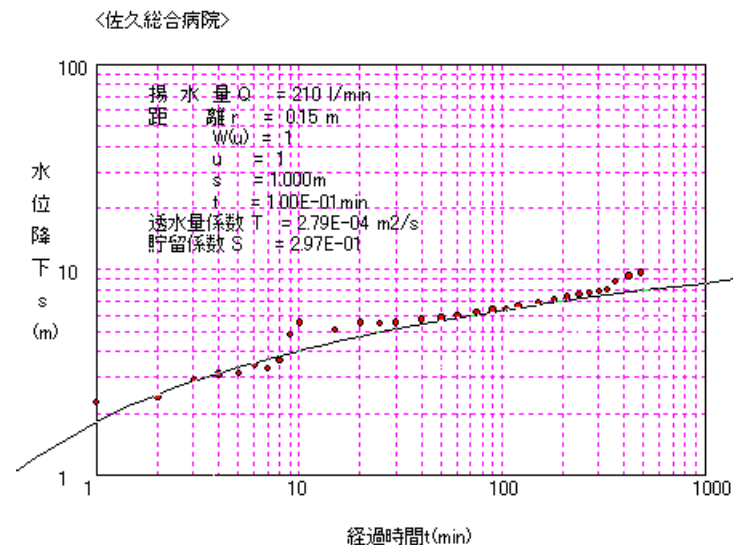


図 4-3-6 Theis の標準曲線法による水理定数の算出結果

・ハンタッシュ・ヤコブの解析法（インバージョン解析）による算出

図 4-3-7 にハンタッシュ・ヤコブの解析法による水理定数の算出結果を示す。

ここで貯留係数 S は、 3.34×10^{-1} と算出された。なお、透水量係数 T は、 $2.46 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ となり、帯水層厚 33m（スクリーン長）とすると、透水係数 K は、 $7.45 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ となった。

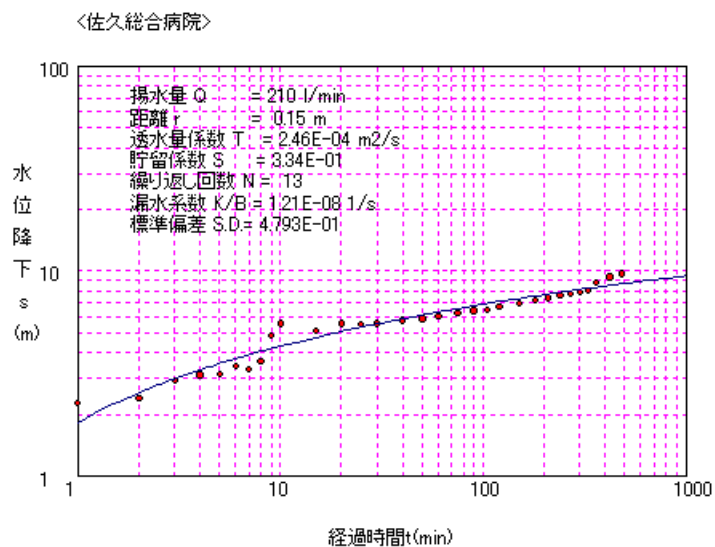


図 4-3-7 ハンタッシュ・ヤコブの解析法による水理定数の算出結果

3) 水理定数の算出まとめ

表 4-3-2 に、透水係数の算出結果を示す。

表 4-3-2 水理定数算出結果一覧

解析方法	透水量係数 (m^2/s)	透水係数 (cm/s)	貯留係数
Jacob の直線解析法	2.39×10^{-4}	7.24×10^{-4}	5.12×10^{-1}
Theis の標準曲線法	2.79×10^{-4}	8.45×10^{-4}	2.97×10^{-1}
ハタツシユ・ヤコブ ⁴ の解析法	2.46×10^{-4}	7.45×10^{-4}	3.34×10^{-1}
水位回復法	3.37×10^{-4}	1.02×10^{-3}	—
平均値	2.75×10^{-4}	8.34×10^{-4}	3.81×10^{-1}

図 4-3-8 に一般的な透水係数と地質の関係を示す。この透水係数は、細砂・シルト・シルトと砂の混合物の上位（砂または砂礫の下位）に位置している。

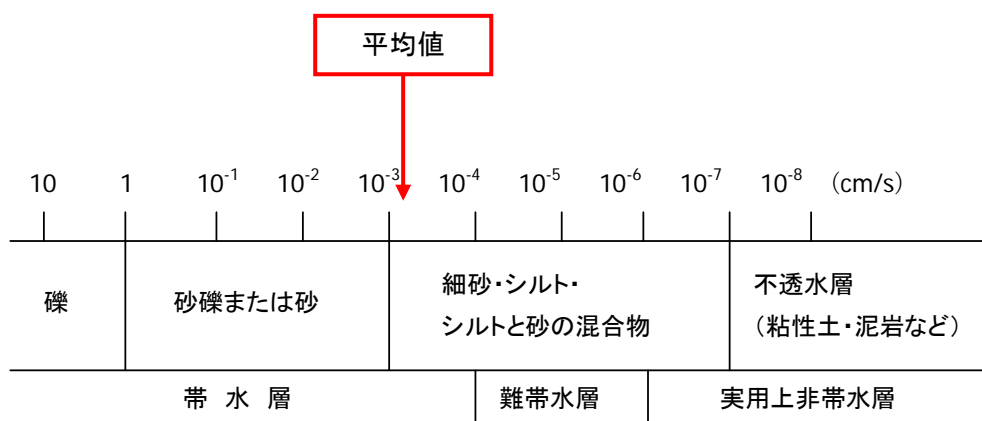


図 4-3-8 透水係数と帯水層、地質状況の関係

(3) 影響圏の概算

井戸影響圏の考え方には諸説あり、精度の高い予測のためには、将来的に地下水シミュレーションによる予測が必要となるが、ここでは井戸公式により簡易的に揚水に伴う影響圏の試算を実施した。

日本水道協会「水道施設設計指針」(2001)では、実際に井戸を利用する上で影響のほとんどない量として、「10~20cm以内」を挙げている。したがって、ここでは水位低下量 $s > 20\text{cm}$ になる範囲が影響圏 R であると考え、その範囲を試算した。

なお、ここでは前頁表 4-3-2 の平均値を用いて、影響圏の試算を行った。

Theis の非平衡公式 $s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$ より、影響圏を算出した。

s : 水位低下量 (m)

Q : 揚水量 (m^3/s)

T : 透水量係数 (m^2/s)

ここでは、 Q に適正揚水量 $210 \text{ l}/\text{min} = 0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 T に透水量係数 $2.75 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ をそれぞれ代入した。

$$s \cdot 0.20 = \frac{0.004}{4\pi \times 0.00028} W(u)$$

$$W(u) = \frac{4\pi \times 0.00028}{0.004} \times 0.20 = 0.197$$

$W(u)$ はウェンツェルの井戸関数であり、

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \cong -0.5772 - \ln(u) + u - \left(\frac{u^2}{2 \times 2!}\right) + \left(\frac{u^3}{3 \times 3!}\right) - \left(\frac{u^4}{4 \times 4!}\right) + \dots$$

と表され、 $W(u) = 0.197$ のとき、 $u \cong 1.065$ となる。

$$\text{非平衡公式 } u = \frac{R^2 S}{4tT} \text{ から、 } R = 2\sqrt{\frac{uT}{S}}$$

S には貯留係数 6.15×10^{-4} を、連続揚水時間 t には連続井戸稼働時間 8 時間 = 28,800s をそれぞれ代入した。

したがって、影響圏 R は、

$$R = 2\sqrt{\frac{1.065 \times 28800 \times 2.75 \times 10^{-4}}{3.81 \times 10^{-1}}} = 9.41 \cong 9 \text{ m}$$

と試算される。

3. 3 水質検査

(1) 15 項目水質検査

15 項目の水質検査は、連続揚水試験時に採取した試料により実施した。

15 項目の水質検査については、(社) 日本冷凍空調工業会で示される冷却水・冷水・温水・補給水の水質基準値という基準が設定されていることから、ここで示される冷却水系・循環式・循環水の基準値との比較をするために、表 4-3-3 にすべての検査結果と基準値をまとめて示した。

表 4-3-3 15 項目水質検査結果一覧表

項 目	冷 却 水 系		全 層	傾 向	
	循 環 式			腐 食	スケール
	循 環 水				
基 準 項 目	pH (25℃)	6.5~8.2	6.6	○	○
	電気伝導率 (mS/m) (25℃)	80 以下	29	○	○
	塩化物イオン (mg/l)	200 以下	14	○	
	硫酸イオン (mg/l)	200 以下	73	○	
	酸消費量 (pH4.8) (mgCaCO ₃ /l)	100 以下	45		○
	全硬度 (mgCaCO ₃ /l)	200 以下	110		○
	カルシウム濃度 (mgCaCO ₃ /l)	150 以下	110		○
イオン状シリカ (mgSiO ₂ /l)	50 以下	59		○	
参 考 項 目	鉄 (mg/l)	1.0 以下	0.65	○	○
	銅 (mg/l)	0.3 以下	0.01 未満	○	
	硫化物イオン (mg/l)	検出されないこと	0.05 未満	○	
	アンモニウムイオン (mg/l)	1.0 以下	0.50	○	
	残留塩素 (mg/l)	0.3 以下	0.1 未満	○	
	遊離炭酸 (mg/l)	4.0 以下	13	○	
	安定度指数	6.0~7.0	9.2	○	○

(注) 色付きは基準超過値

検査の結果は、表に示したとおりである。

水質基準を超過している項目は、基準項目ではイオン状シリカ、参考項目では遊離炭酸と安定度指数であった。また、基準は超過していないまでも、それに近い値を示す項目としてカルシウム硬度や鉄が挙げられる。したがって、本井から採取される地下水を、循環水として使用する場合には、何らかの対応をする必要がある。

(2) 27 項目水質検査

27 項目の水質検査については、全層の揚水試験時に採取した試料についてのみ実施した。

検査結果については、現行で設定されている水質基準値と比較できるように表 4-3-4 としてまとめた。基準値を超過しているのは、マンガンのみである。

表 4-3-4 27 項目水質検査結果一覧表

項 目	水質基準値	②号井（全層）検査値	水質基準等分類
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	10mg/ℓ以下	3.5	基
亜鉛	1.0mg/ℓ以下	0.05	基
鉛	0.01mg/ℓ以下	0.001 未満	基
マンガン	0.05mg/ℓ以下	0.14	基
シアン	0.01mg/ℓ以下	0.001 未満	基
水銀	0.0005mg/ℓ以下	0.00005 未満	基
六価クロム	0.05mg/ℓ以下	0.005 未満	基
カドミウム	0.001mg/ℓ以下	0.001 未満	基
ヒ素	0.01mg/ℓ以下	0.001 未満	基
フッ素	0.8mg/ℓ以下	0.05 未満	基
フェノール類	0.005mg/ℓ以下	0.005 未満	基
陽イオン界面活性剤	—	0.2 未満	—
ホウ素	なし	0.1 未満	基
トリクロロエチレン	0.03mg/ℓ以下	0.0014	基
テトラクロロエチレン	0.01mg/ℓ以下	0.0066	基
1,1,1-トリクロロエタン	0.3mg/ℓ以下	0.0008	目
セレン	0.01mg/ℓ以下	0.001 未満	基
四塩化炭素	0.002mg/ℓ以下	0.0002 未満	基
1,2-ジクロロエタン	0.004mg/ℓ以下	0.0002 未満	目
1,1-ジクロロエチレン	0.02mg/ℓ以下	0.0002 未満	基
ジクロロメタン	0.02mg/ℓ以下	0.0002 未満	基
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/ℓ以下	0.0057	基
1,1,2-トリクロロエタン	0.006mg/ℓ以下	0.0002 未満	目
1,3-ジクロロプロペン	0.002mg/ℓ以下	0.0002 未満	目
ベンゼン	0.01mg/ℓ以下	0.0002 未満	基
1,4-ジオキサン	なし	0.005 未満	基
非イオン界面活性剤	なし	0.005 未満	基