

揚水源選定の調査手法

平成15年1月

株式会社アスカソイルコーナー

目 次

まえがき

	頁
第 1 章．地下水の概要	(1)
第 2 章．地下水調査方法	(2)
2 - 1．地質構成と地下水賦存状態の関係と調査手法	(2)
2 - 2．揚水源選定の調査フロ -	(5)
2 - 3．地下水調査における物理探査	(6)
2 - 4．地下水調査におけるボ - リング調査	(8)
第 3 章．地下水調査計画	(10)

< 調査手法解説資料 >

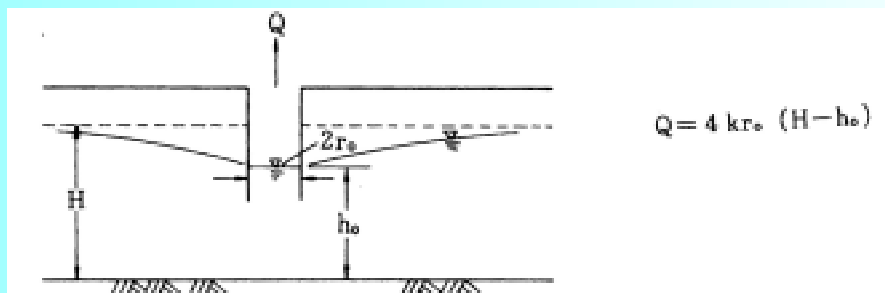
- 1．比抵抗 1 次元探査（垂直電気探査）
- 2．比抵抗 2 次元探査（高密度電気探査）
- 3．電磁波探査（CSAMT法）
- 4．弾性波探査（スタッキング法）

第1章．地下水の概要¹⁾²⁾

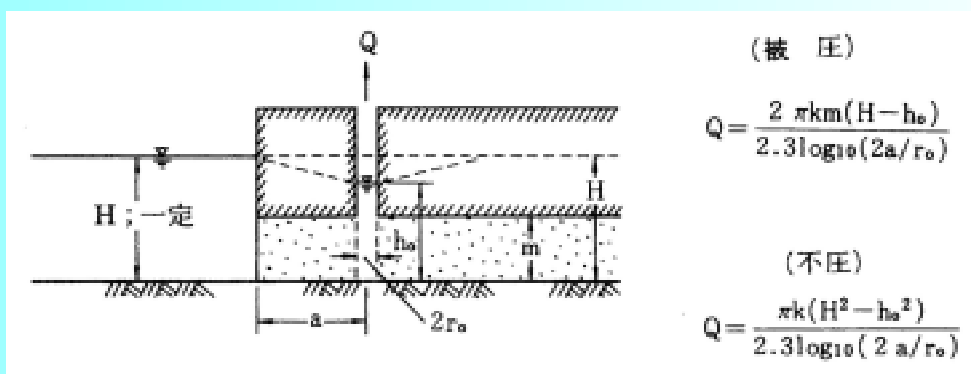
地下水は古くから人類に利用され、カナ - トやファガラと呼ばれる乾燥地域の地下水集水トンネルの起源は紀元前まで遡ると推定されており、我が国では弥生時代から浅井戸の利用が始まりといわれている。深井戸は昭和 30 年頃からの高度成長期に伴い、重化学工業地域での水源確保が目的に数多く施工されてきた。また農業用水、水道用水、冷房などの雑用水の水源として地下水は多く利用されている。しかし、地下水の量は無限でなく、利用度が増加するに従い、相互干渉による地下水位の恒常的傾斜的な低下、地盤沈下など周辺環境へ負の影響を及ぼし、社会的な問題が生じている。また近年、地表水の汚濁・汚染により地下水の水質に悪影響を及ぼすことも大いに懸念されている。さらに、地山の掘削工事（地下構造物・下水道施工）や切土による道路建設、造成開発などにおいても地下水が誘因となる盤ぶくれ、ボイリング、地すべり、斜面崩壊などの問題が絶えない。このため、水源確保のさく井や様々な土工事を行う前には、地盤と地下水の性状とを十分把握しておくことが不可欠と言える。

本書では昭和 55 年頃より約 20 年の間、幾つか興味ある地下水調査業務を経験してきた中で、地下水賦存と地盤との相関や地下水の動向(水圧・透水性)を把握することができた事例を参考にして、地下水調査を行うために必要な基礎知識と各現場で用いた調査手法と結果の分析、評価などについて記述する。

* 浅井戸：井筒井戸（一般に深さ 10 m 以内、井戸径 1 ~ 5 m 前後）で井底より鉛直方向に地下水が汲み出される構造をいう。



* 深井戸：一般に深さ 10 ~ 数百 m、井戸径 300mm 程度で、帯水層の深度でスリットが設けられたケ - シングから地下水が汲み出される構造をいう。



第2章．地下水調査方法

2-1．地質構成と地下水賦存状態の関係と調査手法

地下水の賦存状態は、表-1 に示す地形・地質の条件と相関する。しかし、地質構造(水平・単斜・向斜・背斜)により地下水の有無や被圧の状況が必ずしも厳密ではない。

例えば、平野部の沖積地盤においては、一般に地質構造や活断層等の影響はさほどなく、水平ないし緩やかな傾斜地盤の帯水層を有し、広域な地下水賦存地帯を形成しているが、図-1 に示す洪積地盤や第三紀の丘陵部では、水平構造や背斜構造を形成するところに地下水は殆どなく不飽和状態を示していることが多い。従って、丘陵部で水源を求める場合は、単斜構造や向斜構造(盆地構造)を狙うことが望ましい。

表-1．地質構成と地下水分類

地質時代	地質	地形	地下水分類		
			表層部	深層部	
新生代	第四紀	沖積地盤 (土砂)	平野浅層部	自由水(層状) ¹⁻¹⁾	被圧水(層状) ¹⁻²⁾
			地すべり地	自由水(脈状) ²⁾	-
	洪積地盤 (土砂)	平野深層部	-	被圧水(層状) ³⁾	
		台地・丘陵部	自由水(層状) ⁴⁻¹⁾	被圧水(層状) ⁴⁻²⁾	
第三紀	風化岩・軟岩	丘陵部	自由水(脈状) ⁵⁻¹⁾	被圧水(層状) ⁵⁻²⁾	
中生代・白亜紀	軟岩～硬岩	丘陵・山地部	自由水(脈状) ⁶⁻¹⁾	被圧水(脈状) ⁶⁻²⁾	
古生代	破碎性硬岩	山地部	自由水(脈状) ⁷⁻¹⁾	被圧水(脈状) ⁷⁻²⁾	

注：1-1)及び 4-1)：砂層・礫層の間隙水の流れがあり粘土層は不透水層。調査手法はボーリング孔を用いた透水・揚水試験が主。

1-2)及び 3)：砂層・礫層の間隙水の流れがあり、一般に被圧状態(上位の粘性土層により加圧)。調査手法はボーリング孔による透水試験・間隙水圧測定・揚水試験が主。

2)：地層内の透水層が脈状に分布していることが多い。調査手法は地温・電気探査で地下水脈の分布傾向を把握。ボーリング調査孔により流向・流速計、地下水検層などから地下水流動を測定。

4-2)及び 5-2)：砂層・礫層の間隙水の流れがあり、一般に被圧状態(盆地の中央部優勢)。調査手法はボーリング孔による透水試験・間隙水圧測定・揚水試験が主であるが、深井戸調査の場合は、電気探査(垂直探査・高密度電気探査・電磁波探査)から比抵抗の分布深度を測定し、地下水賦存地帯を推定。

6-2)及び 7-2)：岩盤中の劣力水の流れがあり、一般に被圧状態。劣力水は、断層及び破碎帯の近傍、岩脈、節理など脈状に分布する。調査手法はボーリング孔による透水試験(JFT法)・間隙水圧測定があるが、脈状に当たることが必須。

5-1),6-1)及び 7-1)：降雨の浸透水が主で地下水分布は不連続で水量は少ない。宙水が多いが深部から劣力水の供給もある。

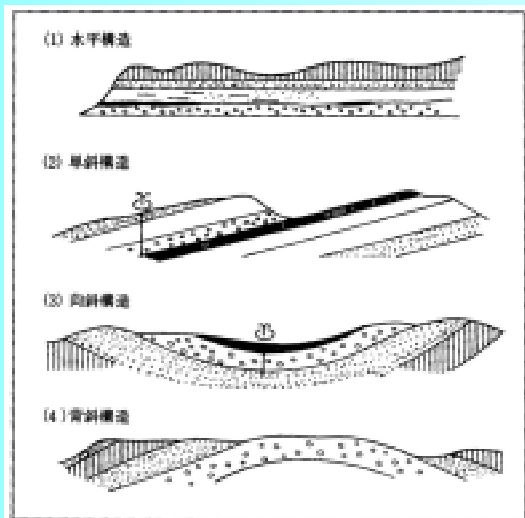


図-1.丘陵における地下水の賦存状況に関する4タイプ ^{3)P.102}

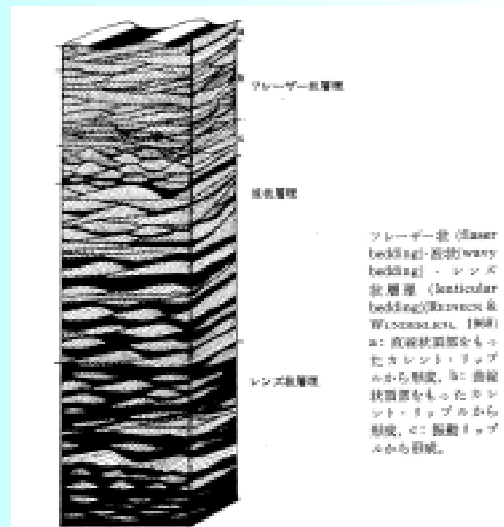


図-2.層状水の土質構造 ^{4)P.22}

注) に示したボーリング孔を利用するときの現場透水試験方法の概略は図表 - 1 に示される。地層の透水係数を求める代表的な解析方法は、図表中の「回復法(非定常法)」と「定水位法(定常法)」であり、前者は透水係数 $k=10^{-3} \sim 10^{-5}$ cm/sec、後者は $10^{-2} \sim 10^0$ cm/sec の地層を目安として行うことが望ましい。

図表 - 1 . ボーリング調査孔を用いた現場透水試験方法

調査手法	現場透水試験(ボーリング孔を利用した透水試験方法:JGS 1314)	
試験目的と原理	<p>単一のボーリング孔を利用して地盤の透水係数を求めることを目的とし、主に砂質地盤を対象とする。試験は、次の2種類があり、透水性や設計対象などによって使い分ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○非定常法: 孔内水位を一時的に低下または上昇させ、その水位変化を経時的に測定して、地盤の透水係数を求める方法。 ○定常法: 揚水または注水して、孔内水位と流量が一定になった時の値を測定して透水係数を求める方法。 <p>また、試験区間の形状によっては、以下のように分類され、それぞれ透水係数の算定式が異なる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○試験孔の孔壁全体: オーガー法 ○測定用パイプの底面: チューブ法、ケーシング法 ○測定用パイプ先端の孔隙: ピエゾメーター法 ○試験孔の孔壁の一定区間: パッカー法 <p>◎試験孔の準備方法(ピエゾメーター法の場合)</p> <ol style="list-style-type: none"> ①ボーリングによる削孔と遮水を行い、測定用パイプを挿入する。 ②測定用パイプの先端から必要な試験区間を削孔し、清水で洗浄する。 <p>◎非定常法による試験方法</p> <ol style="list-style-type: none"> ①ポンプまたはベーターによって、測定用パイプ内の水位を低下させるか、注水して上昇させる。 ②測定用パイプ内の水位 h を基準点から経時的に測定する。水位は cm 以下、時間は秒単位で測定する。 <p>◎定常法による試験方法</p> <ol style="list-style-type: none"> ①測定用パイプから揚水または注水する。 ②測定用パイプ内の水位 h を経時的に測定する。 ③水位 h が一定になった時の揚水量または注水量を測定する。 	
代表的な解析方法	<p>①非定常法 不圧帯水層 $k = \frac{0.66d^2 \text{Log}(2L/D)}{l} \text{ m}$ 被圧帯水層 $k = \frac{0.66d^2 \text{Log}(4L/D)}{l} \text{ m}$ ※ m は $\text{Log} S - t$ 曲線の初期勾配 ②定常法 不圧帯水層 $k = \frac{1.15Q_0}{\pi S_0 l} \text{Log}(2L/D)$ 被圧帯水層 $k = \frac{1.15Q_0}{\pi S_0 l} \text{Log}(2L/D)$</p>	<p>(a) 非定常法 (b) 定常法(揚水による)</p>
適用上の留意点	<ol style="list-style-type: none"> ①非定常法は、透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以下の場合に、定常法は透水係数が $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 上の場合に用いることが望ましい。 ②被圧帯水層の式は、試験区間が不透水層に挟まれている場合に適用する。ただし、上下の不透水層から十分離れている場合は不圧帯水層とする。 ③孔壁と測定パイプ間の空隙の有無、孔壁及び孔底の十分な洗浄および遮水を確認し、泥膜等で透水係数が過小になるのを防ぐ。 ④ボーリングと孔壁崩壊の防止対策: 二重管による孔壁の保護、スクリーン加工した測定管の利用、保護フィルターの利用等を考慮する。 	

2 - 2 . 揚水源選定の調査フロ -

揚水源は用水目的によって必要揚水量が確保できるかどうかまた水質なども問題となる。以下には、揚水源選定の調査フロ - を示すと共に目的に応じた調査手法の選定及び優先順位を示す。

揚水源選定の調査フロ -

揚水源確保の目的-----農業用水 / 工業用水 / 消雪用水 / 飲料水など

ポイント1) 必要揚水量 ポイント2) 水質 (環境基準) の設定



井戸形式の選定-----浅井戸 / 深井戸 / ポンドなど

ポイント1) 地形地質条件により予め帯水層となる地層を想定

ポイント2) 既設井戸の情報収集 (国土庁井戸台帳・近隣台帳など)



揚水量及び井戸形式を絞り込んだ上での調査手法の確定

ポイント1) 近隣井戸の相互干渉や地盤沈下など悪影響の無いところを選定

ポイント2) 井戸計画位置の用地確保及び管水路など施設配置を考慮

ポイント3) 調査費用 (井戸形式により調査手法の優先順位を付ける)

例1) 浅井戸は地表に近いところの「自由地下水」を得る目的で計画され、多くは基盤岩が浅く地下水供給が恒久的な平野部に分布している。

しかし、帯水層の透水係数が約 10^{-1} cm/sec 以上ないと揚水量 500 ~ 1000ton/day の確保が難しい。また水質は近年良好でなくなって来ている。

【調査手法優先順位】

1. ボ - リング調査及び現場透水試験 (候補地確定)
2. 比抵抗 2 次元探査 (高密度電気探査) (候補地未定)

例2) 深井戸計画は平野部深部、山間台地深部、岩盤裂か部に大別され、いずれも「被圧地下水」を得ることを目的とする。一般に水質は良好と考えられるが鉄分他が混入している。帯水層が約 40 m、透水係数が約 10^{-2} cm/sec 以上ないと揚水量 500 ~ 1000ton/day の確保が難しい。

【調査手法優先順位】

1. 比抵抗 1 次元探査 (垂直電気探査: 深度約 300 m 以内で候補地確定の場合)
比抵抗 1 次元探査 (電磁波探査: 深度約 1000 m 可能で候補地未定の場合)
2. 比抵抗 2 次元探査 (高密度電気探査: 深度約 100 m 以内で候補地未定)
3. ボ - リング調査及び現場透水試験 (深度 50m までで候補地確定)
但し、深度が 100m 以上になると費用大となる

2 - 3 . 地下水調査における物理探査 ^{1)P.269}

物理探査は、非破壊的に広範囲な地盤の状況を面的に調査できるため、他の調査方法（例えばボ - リング調査）と比較した場合に、作業の迅速性、経済性の面で大きな利点を有している。地下水調査における物理探査の役割は、主に次の3点に要約される。

- 地盤構造や亀裂系の把握
- 地盤及び地下水特性の把握
- 帯水層のモニタリング

物理探査は、測定形態によって、地表探査、孔間探査、孔内検層等に大別される他、用いる物理現象によっても種々の方法に分類される。地下水調査に一般に用いられるものを表-2に示す。

表 - 2 . 地下水調査に利用される物理探査法 ^{1) P . 2 6 9}

探査の区分・名称		利用する物理現象	測定する物理量	主な適用対象	
地表探査	電気探査	一次元比抵抗探査	定常電導現象	比抵抗の深度分布	地質の判別と地質構造
		二次元比抵抗探査			
		自然電位法	自然分極現象	分極強度と位置	
	電磁気探査	EM法（ループループ法）	電磁誘導現象	比抵抗異常箇所	地層境界や岩盤内亀裂の推定
		MT法	電磁誘導現象	比抵抗の二次元分布	地質の判別と地質構造
弾性波探査	層析法探査	波動現象（屈折波）	弾性波速度層分布	詳細地質構造	
	反射法探査	波動現象（反射波）	弾性波反射面分布		
孔間探査	弾性波トモグラフィ	波動現象	弾性波速度や減衰率の二次元分布	詳細地質構造および管轄内亀裂分布の推定	
	比抵抗トモグラフィ	定常電導現象	比抵抗の二次元分布		
	電磁気（EM）トモグラフィ	電磁誘導現象			
孔内検層	電気検層	比抵抗検層	定常電導現象	比抵抗	地質・水質の判別とストレーナー位置の決定
		自然電位検層	自然分極現象	自然分極	
	速度検層	ダウンホール法	波動現象（直進波、屈折波）	弾性波速度と減衰率	地質の推定と破砕部の検出
		サスペンション法			
		ソニック法	音波伝播現象	音波速度	
	放射能検層	自然放射能検層	自然放射線	自然放射能	地質や断層帯の判別
		γ線検層	γ線散乱吸収現象	体積密度	帯水層の評価（間隔中等）
		中性子検層	中性子減速乱現象	含水率	
	流速検層	スピナー型	スピナーの回転	孔内流体速度	湧水・逸水層の検知、透水性評価とストレーナー位置決定
		ヒートパルス型	熱パルスの移動		

本書では、表-2 の内、電気探査（1次元・2次元）、電磁気探査、弾性波探査について巻末に詳細資料を添付した。

電気探査（1次元・2次元）、電磁気探査より得られる測定物理定数は共に比抵抗値（ $\Omega\cdot m$ ）であり、これらの適用性は下記のようにまとめられる。一方、弾性波探査は測定物理定数が速度値 $V_p(m/sec)$ で示され、電気探査の比抵抗値との直接的な相関はない。

各電気探査共通；一般に深井戸計画に適用される。

但し、比抵抗2次元探査（高密度電気探査）は浅井戸計画にも適用される。

各探査法の特徴

表 - 3 . 各種電気探査の比較一覧

探 査 名 称	比抵抗 1 次元探査 (垂直電気探査)	比抵抗 2 次元探査 (高密度電気探査)	電磁波探査 (C S A M T 法)
探査方式	直流比抵抗法	直流比抵抗法	地磁気地電流法
模 式 図			
適 用 深 度	数十～数百m (数千mの実例あり)	主に100m以下の深度の精密探査	数百m～2km規模での実施例が多い
探 査 深 度	最大電極間隔の1/2～1/3	測線全長の1/5～1/6	測定周波数(通常21種)
地 形 条 件	平坦ないし微傾斜が好ましい。	制約なし。丘陵～山地に多い	制約なし
200m 探査時の測線全長	400m～600m (ほぼ直線状)	水平距離で約1km以上(ほぼ直線状)	電場測定の電極間隔約20m
現地状況の適用性	耕作地などの休耕以外は測線展開が困難。線路・交通過多道路などの横断は困難。 地下水調査が主体。	測線の伐採を要するため耕作地での展開不可。 地下水調査、トンネル計画に適用多い	道路脇などの小規模の空地で測定可能 地下水調査、断層調査に適用多い

2 - 4 . 地下水調査におけるボ - リング調査

ボ - リング調査による帯水層の有無や性状については地下構造物、杭基礎工事等の事前調査でよく行われているが、深井戸調査の適用例は少ない。何故なら、物理探査と比較した場合に、作業の迅速性、経済性の面で不利な点を有しているからである。

強いてボ - リング調査で帯水層厚の地下水の性状を把握したい場合は、調査深度がせいぜい100m以内に限られる。

一方、浅井戸調査においては、ボ - リング調査で予め帯水層厚及びその透水性、基盤岩深度などを明らかにしておくことが望ましく、経費面でも物理探査よりも安価となる。

以下には浅井戸計画のボ - リング調査方法を示す。

浅井戸を新設する場合は、着岩深度・帯水層厚・帯水層の透水性・自然水位をまず把握しておく必要があり、帯水層厚不足や透水性の不良、さらに自然水位が低ければ井戸計画は無駄となることが多い。

浅井戸では、一般にボ - リング調査より地質構成を明らかにした上で現場透水試験結果を用いて定常揚水量の試算が下図及び以下の水理公式を用いて行うことができる。

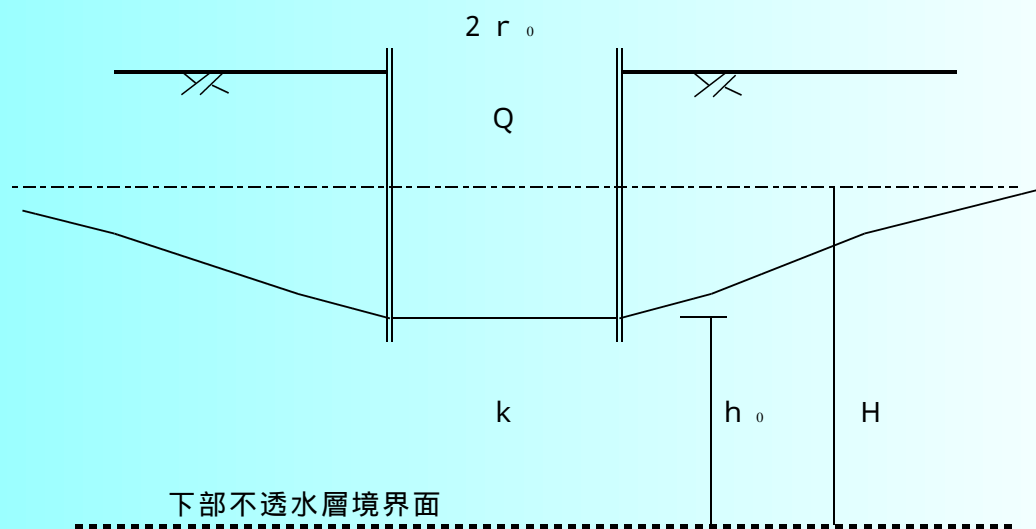


図 - 5 . 浅井戸基本計画図 ^{1)P.69}

ここに、 $Q = 4 k r_0 (H - h_0)$

Q : 揚水量 (m^3/min)

k : 透水係数 (m/min)

r_0 : 井戸半径 (m)

H : 下部不透水層境界面よりの初期水頭 (m)

h_0 : 下部不透水層境界面よりの低下水頭 (m)

である。

浅井戸基本計画試算図表

現場名称： 地区

計算条件

- ・下部不透水境界面深度 GL - 10m
- ・初期水位 GL - 3.5m
- ・透水係数 $K = 1 \times 10^{-2}$ (cm/sec)
- ($K = 6 \times 10^{-3}$ (m/min))

理論及び計算式

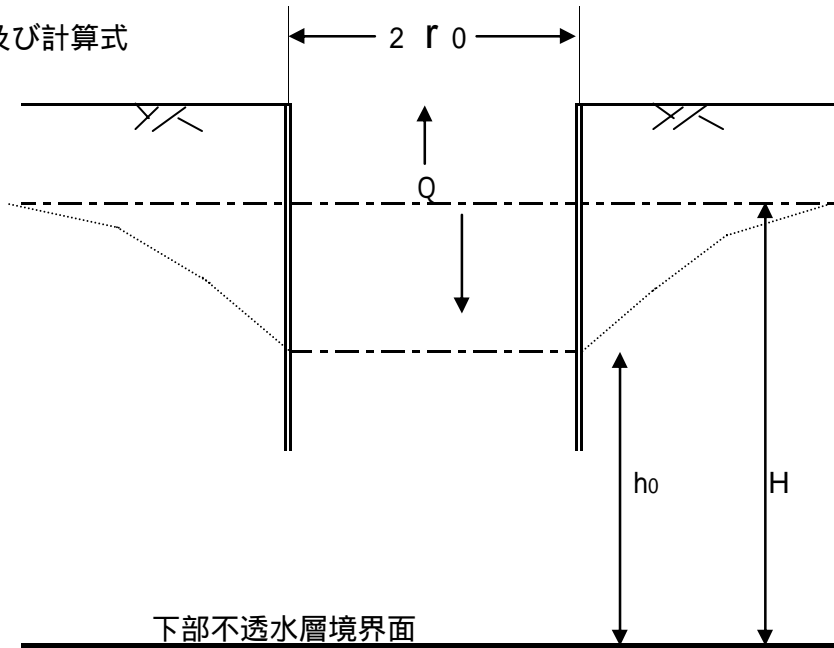


図. 浅井戸基本計画図

ここに、 $Q = 4kro(H - h_0)$ <地下水ハンドブックP.96より>
 Q : 揚水量 (m^3/min) H : 下部不透水層境界面よりの初期水頭(m)
 k : 透水係数(m/min) h_0 : 下部不透水層境界面よりの低下水量(m)
 r_0 : 井戸半径(m)

表. 揚水量試算結果一覧

井戸の直径 $2r_0$ (m)		1.00	2.00	3.00	4.00
S=2.0m	(m^3/min)	0.024	0.048	0.072	0.096
	(m^3/day)	34.56	69.12	103.68	138.24
S=3.0m	(m^3/min)	0.036	0.072	0.108	0.144
	(m^3/day)	51.84	103.68	155.52	207.36
S=4.0m	(m^3/min)	0.048	0.096	0.144	0.192
	(m^3/day)	69.12	138.24	207.36	276.48
井底流入量 Q' (m^3/min)		0.79	3.14	7.07	12.56

注) 揚水量試算値 Q は Q' より少ないことが条件付けられる。

第3章．地下水調査計画

地下水調査計画は、地下水利用の目的や施設の規模により、調査手法は単独ないし幾つかの手法を組み合わせる必要がある。

ここでは、滋賀県I地区の広域消雪工に資する揚水源選定調査計画の事例に基づいて調査計画の手順を示す。また表 - 4 には調査計画を総括した内容を一覧で示す。

目的及び必要揚水量

- ・各地区の消雪用水に地下水を用いることで、揚水量と水温が問題となる。
- ・各地区の水源別総散水量（約300～2400トン/日）で必ずしも1井戸で必要揚水量が得られるとは限らず、新旧井戸の相互干渉がないところを複数選定する必要がある。このため、先に述べた電気探査・電磁波探査を優先して調査しなければならないことが多い。

井戸形式の選定

- ・地形地質情報の収集；1/5万の表層地質図及び代表地質断面図

1/2.5万の国土地理院地形図

活断層図

井戸台帳及び聞き込み調査、簡易揚水試験 etc

これらの情報収集から、地区別に帯水層の可能性を調べると共に、その帯水層の性能（層厚・透水性）を想定して、浅井戸または深井戸のどちらが望ましいかを評定する。

調査手法の選定

- ・浅井戸の場合に場所が特定されれば、ボ - リング調査により帯水層の確認と透水性を把握できればよいが、ある範囲で選定するならば精密調査として比抵抗2次元探査（高密度電気探査）を行うことが望ましい。本探査の電極間隔は通常2～5mピッチで行われる。

- ・深井戸の場合は、地形の起伏や耕作地などの状況で電極設置の測線展開が可能かどうかをまず検討しなければならない。また必要揚水量を得るための帯水層厚が十分あるかどうかを把握するには、探査深度をどの程にしなければならないかが問題となる。高密度電気探査では測定限界深度が地形条件から通常100m以内であり、これ以深を探査するには電磁波探査、垂直電気探査などの手法によらねばない。

表 - 4 に示す事例では既設井戸や基盤岩深度から井戸長を100m以内と考えられているため、高密度電気探査を優先して計画してある。

【引用文献】

- 1)改訂地下水ハンドブック：建設産業調査会,平成10年8月1日発行
- 2)近畿圏地下水（深井戸）資料台帳：国土庁土地局国土調査課,1975
- 3)丘陵地の地盤環境：日本応用地質関西支部 + 関西地質調査業協会 = 共編
鹿島出版会,1998.3.5 発行
- 4)堆積物の研究法 - 礫岩・砂岩・泥岩 - ：地学団体研究会,1985.7.20 発行

表 - 4 . 電気探査詳細計画一覧

地区名	水源別総 散水量 (m ³ /min)	測線長 (当初) (m)	測線長 (計画) (m)	机上調査からの情報			調査および探査手法の適用			井戸計画	
				帯水層の 可能性	既設井戸の 揚水量情報	帯水層付近の 地質	高密度 電気探査	電磁波 探査	垂直 探査	深井戸	浅井戸
1 清水	1.215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 清水		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 清水		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 新 ×	0.591	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 酒	0.771	400	400		なし	低位段丘の下位 に古琵琶湖層群 礫質土		測点2～3点	候補地に限られる		
6 酒											
7 井	0.897	400	500		カントリーEの 実績あり	"			候補地に限られる		
8 井											
9 三 谷	0.612	400	500		なし	崖錐～低位段丘			×		
10 下 部	1.649	400	500		Dep=67.5m Q=1.73m ³ /min	低位段丘の下位 に古琵琶湖層群 礫質土			候補地に限られる		×
11 下 部											
12 上 部	1.396	400	400		国道消雪用 ポンプ数箇所	"		測点3～5点	候補地に限られる		×
13 上 部											
14 × 生	0.860	400	300		なし	"		測点2～3点	候補地に限られる		×
15 × 生											
16 × 生											
17 原	0.445										
18 原											
19 原	0.538										
20 原											
21 岸 ×	0.781	400	400		Dep=50.0m Q=0.45m ³ /min	低位段丘の下位 に古琵琶湖層群 礫質土			候補地に限られる		×
22 岸 ×											
23 川	0.536	200	200		なし	沖積河床堆積物 の下位に基盤岩		×	×	×	
24 川											
25 川	0.226	200	-	×	なし	"	-	-	-	×	
合 計		3,200	3,200	:有望, :普通, ×:困難			:最適, :適, :あまり適さない, ×:不適			:最適, :適, ×:不適	

ただし、井戸計画は探査結果により修正を行うものとする