

4.4 簡易揚水試験結果

簡易揚水試験は、空調利用の目的で井戸を設置した場合に 1000 t/日の取水可能か検討するために行った。

井戸開発を行う場合、図 4.4.1 に示す一般的な手順のとおり、周辺の既存井戸や地形地質の他、揚水規制等の有無を調査する机上調査を最初に行う。その後、現地調査により井戸設計のためのデータ収集や周辺環境に対する影響検討を行う。現地調査結果を踏まえて、井戸を設計し、井戸掘削時には電気検層や揚水試験から採水層を決定する。最終的な井戸施工は径・深さによっては非常に高費となり、現地条件を踏まえ段階的に取水可能性・適地判断を事前検討することが多い。

本試験は上記のうち、現地調査（ボーリング調査孔を用いた簡易揚水試験）を行った。

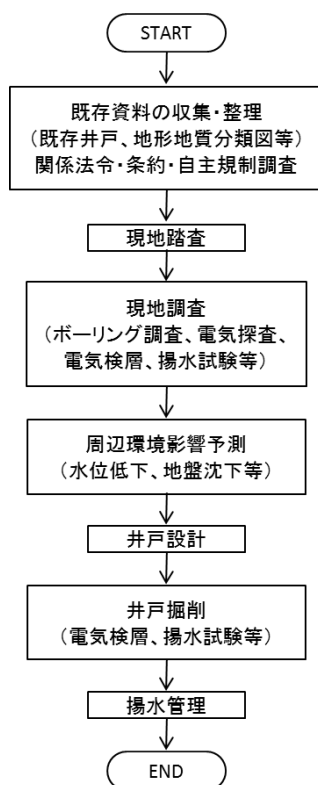


図 4.4.1 井戸開発の一般的な手順

なお、既存井戸の分布と取水状況を公開情報から調査した結果、調査地近傍の氾濫平野に位置する井戸では揚水量が 1000t/日を超えているが、山地に位置する井戸の揚水量は 100t/日未満であった。

表 4.4.1 既存井戸情報

図 4.4.2 の番号	井戸の所在地	地盤標高 (m)	地下水 使用目的	掘削深度 (m)	掘削孔径 (mm)	自然水位 (m)	揚水量 (t/日)	地形分類
①	青木町字荒下	28	工業用	30	300	7.4	1000	氾濫平野
②	大門	20	その他	34.8	500	4.9	2910	氾濫平野
②	大門	15	その他	34.8	500	4.16	1680	氾濫平野
③	蔵次町	41	都市用	150	250	7.27	24	山地
④	池金字下北山	130	その他	234	200	17.41	51	山地
⑤	洞町字西五位原	41	都市用	111	185	6.7	20	段丘

試験位置は、低地（No. 3）と山地（No. 17）でそれぞれ取水可能性を確認するために1箇所ずつ合計2箇所を実施した。No. 3とNo. 17は観測孔仕上げとし、観測孔で簡易揚水試験を実施した。観測孔概要図は図4.4.4に示す。

低地（No. 3）の近傍には青木川があり、沖積層での伏流水を捉えられることを期待していたが、沖積層で透水層が確認されなかった。このため、No. 3位置で実際の井戸を想定した場合に取水可能である花崗岩を試験区間とした。

山地（No. 17）では花崗岩の裂け水を想定し、試験区間を設定した。

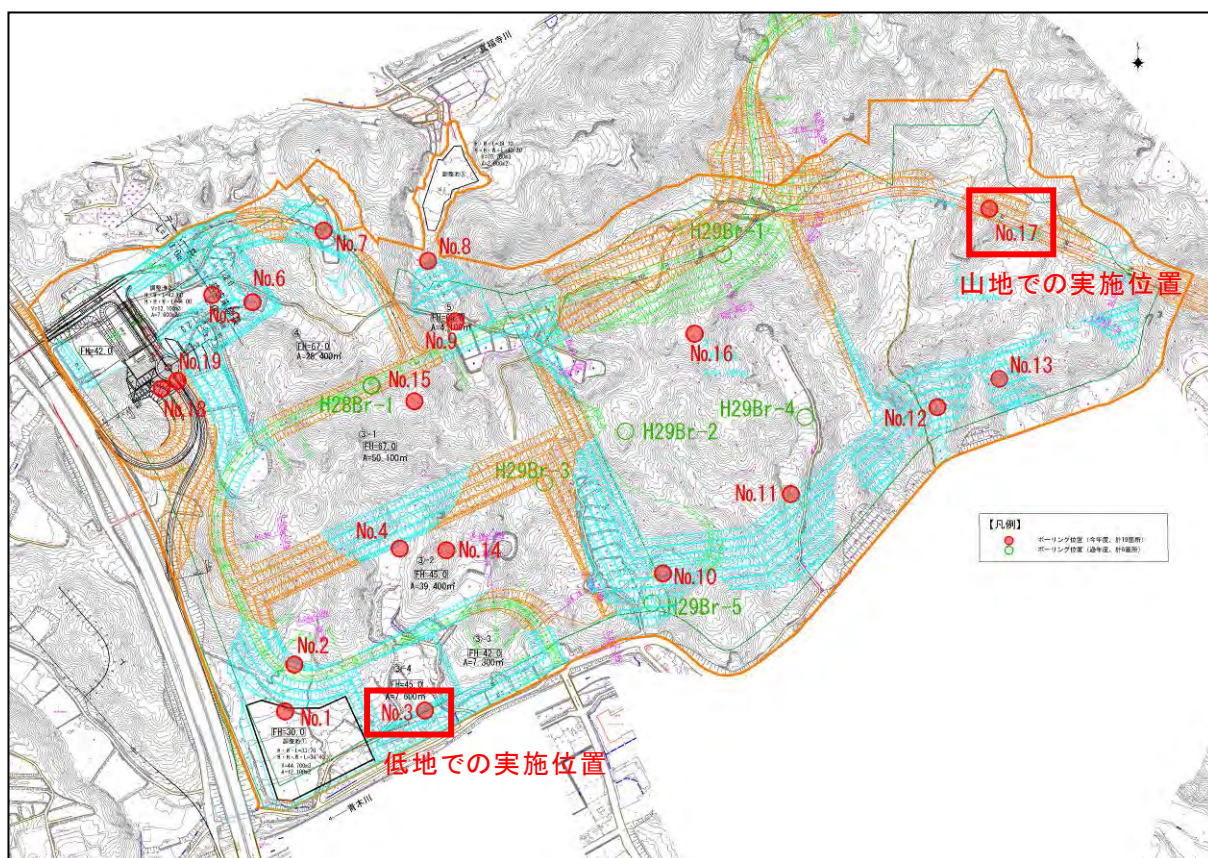


図 4.4.3 簡易揚水試験実施位置

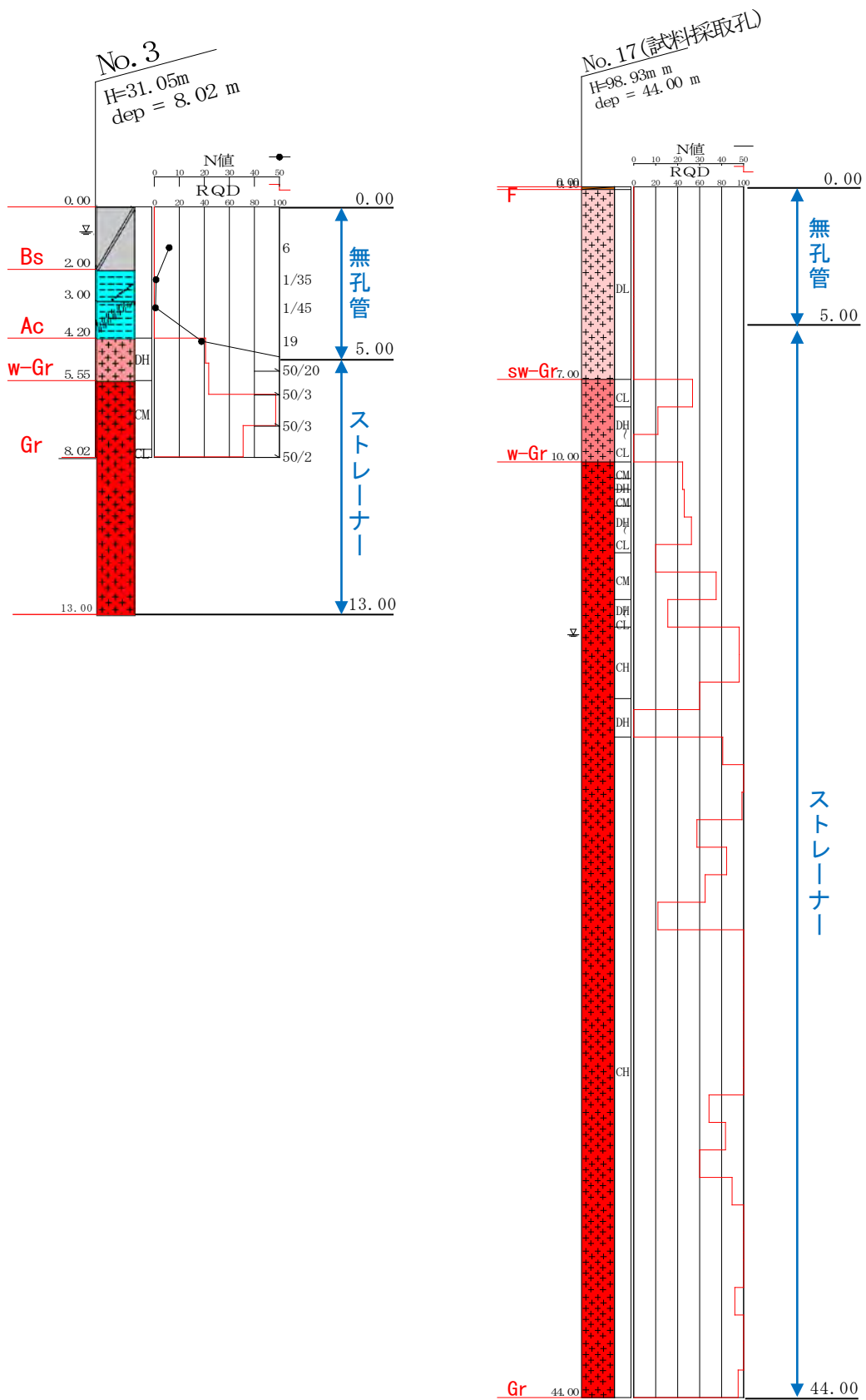


図 4.4.4 観測孔概要図

(1) 揚水試験方法

孔内洗浄後、揚水試験を行った。

揚水試験は予備揚水、段階揚水、及び回復試験を実施し、地盤の透水係数・貯留係数を求めた。この結果から揚水可能性の検討を行った。

①予備揚水試験

予備揚水試験は、段階余水試験の予備資料として水位降下を測定し、大略の揚水能力を把握した。

②段階揚水試験

予備揚水試験において把握した大略の最大揚水量より、4～5段階の揚水量を設定し、段階揚水試験を実施した。

試験方法は、段階ごとに揚水量を増加させ、水位降下を測定し限界揚水量を求めた。

各段階の測定時間は1時間とし、水位測定時間の間隔は5分とした。

③連続揚水試験

段階揚水試験より求めた限界揚水量の70%（適正揚水量）※の範囲内で連続揚水を6時間行った。

※適正揚水量は、水道施設設計指針（日本水道協会）で限界揚水量の70%以下が目安とされている。

水位測定時間の間隔は下記のとおりとした。

開始	～	10分まで	1分間隔
10分	～	20分まで	2分間隔
20分	～	60分まで	5分間隔
60分	～	180分まで	10分間隔
180分	～	240分まで	15分間隔
240分	～	300分まで	20分間隔
300分以降			30分間隔

なお、連続揚水試験の終了間際に採水し、水質試験（冷凍空調機器用水質ガイドライン JRA-GL02:1994 冷却水・冷水・温水・補給水の水質基準値）を実施した。

④水位回復試験

連続揚水試験終了後、直ちに回復試験に移行した。

水位測定間隔は連続揚水試験の時間間隔と同等に行った。なお、測定時間は1時間とした。

(2) 揚水試験解析方法

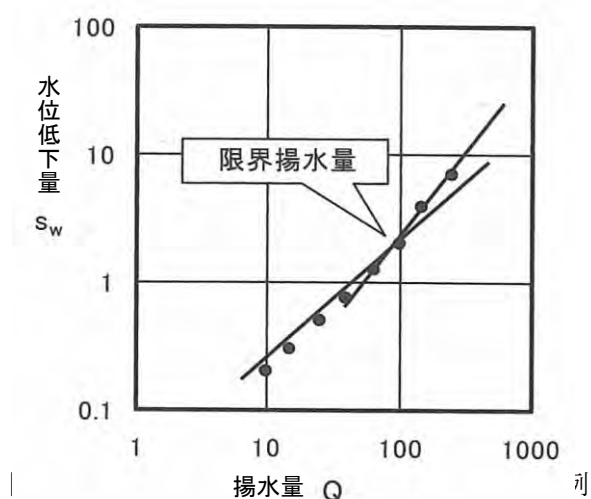
①段階揚水試験

地下水はある一定の流れ（透水性）で帯水層の中を流れているが、井戸を開削し揚水を行うと、井戸における地下水の揚水量に比例して水位は降下する。しかし、湧水量以上の地下水の汲み上げが行われると井戸の中での水位降下は急激に増大する。この急激な水位降下の境界付近の揚水量が「限界揚水量」と呼ばれるものである。

両対数グラフに各揚水量（ Q ）とその水位低下量（ s ）をプロットすると限界揚水量付近でグラフはその勾配が変化し急勾配になる。この点を限界揚水量とする。

なお、一般的には揚水量の70%程度を「適正揚水量※」と呼び、井戸の維持管理に用いている。

※適正揚水量は、水道施設設計指針（日本水道協会）で限界揚水量の70%以下が目安とされている。



②連続揚水試験

この試験は帯水層の水理定数（透水量係数・透水係数等）を求めるもので、一般的に定量連続試験及び回復試験から算出する。これらは定水量法と呼ばれ、一定の揚水量で水位の変動を観測するものである。回復試験も水位の回復（上昇）の回復水量が揚水量に等しいと考えて解析する。

水理定数を求める主な解析方法は、平衡式と非平衡式に大別される。今回は非平衡式を適用する。非平衡式は地下水の水理公式に時間の観念を入れたもので、次式で表される。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{S}{Tt}}$$

ここに s → 揚水井から r の距離にある地点における揚水開始 t 時間後の水位降下量

Q → 揚水量

T → 透水量係数

$W(u)$ → u の井戸関数

$$W(u) = \int_0^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

S → 貯留係数

これらの式からは直接水理定数を求められないため、簡便な解析方法が考案されている。その中で最も実用的な方法は **Theis** の標準曲線解析法と **Jacob** の直線解析法である。次に各解析法の説明をする。

a. Theis の標準曲線法

この解析法は $u - W(u)$ の標準曲線を用いる方法である。対数座標の Y 軸に s を、X 軸に r / \sqrt{t} を計算してプロットして曲線を描く。この曲線と、この曲線に適合する標準曲線を合わせて、任意の点を選定しマッチポイントとする。これを更に簡易化したものに **Stallman** の方法がある。これは $1/u - W(u)$ の標準曲線を用いて、先の X 軸に t を直接プロットして標準曲線とのマッチポイントを任意選択するもので、解析も容易で帯水層境界の有無を判断するにも便利である。

マッチポイントから透水量係数・貯留係数は次式で求められる。

$$T = \frac{0.0796 Q W(u)}{s_1}$$

$$S = \frac{4 T t_1}{r \cdot 1/u}$$

ここに s_1 → マッチポイントの $W(u)$ を選択したときの s

t_1 → マッチポイントの $1/u$ を選択したときの t

b. Jacob の直線解析法

Jacob は非平衡式の修正式を誘導した。

$$S = \frac{2.3 \cdot Q}{T} \cdot \log \frac{2.25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}$$

ここで揚水時間 t_1 の水位降下量を s_1 とし、同様に t_2 に対応する s_1 をとると、

$$s_2 - s_1 = \frac{0.183Q}{T} \cdot \log \frac{t_2}{t_1}$$

$\log t$ の 1 サイクルにおける水位降下量を Δs とすると、

$$T = \frac{0.0183 \cdot Q}{\Delta s}$$

Δs は片対数グラフの対数目盛に t を、算術目盛に s を取って作図すると、簡単に求められる。また、 $s = 0$ の t を t_0 とすると、貯留係数も求められる。

$$S = \frac{2.25 \cdot T \cdot t_0}{r^2}$$

c. Theis の水位回復法

非平衡式より、残留水位降下（自然水位と回復水位の差）と揚水量の関係は次式で表わされる。

$$T = \frac{2.3 \cdot Q}{4 \pi s_r} \cdot \log \frac{t}{t'}$$

ここに $s_r \rightarrow$ 残留水位降下量
 $t' \rightarrow$ 回復時間

この式で $\log(t/t')$ の 1 サイクルにおける残留水位降下量を Δs_r とすると、

$$T = \frac{0.183 \cdot Q}{\Delta s_r}$$

となり、Jacob の直線解析法と同様に T を求められる。

なお、この解析方法からは貯留係数は求められない。

(3) No. 3 段階揚水試験結果

予備揚水試験の結果から、段階揚水試験の揚水量は 0.8L/min、1.3L/min、1.8L/min、2.3L/min、2.8L/min の5段階で実施した。図 4.4.6 に段階揚水時の孔内水位変化を示す。

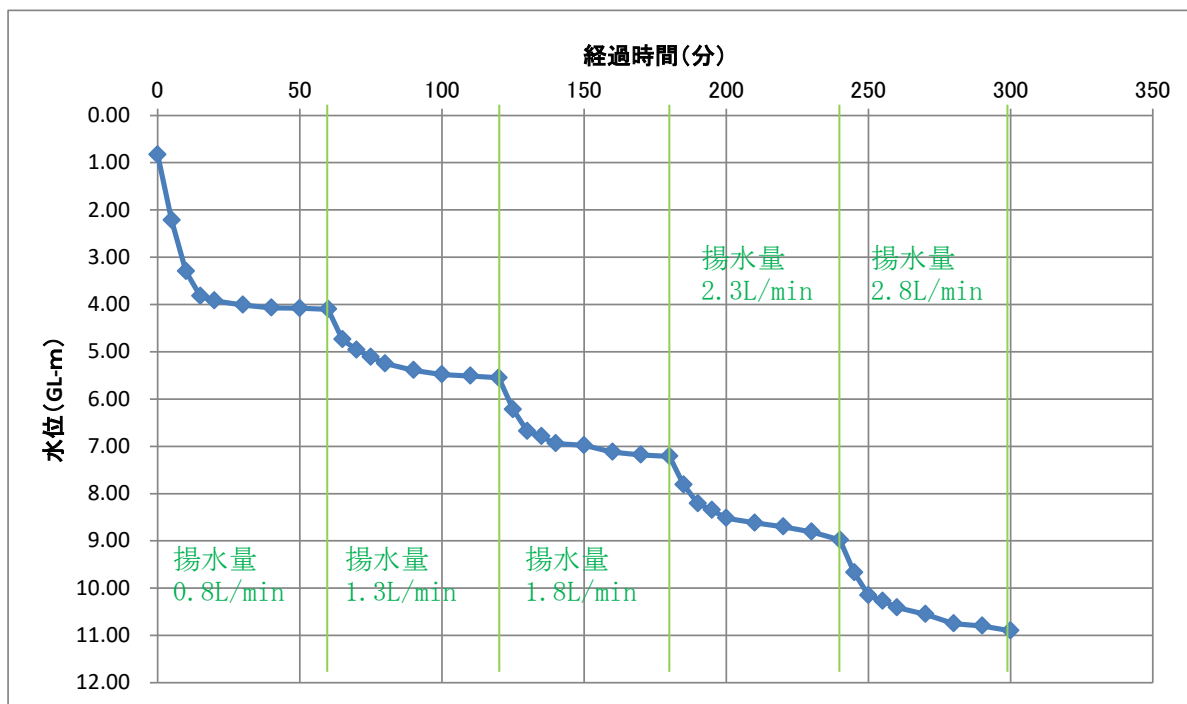


図 4.4.6 段階揚水試験時の水位変化 (No. 3)

初期水位から各揚水段階最終の水位低下量から算出した限界揚水量は 1.6L/min となった。

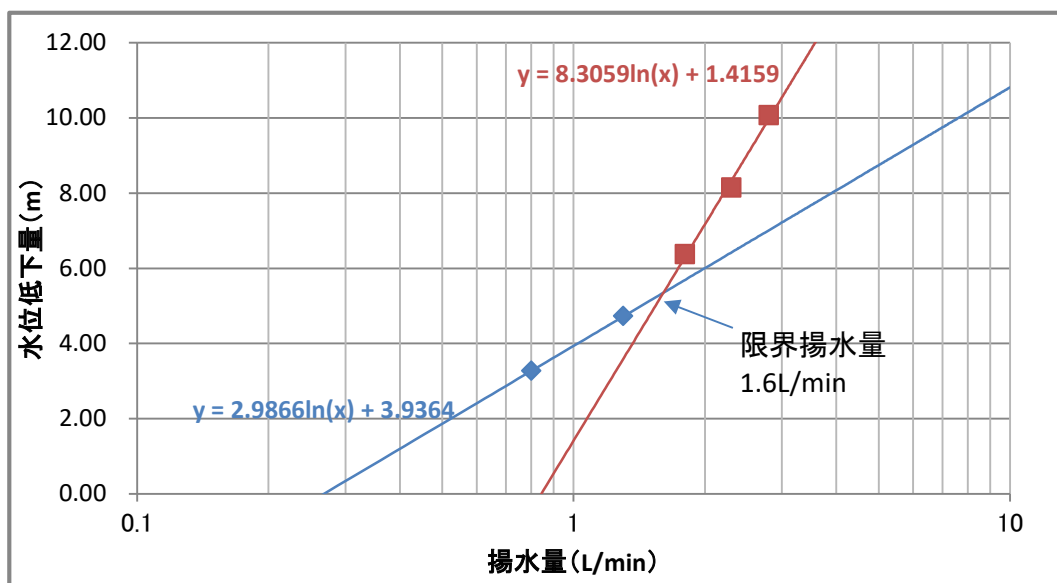


図 4.4.7 限界揚水量の算出結果 (No. 3)

(4) No. 3 連続揚水試験結果

段階揚水試験の結果である限界揚水量 1.6L/min の約 70% である 1.1L/min で 6 時間の連続揚水試験を行った。連続揚水後は井戸内の水位回復状況も記録した。

連続揚水試験及び水位回復時の水位変動図を図 4.4.8 に示す。

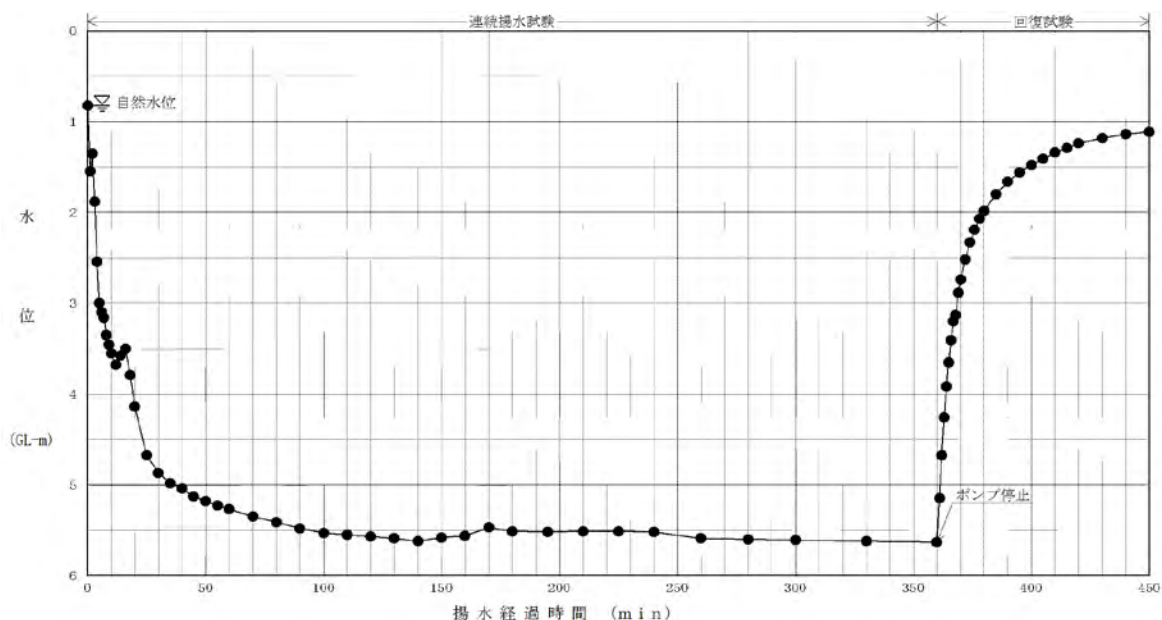


図 4.4.8 連続揚水試験時の水位変化 (No. 3)

連続揚水試験結果から揚水量係数、透水係数、貯留係数をヤコブの直線解析法とタイスの非平衡式による自動解析法で算出した。また、回復試験結果から透水量係数と透水係数を算出した。算出結果の一覧を表 4.4.2 に示す。なお、解析の詳細は巻末資料に示す。

表 4.4.2 連続揚水試験及び回復試験より算出した水理定数 (No. 3)

	透水量係数	透水係数	貯留係数
ヤコブの直線解析法	$1.54 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$3.22 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	2.04×10^{-03}
タイスの非平衡式	$1.40 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$2.92 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	4.10×10^{-03}
回復法	$1.17 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$2.43 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	
平均	$1.37 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$2.86 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	3.07×10^{-03}

連続揚水試験から算出される平均透水係数は、 $2.86 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ であった。

この透水係数から揚水井戸半径を 0.5m と仮定したときの揚水量の試算を行った。試算は、式 4.4.2 に示す井戸公式を用いた。揚水量の試算結果は表 4.4.3 に示すとおり、33t/日である。

$$Q = \frac{2 \times \pi \times K \div 100 \times D \times (H - h)}{\ln(R \div r)} \times 60 \quad \text{式 4.4.2}$$

Q : 排水量 (m³/min)
 K : 透水係数 (cm/sec)
 D : 帯水層厚 (m)
 H : 自然水位高 (m)
 h : 所要低下水位高 (m)
 R : 影響半径 (m)
 r : 仮想井戸半径 (m)

揚水量の試算を行う上で、帯水層厚は 50m、水位低下量は 5m と仮定した。影響半径は Sichardt の式 (式 4.4.3) を用いて算出した。

$$R = 3000\sqrt{K} \quad \text{式 4.4.3}$$

表 4.4.3 揚水量試算結果 (No. 3)

透水係数	K	2.9E-05 cm/sec
帯水層厚	D	50 m
水位低下量	H-h	5 m
影響半径	R	1.6 m
井戸半径	r	0.5 m
揚水量	Q	2.3E-02 m ³ /min
		33.3 t/日

(5) No. 17 段階揚水試験結果

予備揚水試験の結果から、段階揚水試験の揚水量は 1.1L/min、2.3L/min、3.2L/min、4.2L/min の 4 段階で実施した。図 4.4.9 に段階揚水時の孔内水位変化を示す。

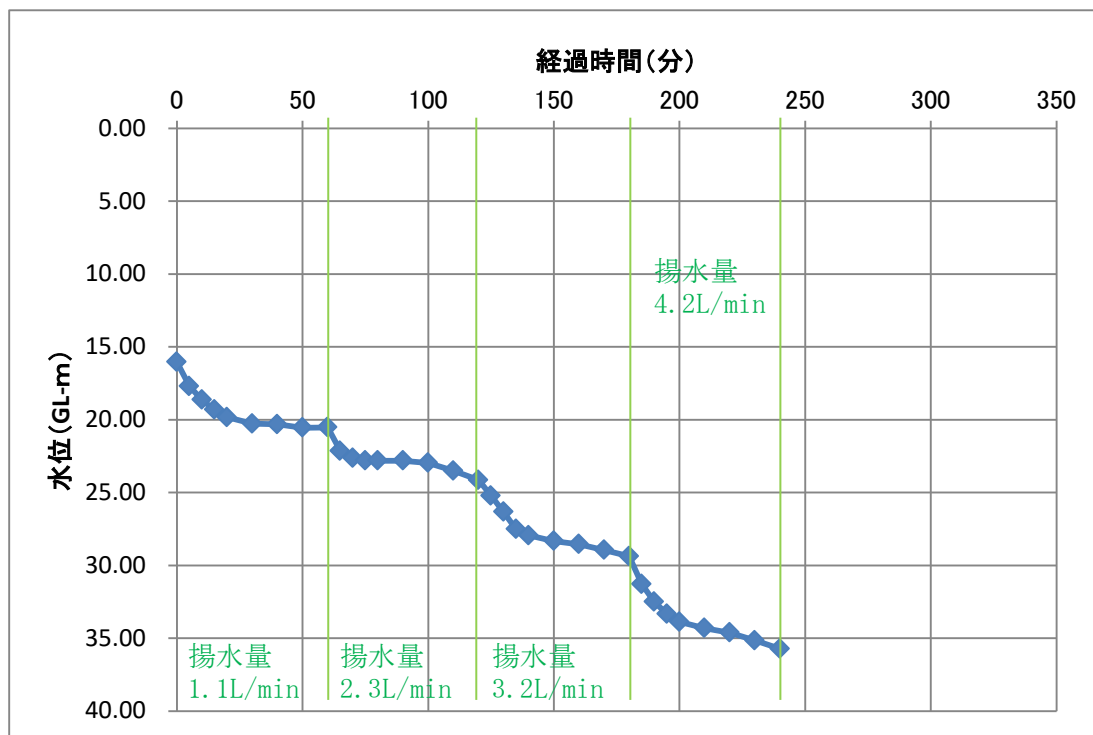


図 4.4.9 段階揚水試験時の水位変化 (No. 17)

初期水位から各揚水段階最終の水位低下量から算出した限界揚水量は 2.5L/min となった。

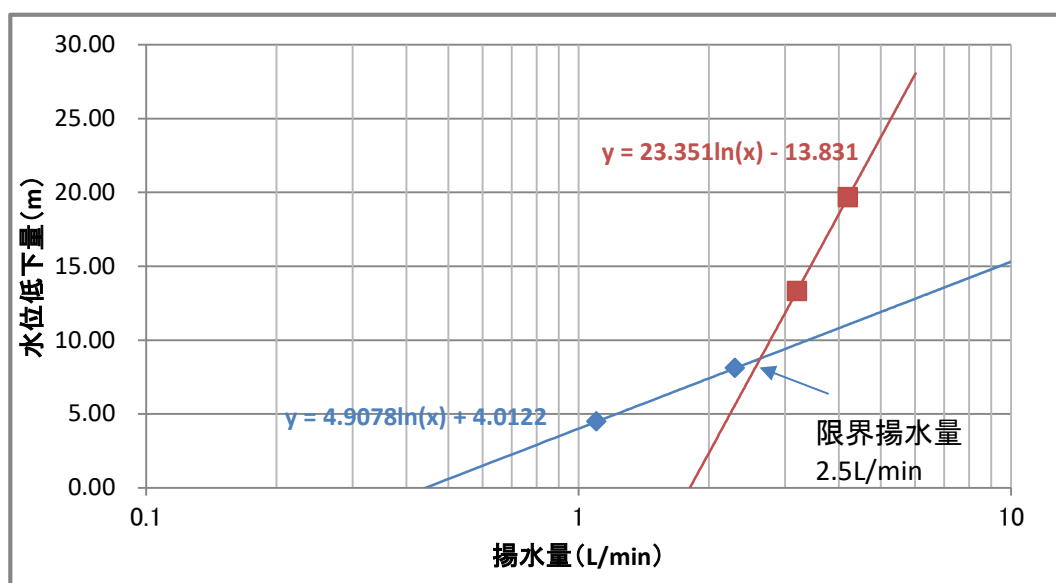


図 4.4.10 限界揚水量の算出結果 (No. 17)

(6) No. 17 連続揚水試験結果

段階揚水試験の結果である限界揚水量 2.5L/min の約 70% である 1.5L/min で 6 時間の連続揚水試験を行った。連続揚水後は井戸内の水位回復状況も記録した。

連続揚水試験及び水位回復時の水位変動図を図 4.4.11 に示す。

No. 17 ではポンプの揚程の関係で揚水量が減少した。また、下方部では、揚水性のよい花崗岩の亀裂を下回る水位まで低下した場合に、水位が急激に低下する現象が認められた。

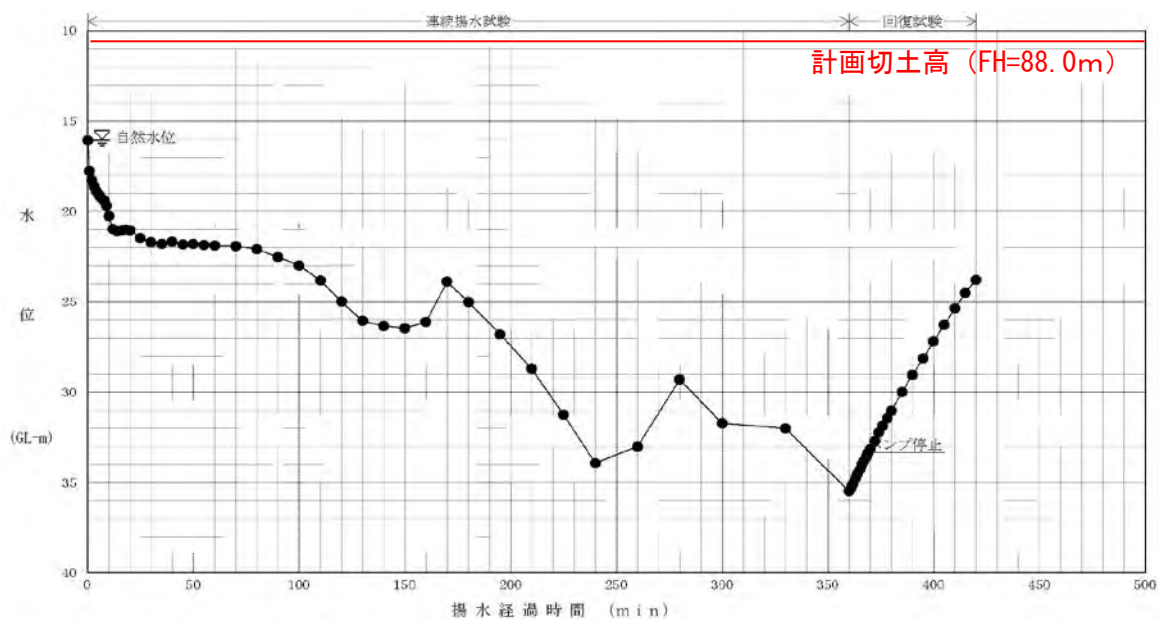


図 4.4.11 連続揚水試験時の水位変化 (No. 17)

連続揚水試験結果から揚水量係数、透水係数、貯留係数をヤコブの直線解析法とタイスの非平衡式による自動解析法で算出した。また、回復試験結果から透水量係数と透水係数を算出した。算出結果の一覧を表 4.4.4 に示す。なお、解析の詳細は巻末資料に示す。

表 4.4.4 連続揚水試験及び回復試験より算出した水理定数 (No. 17)

	透水量係数	透水係数	貯留係数
ヤコブの直線解析法	$9.63 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$4.12 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	4.23×10^{-14}
タイスの非平衡式	$6.10 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$2.60 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	9.83×10^{-09}
回復法	$1.25 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$1.92 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	
平均	$5.63 \times 10^{-04} \text{ m}^2/\text{min}$	$2.88 \times 10^{-05} \text{ cm/s}$	4.92×10^{-09}

連続揚水試験から算出される平均透水係数は、 $2.88 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ であった。

この透水係数から揚水井戸半径を 0.5m と仮定したときの揚水量の試算を行った。試算は、式 4.4.2 に示す井戸公式を用いた。揚水量の試算結果は表 4.4.5 に示すとおり、約 33t/日である。

$$Q = \frac{2 \times \pi \times K \div 100 \times D \times (H - h)}{\ln(R \div r)} \times 60 \quad \text{式 4.4.2}$$

Q : 排水量 (m³/min)
 K : 透水係数 (cm/sec)
 D : 帯水層厚 (m)
 H : 自然水位高 (m)
 h : 所要低下水位高 (m)
 R : 影響半径 (m)
 r : 仮想井戸半径 (m)

揚水量の試算を行う上で、帯水層厚は 50m、水位低下量は 5m と仮定した。影響半径は Sichardt の式 (式 4.4.3) を用いて算出した。

$$R = 3000\sqrt{K} \quad \text{式 4.4.3}$$

表 4.4.5 揚水量試算結果 (No. 17)

透水係数	K	2.9E-05 cm/sec
帯水層厚	D	50 m
水位低下量	H-h	5 m
影響半径	R	1.6 m
井戸半径	r	0.5 m
揚水量	Q	2.3E-02 m ³ /min
		33.4 t/日

(7) 水質分析結果

空調利用に適する水質であるかを確認する目的で、簡易揚水試験時に採水した試料の水質分析を行った。

分析結果を表 4.4.6 に示す。No. 3 (低地) ではイオン状シリカが高めの値を示し、いずれの利用系統でも基準値 (冷凍空調機器用水質ガイドライン JRA-GL02:1994 冷却水・冷水・温水・補給水の水質基準値) 満足しない。No. 17 (山地) では、銅が高めの値を示し、いずれの利用系統でも基準値満足しない。

(8) 取水可能性

上記検討の揚水量試算値は、低地・山地の双方で約 33t/日となった。必要水量 1000t/日には及ばず、1 本の井戸のみで必要水量を賄うことは難しい。また、水質分析の結果も空調利用の基準値をやや超過する傾向が認められる。

ただし、貯留係数が低地の方が大きく、取水可能性は山地よりも低地の方が高い。また、水質分析の基準超過も大幅なものではないことから、低地に井戸を設けて補助水源として利用できる可能性がある。

表4.4.6 水質分析結果

分析項目	分析方法	定量下限値	採取位置		基準値												傾向					
					冷却系				冷水系				温水系									
					循環式		一過式		循環水(20°C以下)		補給水		循環水(20~60°C)		補給水				循環水(60~90°C)		補給水	
					循環型	補給型	一過式	一過式	循環水(20°C以下)	補給水	循環水(20~60°C)	補給水	循環水(60~90°C)	補給水	循環水(60~90°C)	補給水						
水素イオン濃度(pH)	JIS K0101 11.1	0.1	No.3 6.4/19.2°C	No.17 6.5/19.0°C	6.5~8.2	6.0~8.0	6.8~8.0	6.8~8.0	6.8~8.0	7.0~8.0	7.0~8.0	7.0~8.0	7.0~8.0	7.0~8.0	7.0~8.0	○	○					
電気伝導率	JIS K0101 12	0.1 mS/m	10	5.6	80以下	30以下	40以下	40以下	40以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	○	○					
塩化物イオン	JIS K0101 32.5	0.2 mg/l	6.9	7.8	200以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	○	○					
硫酸イオン	JIS K0101 42.4	0.2 mg/l	4.5	0.9	200以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	○	○					
酸消費量(pH4.8)	JIS K0101 13.1	2 CaCO3mg/l	42	19	100以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	○	○					
全硬度	JIS K0101 15.1.3	2 CaCO3mg/l	19	5	200以下	70以下	70以下	70以下	70以下	70以下	70以下	70以下	70以下	70以下	70以下	○	○					
カルシウム硬度	JIS K0101 15.2.3	2 CaCO3mg/l	16	3	150以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	50以下	○	○					
イオン状シリカ	JIS K0101 44.1.1	2 mg/l	33	24	50以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	30以下	○	○					
鉄	JIS K0101 60.4	0.01 mg/l	0.53	1.4	1.0以下	0.3以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	○	○					
銅	JIS K0101 51.4	mg/l	<0.01	<0.01	0.3以下	0.1以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	○	○					
硫化物イオン	JIS K0101 40.1	0.2 mg/l	<0.2	<0.2	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	検出され ないこと	○	○						
アンモニウムイオン	JIS K0101 36.2	mg/l	0.1	<0.1	1.0以下	0.1以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	0.3以下	0.1以下	0.3以下	0.3以下	0.1以下	0.1以下	○	○					
残留塩素・遊離型	上水試験方法 (2011年版) II-3 30.3	mg/l	<0.05	<0.05	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	0.3以下	○	○					
遊離炭酸	上水試験方法 (2011年版) II-3 14.4.1	CO2mg/l	25	11	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	4.0以下	○	○					
安定度指数	ランゲリア指数 により計算		11	13	6.0~7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○					