

3. 調査結果

3.1 揚水試験

(1) ②号井の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

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

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

$$Q = C \cdot S^{\frac{1}{n}}$$

(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つりあっている範囲においては、Q～S 曲線は直線となり、その限界を越えた場合は水位の降下量が急激に増加する。いわゆる Q～S 曲線に変曲点が見られる事が多い。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。

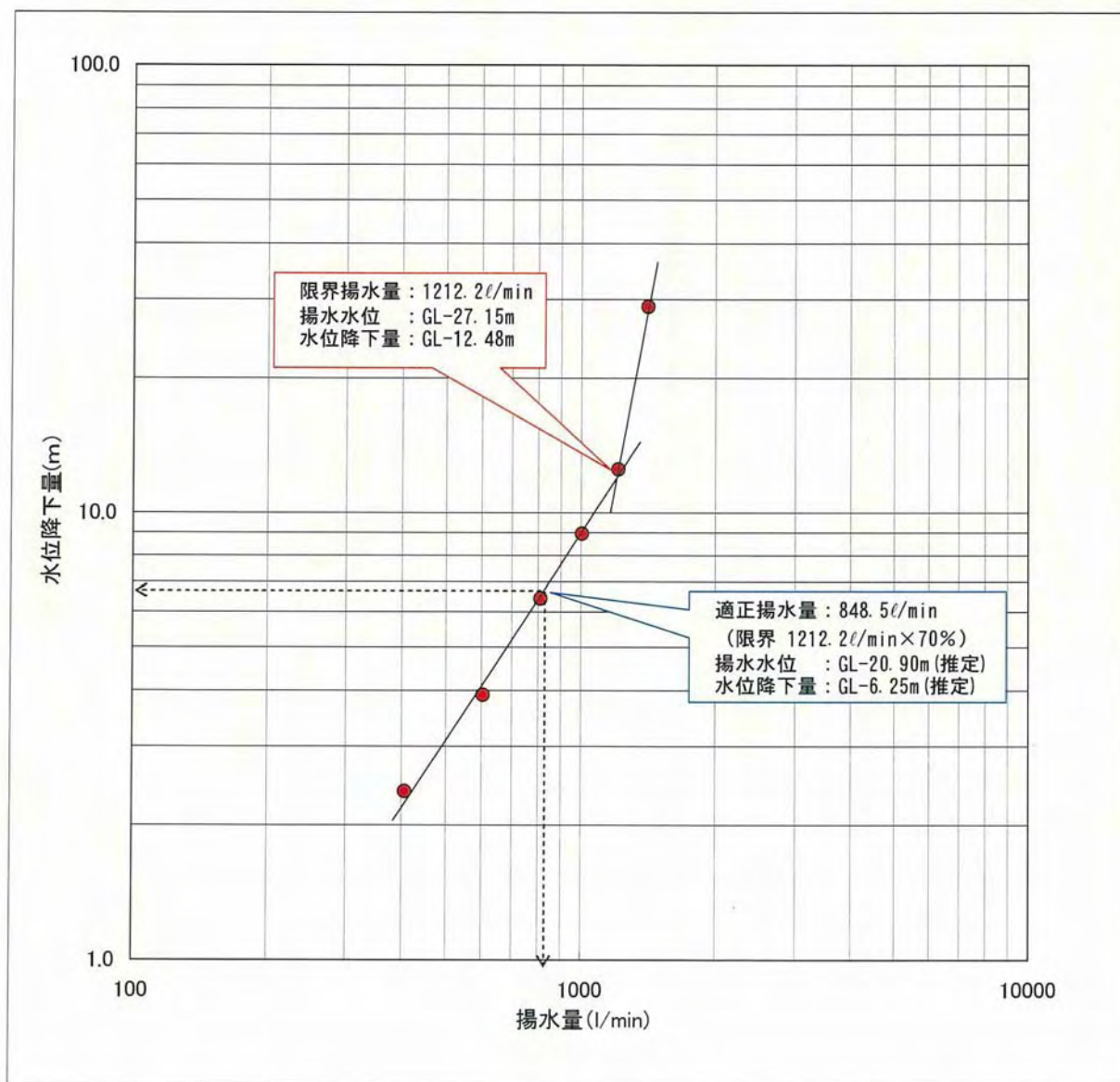
②号井では、当初の井戸性能として 2,500 ℓ/min を超える揚水量が確認されていたことから、井戸口径 φ300 mm に設置できる最大規格の 37kW 仮設ポンプを GL-58.0m の深度に設置して、400 ℓ/min を第 1 段階として、その後 200 ℓ/min を目安に揚水量を増加、1,400 ℓ/min までの 6 段階でそれぞれ 1 時間の揚水を行った。

試験結果は、図 2-3-1 の段階揚水試験グラフに示したとおりである。概ね 1,200 ℓ/min が Q~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②号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、②号井もこれを参考として限界揚水 (1,200 ℓ/min) の 7 割を適正揚水量 (850 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： ②号場 所： 長野市役所第二庁舎駐車場内 試験日： H22.11.3 自然水位： 14.67 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	406.6	17.05	2.38	170.8	
2	605.4	18.58	3.91	154.8	
3	812.9	21.10	6.43	126.4	
4	1006.0	23.62	8.95	112.4	
5	1212.2	27.15	12.48	97.1	限界揚水量
6	1412.2	43.50	28.83	49.0	

図 2-3-1 段階揚水試験グラフ（②号井：全層）

(2) 水理定数の算出について

②号井全体の能力を把握する目的で、段階揚水試験を実施し適正揚水量を求めた。この後、既存資料から想定されていた3つの帯水層について、帯水層ごとに揚水試験を実施し、将来揚水による周辺への影響（地下水位の低下）を予測するための基礎資料とした。

1) 水理定数の算出

ここでは、3層の層別揚水試験の結果から、第1～第3帯水層の水理定数（透水量係数・透水係数・貯留係数）の算出を行った。

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てい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ためには、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。しかし、本試験においては、他の既設井戸を観測井として利用することや、新たな観測井を設置することができなかった。そこで、各帯水層の水理定数は、以下のように試算した。

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。そこで、最上位の第1帯水層については、遅れ重力排水現象のある不圧帯水層の非定常流解析（ノイマン法）およびヤコブ法を、第2・第3帯水層については、ヤコブ法およびタイス法を用いた非定常流解析を行い、貯留係数を試算した。以下では、各帯水層の水理定数算出結果について述べる。

a) 第1帯水層（深度 GL -35m 以浅）

・回復法（ホーナー法）による算出

図 2-3-2 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 $5.27 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と算出された。この井戸のスクリーン長は不明なため、帯水層厚を帯水層下限深度（35m）－最大揚水水位（17.65m）と最大回復水位（14.55m）の平均＝18.90m とすると、透水係数 K は、 $2.79 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ と算出される。

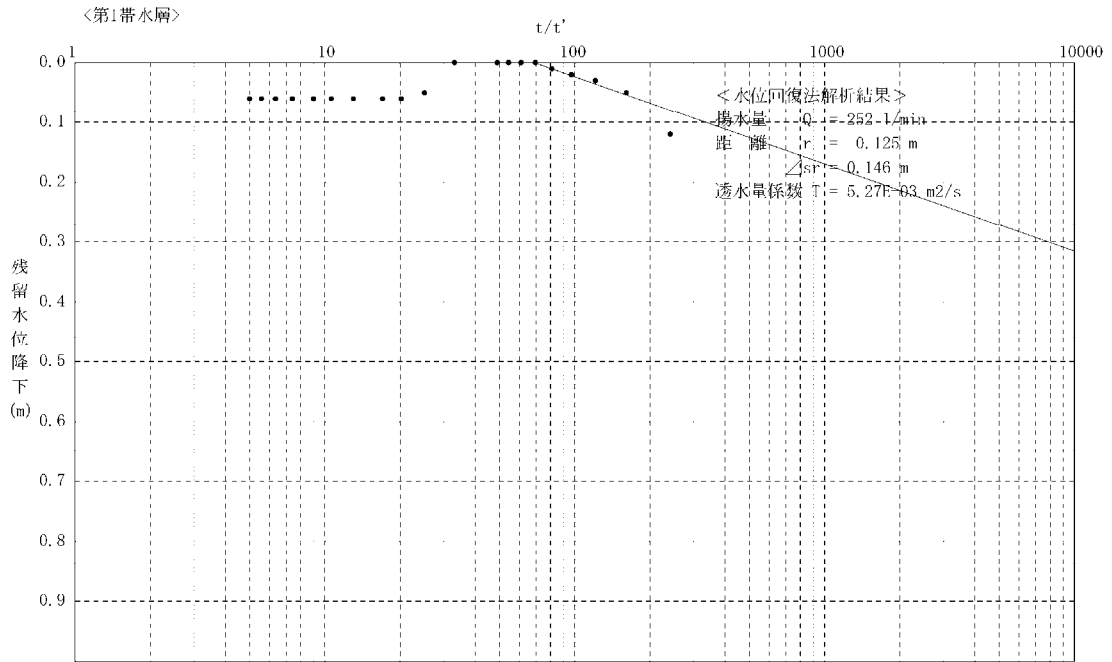


図 2-3-2 回復法（ホーナー法）による水理定数の算出結果（第 1 帯水層）

・ Jacob の直線解析法による算出

図 2-3-3 に、Jacob の直線解析法による水理定数の算出結果を示す。

貯留係数 S は、 6.15×10^{-4} 、透水量係数 T は $1.66 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と算出された。帯水層厚を帯水層下限深度（35m）－最大揚水水位（17.65m）＝17.35m とすると、透水係数 K は、 $9.57 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ と算出される。

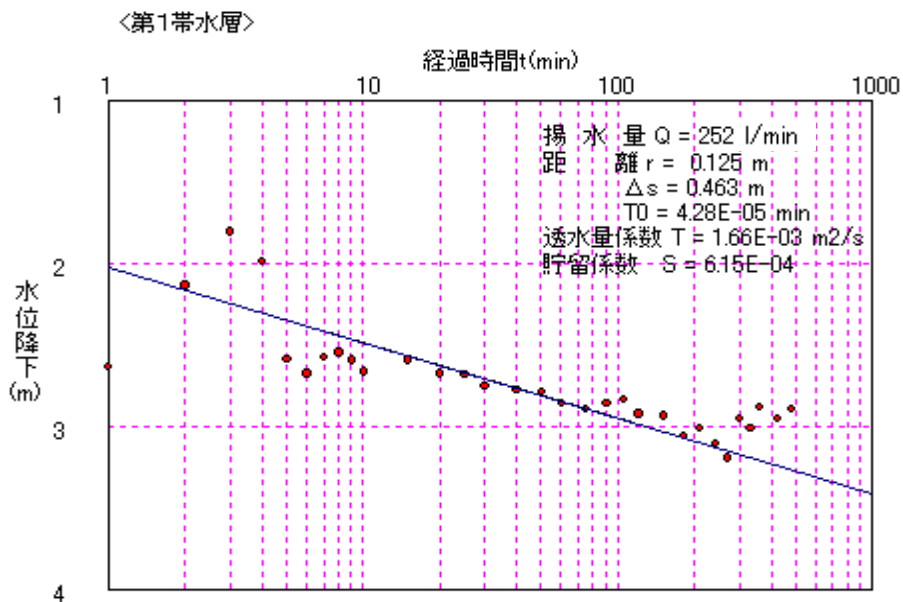


図 2-3-3 Jacob の直線解析法による水理定数の算出結果（第 1 帯水層）

・ノイマンの解析法による算出

図 2-3-4 に、ノイマン解析法による第 1 帯水層揚水試験の解析結果を示す。

揚水量 Q を $252 \text{ l/min} = 0.0042 \text{ m}^3/\text{s}$ とすると、揚水試験の前半部・後半部を $\beta = 0.001$ の標準曲線 A、標準曲線 B に一致させると、図 2-3-4 の s_{pB} 、 t_{pB} 、 W_{pB} 、 $1/u_{pB}$ が各々得られた。

したがって、透水量係数 T 、貯留係数 S 、透水係数 K は…

$$T_A = \frac{Q}{4\pi s_{ps}} W_{ps} = 2.91 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad T_B = \frac{Q}{4\pi s_{ps}} W_{ps} = 4.41 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S_A = \frac{4T_A t_{ps}}{(1/u_A)_{ps} \times r^2} = 5.56 \times 10^{-2} \quad S_B = \frac{4T_B t_{ps}}{(1/u_B)_{ps} \times r^2} = 2.63 \times 10^{-4}$$

$$K_A = \frac{T_A}{b} = 1.68 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \quad K_B = \frac{T_B}{b} = 2.54 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

ゆえに、水平方向の透水係数 K_r 、垂直方向の透水係数 K_z は、

$$K_r = \frac{K_A + K_B}{2} = 2.11 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \quad K_z = \beta K_r (b/r)^2 = 9.92 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

と算出される。

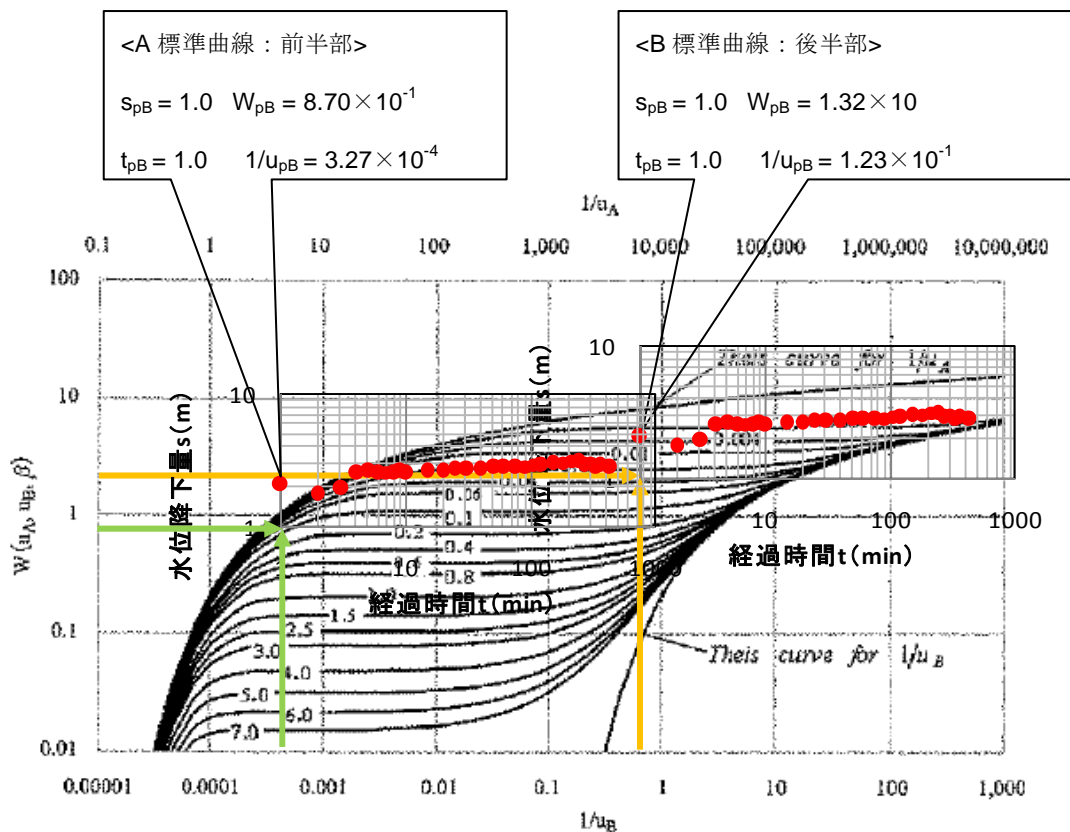


図 2-3-4 Neuman の解析結果図 (第 1 帯水層)

b) 第2帯水層（深度 GL -37~-60m間）

・回復法（ホーナー法）による算出

図 2-3-5 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 $7.37 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と算出された。帯水層厚を 23m とすると、透水係数 K は、 $3.20 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ となる。

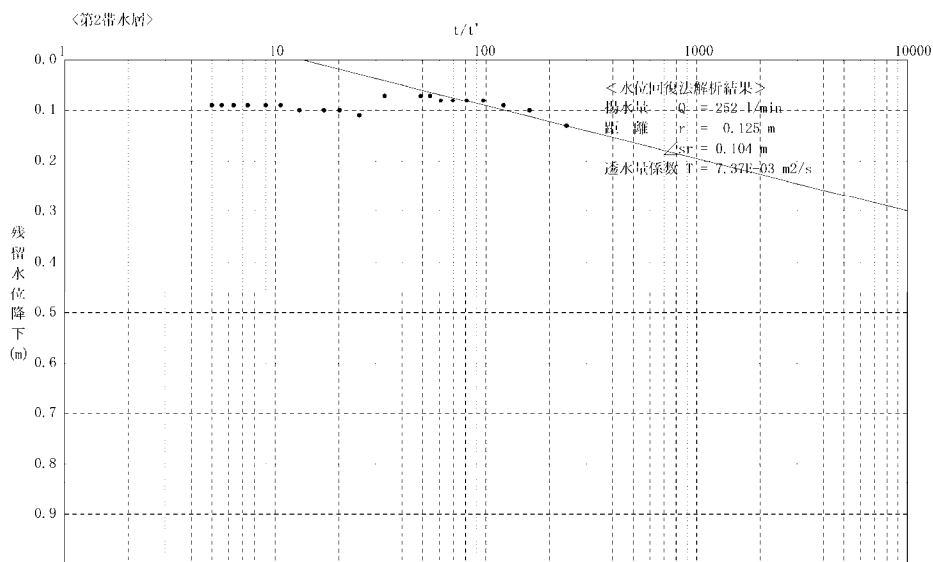


図 2-3-5 回復法（ホーナー法）による水理定数の算出結果（第2帯水層）

・Jacob の直線解析法による算出

図 2-3-6 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経過したときのプロットをもとに解析を行うと、貯留係数 S は 6.19×10^{-10} 、透水量係数 T は $2.10 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と試算され、帯水層厚を 23m とすると、透水係数 K は、 $9.13 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ となる。

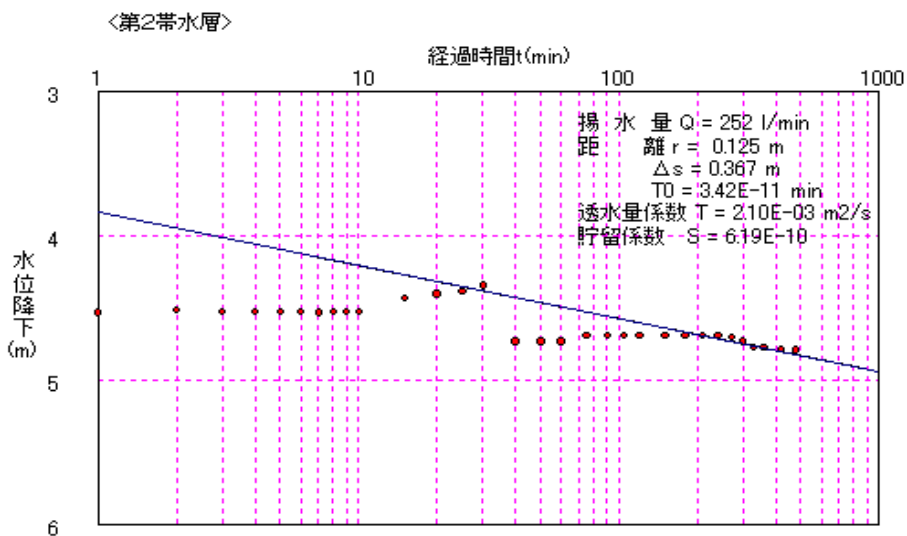


図 2-3-6 Jacob の直線解析法による水理定数の算出結果（第2帯水層）

・ Theis の標準曲線法による算出

図 2-3-7 に、Theis の標準曲線法による水理定数の算出結果を示す。

貯留係数は 1.35×10^{-8} 、透水量係数 T は $1.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と試算され、帯水層厚を 23m とすると、透水係数 K は $7.61 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{s}$ となる。

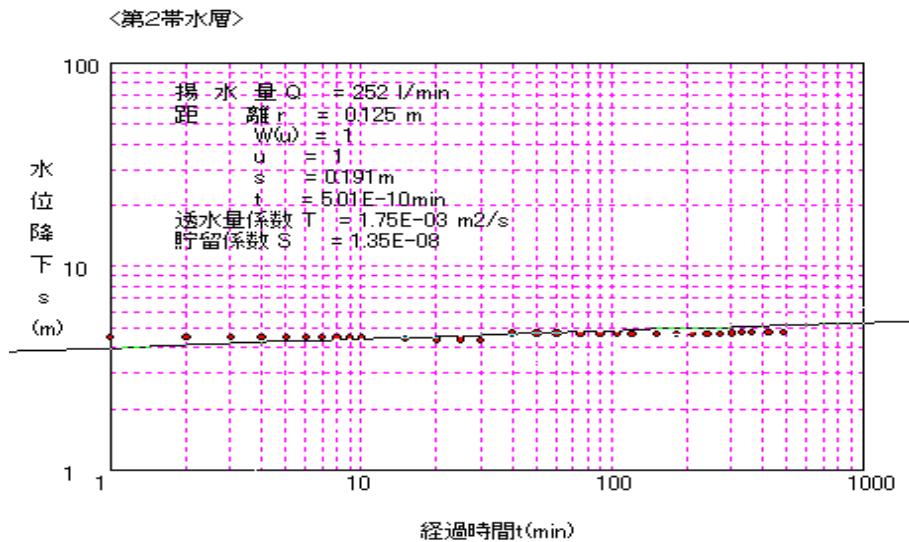


図 2-3-7 Theis の標準曲線法による水理定数の算出結果（第 2 帯水層）

c) 第 3 帯水層（深度 GL -62～-85m 間）

・ 回復法（ホーナー法）による算出

図 2-3-8 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 $9.48 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と算出された。帯水層厚を 23m とすると、透水係数 K は、 $4.12 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{s}$ となる。

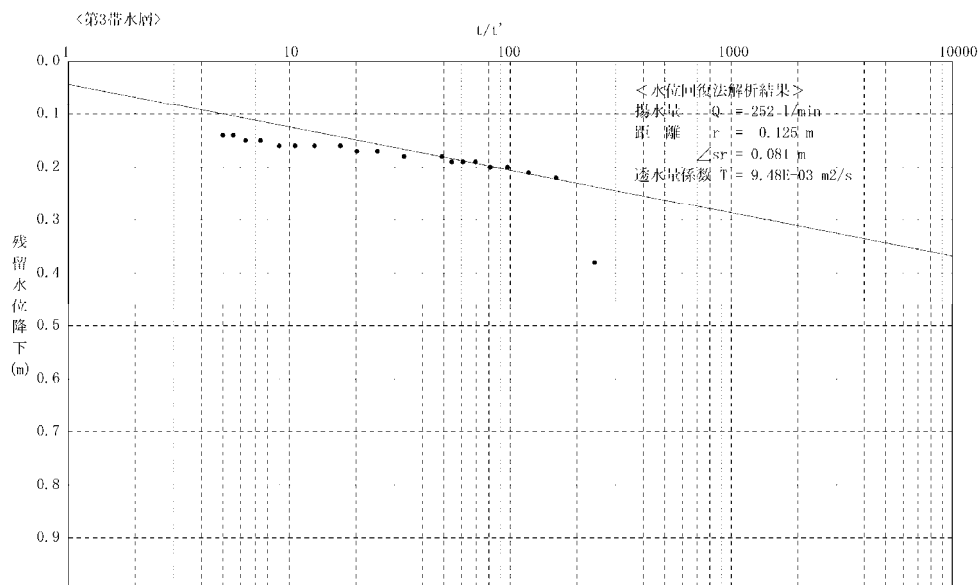


図 2-3-8 回復法（ホーナー法）による水理定数の算出結果（第 3 帯水層）

- Jacob の直線解析法による算出

図 2-3-9 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経過したときのプロットをもとに解析を行うと、貯留係数 S は 1.79×10^{-30} と算出されるが、この値については過小に評価されているものと思われる。透水量係数 T は $5.66 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と試算され、帯水層厚を 23m とすると、透水係数 K は、 $2.46 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{s}$ となる。

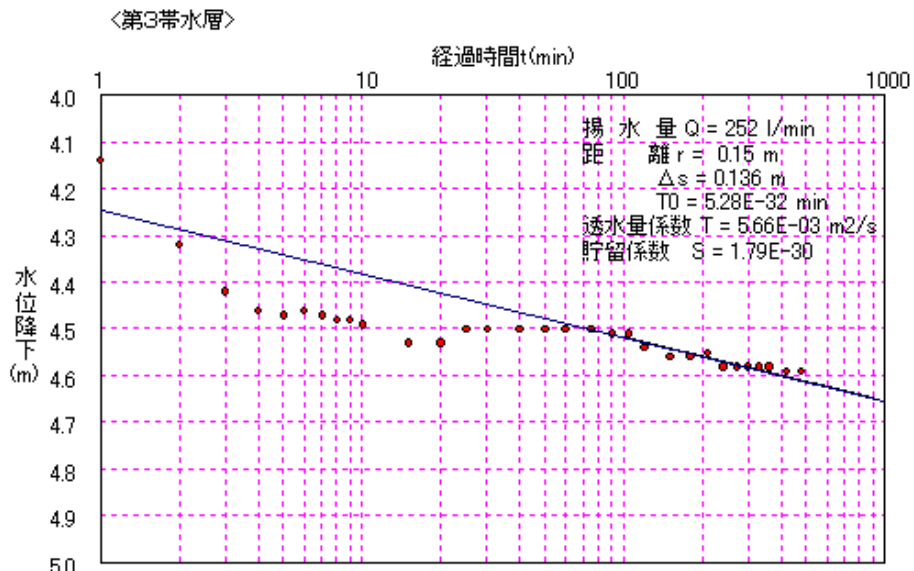


図 2-3-9 Jacob の直線解析法による水理定数の算出結果（第 3 帯水層）

- Theis の標準曲線法による算出

図 2-3-10 に、Theis の標準曲線法による水理定数の算出結果を示す。

貯留係数は 4.39×10^{-10} 、透水量係数 T は $2.06 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と試算され、帯水層厚を 23m とすると、透水係数 K は $8.96 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{s}$ となる。

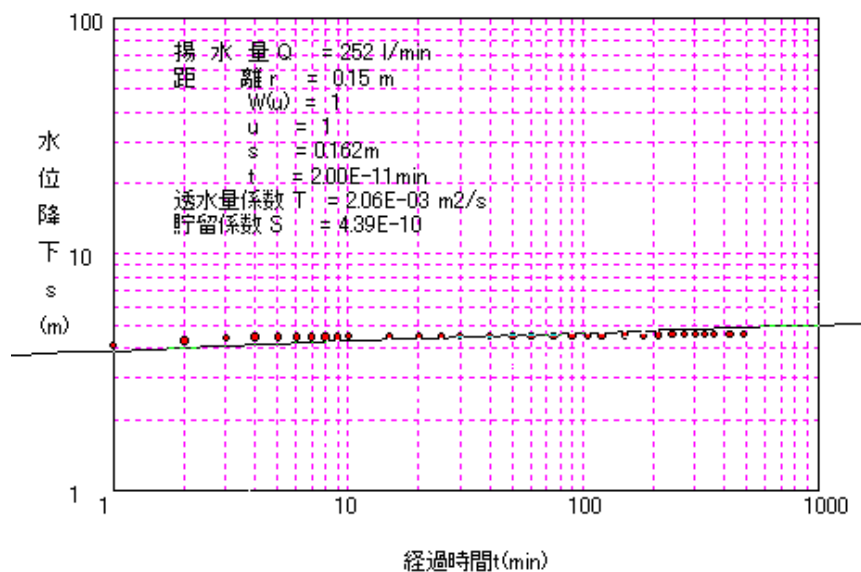


図 2-3-10 Theis の標準曲線法による水理定数の算出結果（第 3 帯水層）

2) 水理定数のまとめ

表 2-3-1 に、透水係数の算出結果をまとめて示す。

表 2-3-1 水理定数の算出結果のまとめ

<第1帯水層>

		透水量係数 (m^2/s)	透水係数 (cm/s)	貯留係数 (単位なし)
解析方法	ヤコブ	1.66×10^{-3}	9.57×10^{-3}	6.15×10^{-4}
	ノイマン	3.66×10^{-4}	2.11×10^{-3}	2.79×10^{-2}
	回復(ホーナー)	5.27×10^{-3}	2.79×10^{-2}	—

<第2帯水層>

		透水量係数 (m^2/s)	透水係数 (cm/s)	貯留係数 (単位なし)
解析方法	ヤコブ	2.10×10^{-3}	9.13×10^{-3}	6.15×10^{-4}
	ノイマン	1.75×10^{-3}	7.61×10^{-3}	1.35×10^{-8}
	回復(ホーナー)	7.37×10^{-3}	3.20×10^{-2}	—

<第3帯水層>

		透水量係数 (m^2/s)	透水係数 (cm/s)	貯留係数 (単位なし)
解析方法	ヤコブ	5.66×10^{-3}	2.46×10^{-2}	1.79×10^{-30}
	ノイマン	2.06×10^{-3}	8.96×10^{-3}	4.39×10^{-10}
	回復(ホーナー)	9.48×10^{-3}	4.12×10^{-2}	—

(注) 色付きの数字が採用値

図 2-3-11 に一般的な透水係数と地質の関係を示す。これによれば、各帯水層の透水係数は、砂または砂礫の中位に位置している。

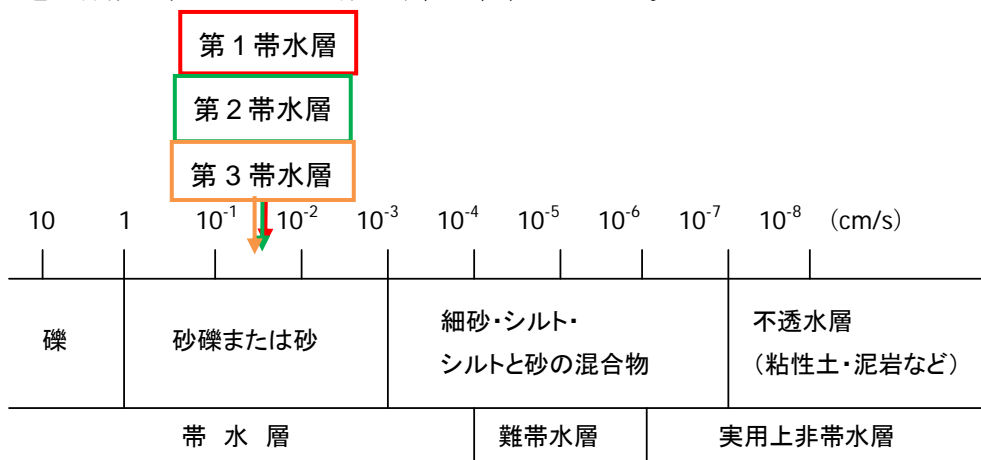


図 2-3-11 透水係数と帯水層、地質状況の関係

(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行った。

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」という目安が示されている。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、ここでは貯留係数が比較的妥当な値で求められている第2帯水層における水理定数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 $850 \text{ l}/\text{min} = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 T に透水量係数 $7.37 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ をそれぞれ代入する。

$$s \ 0.20 = \frac{0.014}{4\pi \times 0.00737} W(u)$$

$$W(u) = \frac{4\pi \times 0.00737}{0.014} \times 0.20 = 1.307$$

$W(u)$ 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、 $W(u) = 1.307$ のとき、 $u \cong 0.181$ となる。

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

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 = 28,800 s をそれぞれ代入する。

したがって、影響圏 R は、

$$R = 2\sqrt{\frac{0.181 \times 28800 \times 7.37 \times 10^{-3}}{6.15 \times 10^{-4}}} = 499 \cong 500\text{m}$$

と試算される。

3.2 水質検査

(1) 15項目水質検査

15項目の水質検査は、全層および各層（第1～3帯水層）で実施した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2-3-2にすべての検査結果と基準値をまとめて示した。

表 2-3-2 15項目水質検査結果一覧表

項 目	冷 却 水 系	全 層	第 1 帯水層	第 2 帯水層	第 3 帯水層	傾 向		
	循 環 式					腐食	スケール	
	循 環 水							
基 準 項 目	pH (25℃)	6.5～8.2	8.0	6.8	6.8	7.0	○	○
	電気伝導率 (mS/m) (25℃)	80 以下	41	45	40	38	○	○
	塩化物イオン (mg/ℓ)	200 以下	40	41	39	40	○	
	硫酸イオン (mg/ℓ)	200 以下	34	33	32	33	○	
	酸消費量 (pH4.8) (mgCaCO ₃ /ℓ)	100 以下	130	130	130	130		○
	全硬度 (mgCaCO ₃ /ℓ)	200 以下	170	180	180	170		○
	カルシウム濃度 (mgCaCO ₃ /ℓ)	150 以下	110	120	120	120		○
参 考 項 目	イオン状シリカ (mgSiO ₂ /ℓ)	50 以下	54	54	55	54		○
	鉄 (mg/ℓ)	1.0 以下	0.04	0.05	0.11	0.24	○	○
	銅 (mg/ℓ)	0.3 以下	0.01 未満	0.01 未満	0.01 未満	0.01 未満	○	
	硫化物イオン (mg/ℓ)	検出されないこと	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満	○	
	アンモニウムイオン (mg/ℓ)	1.0 以下	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満	○	
	残留塩素 (mg/ℓ)	0.3 以下	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	○	
	遊離炭酸 (mg/ℓ)	4.0 以下	25	24	28	25	○	
安定度指数	6.0～7.0	8.5	8.4	8.3	8.9	○	○	

(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。

揚水試験時に既設揚水管を上げた際、錆やスケールの付着が顕著（写真1）であったが、水質検査でもこれを裏付ける結果が出ているものとみられる。したがって、既設井戸から採取される地下水について、循環水として利用する場合には、何らかの対応を講じる必要がある。



写真1 揚水管に付着する錆やスケール（抜管時）

(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 2-3-3 としてまとめた。とくに基準値を超過するような成分・物質は認められなかった。

表 2-3-3 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	2.2	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	0.005 未満	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	0.12	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	0.015	基
テトラクロロエチレン	0.01mg/ℓ以下	0.0009	基
1,1,1-トリクロロエタン	0.3mg/ℓ以下	0.0002 未満	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	0.0003	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

※基：基準項目、目：水質管理目標設定項目