

# 地域地下水モデルの要素分析と揚水管理に関する調査事例

株式会社アスカソイルコーナ－ 正会員 奥野日出

キーワード: 深井戸 電気探査 揚水試験 井戸効率

## 1. はじめに

深井戸は、近年、農業水、工業水、消雪散水等の用途に利用され、昨今では防災用の非常水源や地域の親水性に資する水として、量・質共に多様な活用に注目されている。

このような地域の水環境保全と新たな水源開発が必要な地域では、モニタリングとシミュレーションが可能な帯水層モデルを作成しておくことが望まれる。すなわち、既設井戸や新設井戸との相互干渉を避け、過剰揚水による恒常的、傾斜的な水位低下や井戸性能の経年劣化を起さぬよう、地域の水環境を損なわない適正な揚水量の管理に十分な配慮が必要とされる。

本論文では、帯水層モデルを作成するための水源位置として相応しい要素と周辺の要素を電気探査とプレボ・リング調査等から分析し、また井戸の劣化や地域周辺の地盤沈下等の地下水問題を防止するため、揚水管理を行うための井戸損失式を考案し、設計揚水量について検討した。

ここに、井戸損失式は Thiem の平衡式を用い、帯水層モデルの状態に応じて透水量係数を補正し、また揚水時の目詰まり防止を検討する上でスクリーン長や開口率を導入して井戸管内の採水部損失項を加えて作成した。

これより、調査事例毎に新設井戸の限界揚水量と適正揚水量を設定した妥当性を述べ、また既設井戸の経年劣化に対する井戸効率の適用方法についても提案した。

## 2. 地域地下水モデルの要素分析

### 2.1 特定要素と非特定要素の区分について

地域地下水モデルは、広域な地下水盆あるいは局所的に3次元ないし準3次元の集合要素から作成され、その水収支のシミュレーションによって地域の地下水問題の防止と管理に活用されている。<sup>1)</sup>

ここに、シミュレーションの入力条件は、個々の要素が水源位置や地下水流動の干渉域として適用性の高い帯水層モデルとなるよう、地層区分と適切な水理定数を与えるための要素分析を行うことが重要と言える。

図1には地域地下水モデルの要素集合を示し、特定要素と非特定要素に区分した。

特定要素とは、計画用水量を確保し得る水源位置として相応しい要素であり、非特定要素は地下水流動の干渉域である。また非特定要素には複数の井戸を設けること

によって計画用水量が満たされても相互干渉が生じる要素を含み、特定要素としない。故に、このような要素集合に基づいて、既設井戸の運転管理や新設井戸の計画に対する地下水シミュレーションを行うことが、地域の水環境保全と地下水活用の在り方として相応しいと言えよう。

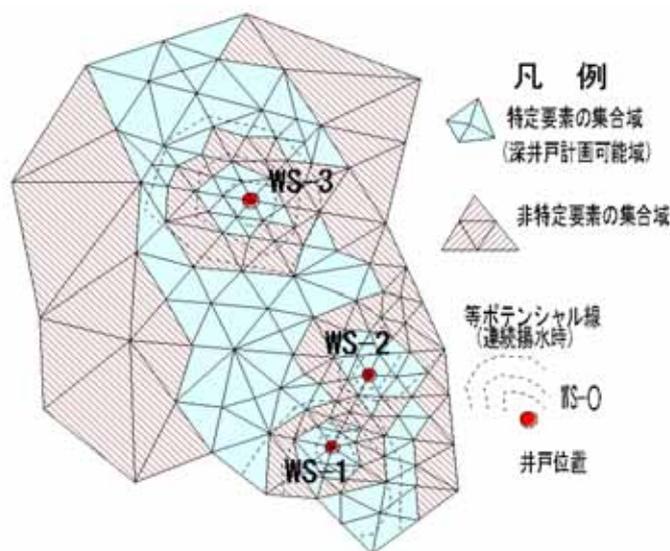


図1. 地域地下水モデルの要素集合

### 2.2 事前調査による要素分析結果<sup>2)</sup>

要素分析を行うための調査手法は、地下水盆の地形・地質条件に支配されるため、適切な手法を選定する必要がある。本調査事例では、特定あるいは非特定要素の帯水層モデル作成において、基盤層、帯水層を捉えた地層区分と水理定数の把握を可能とするため、垂直電気探査とプレボーリング調査の併用、また電磁探査と井戸台帳からの情報収集を事前調査として採用した。

#### 1) 滋賀県湖北平野の事前調査

国道と地方道の消雪散水を目的とする深井戸の候補地では、垂直電気探査を行い、中生層岩盤、洪積層、沖積層等の地質構成を求めた。なお、各地層の比抵抗区分は、図2-1に示すように、リニア・フィルター法を用いて見掛け比抵抗曲線に対する解析精度の検証を行った。

プレボーリング調査では、帯水層毎の透水試験結果より計画用水量に満たない箇所は非特定要素とし、特定要素では井戸計画に際して主な方針を以下に掲げた。

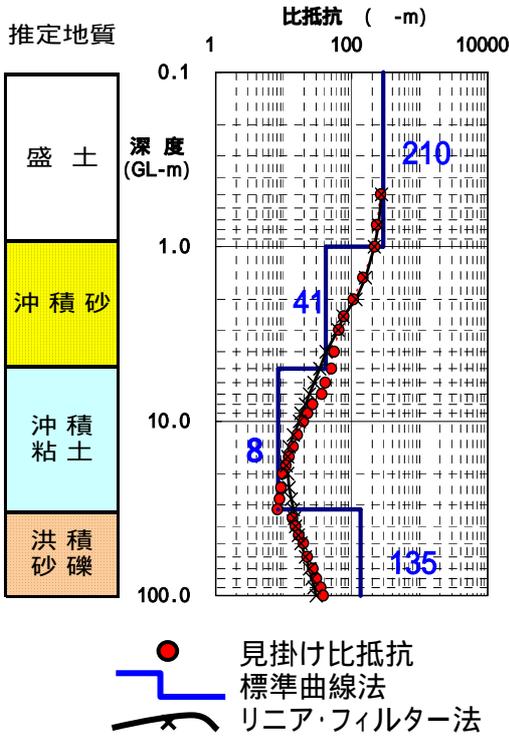


図 2-1. 垂直電気探査の要素分析事例 (C-No.2 測点)

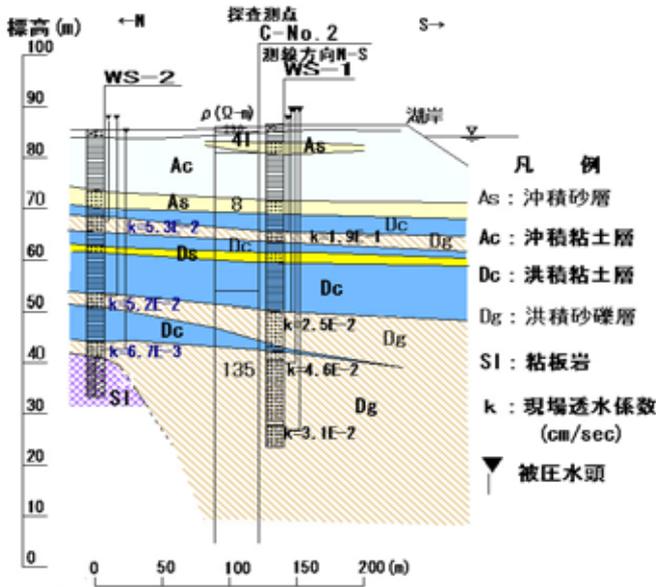


図 2-2. 特定要素の水理地質断面図

図 2-2 に示す井戸候補地 WS-1, WS-2 の帯水層と不透水層の区分において、帯水層厚、透水係数及び被圧水頭より設計揚水量の試算を行う。

沖積層の圧密沈下等の発生を防止することと揚水に伴う相互干渉を極力避けるため、WS-1 は標高 50m 以深に単層スクリーンを設け、WS-2 では標高 70m 以深から基盤岩までの帯水層で多層スクリーンに分散させて揚水計画を行うことにする。

以上のように、沖積平野下の特定要素に関しては、プレボーリング調査が地質構成の詳細と水理定数の把握に加えて、地下水問題の防止策を踏まえた井戸計画を立案することに重要な役割を果たすことになる。

## 2) 兵庫県淡路島中部地区の事前調査<sup>2)</sup>

当地の地下水盆地は、洲本花崗岩類の基盤岩が東西両側の丘陵部で昇地塊となり、相対的に帯水層の大阪層群が沈降部に相当するが、電磁探査より先山断層をはじめ撓曲構造に伴う基盤岩起伏の著しいことが把握でき、深井戸位置は基盤底凹部で地下水供給が想定される断層や地質構造の近隣に限られた。また、電磁探査によれば基盤底が 200~300m 以深に想定され、プレボーリング調査は工期やコスト面で不合理と考えられたため、水理定数は井戸台帳からスクリーン長(帯水層)、適正揚水量、影響半径の仮定等から推定した。

図 2-3 には既設井戸 K-1 の要素分析結果を示す。

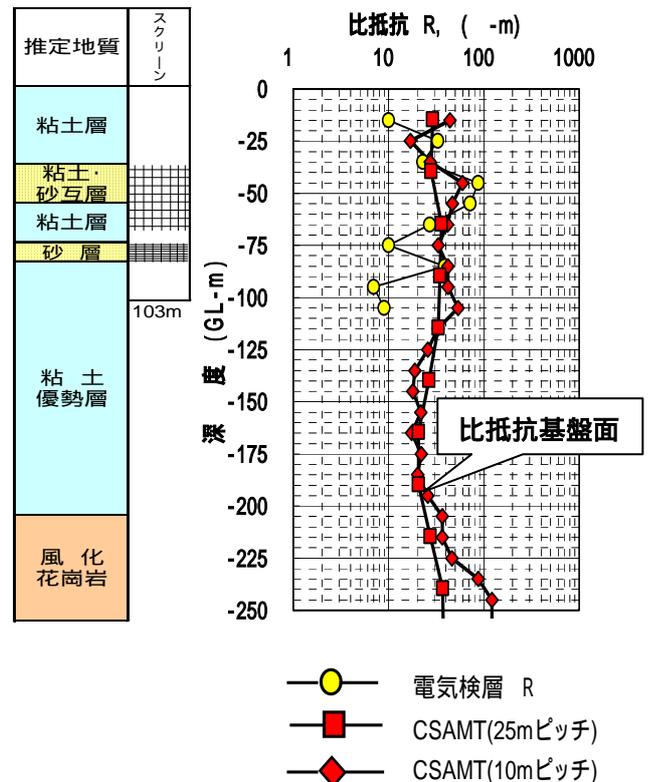


図 2-3. 電磁探査 (CSAMT 法) の要素分析事例

K-1 の特定要素では、複数の探査測点より図 2-3 に示すような比抵抗基盤面、つまり帯水層と基盤岩の境界より基盤面を追跡して基盤底凹部の位置であることと、近隣の断層を見出した。また電磁探査と電気検層の比抵抗値の対応より、相対的に高比抵抗を示す砂優勢層と低比抵抗の粘土優勢層に地層区分を想定した。なお、地層区分の検討時には、図 2-3 に示すように比抵抗値を 2 通りの解析ピッチで算出して、この対応を吟味した。

一方、非特定要素は、計画用水量に満たない施工井戸の失敗例と電磁探査結果を考えた場合、基盤岩凸部に見出され、また基盤底凹部であっても断層等に隣接していないところに相当することが分かった。

以上のように、当地区の要素集合は電磁探査が主体となって基盤岩深度の把握と帯水層区分が可能であり、これより台帳情報と合わせて設計揚水量の試算を行った。

### 3. 揚水管理

#### 3.1 井戸損失式の提案

被圧帯水層の井戸公式は、一般に図 3-1 に示す帯水層モデルにおいて、Thiem の平衡式(1.1)が用いられる。

$$Q = \frac{2\pi km(H-h_0)}{\ln(R/r_0)} \dots (1.1)$$

ここに、 $Q$ : 揚水量( $m^3/day$ )  
 $k$ : 透水係数( $m/day$ )  
 $m$ : 帯水層厚( $m$ )  
 $H-h_0$ : 水位低下量( $m$ )  
 $R$ : 影響半径( $m$ )  
 $r_0$ : 井戸半径( $m$ )

である。

また式(1.1)より、 $Sw = H-h_0$ 、 $A = \ln(R/r_0) / 2\pi km$  とし書きかえると次式(1.2)が得られる。

$$Sw = A \cdot Q \dots (1.2)$$

ここに、 $A$  係数は地形・地質の境界条件、井戸仕様、プレボーリング、現場透水試験等の事前調査により求められ、 $Sw-Q$  関係は  $R$  が一定で平衡状態が保たれるときの層流域に相当する。一方、平衡式の延長上で乱流域の水位低下量を考えるならば、 $A$  係数の変数の内  $R$  に着目すると、図 3-1 において  $R' > R$  と仮定することができる。

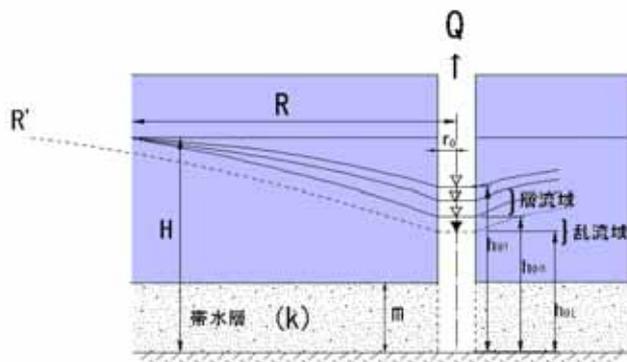


図 3-1. 被圧帯水層のモデル図( )

また層流域の  $Sw-Q$  関係は、式(1.1)を用いて図 3-2 の実線で示されるように、事前調査からは層流域と乱流域の境界(限界揚水量)が定まらず、設計揚水量(適正揚水量)を設定するには水位低下量を制限しないかぎり、揚水試験で得られた実測値の分布から層流域と乱流域を把握して限界揚水量より求めるほかはない。すなわち、設計揚水量は一般に限界揚水量の 0.7~0.8 程度としている。

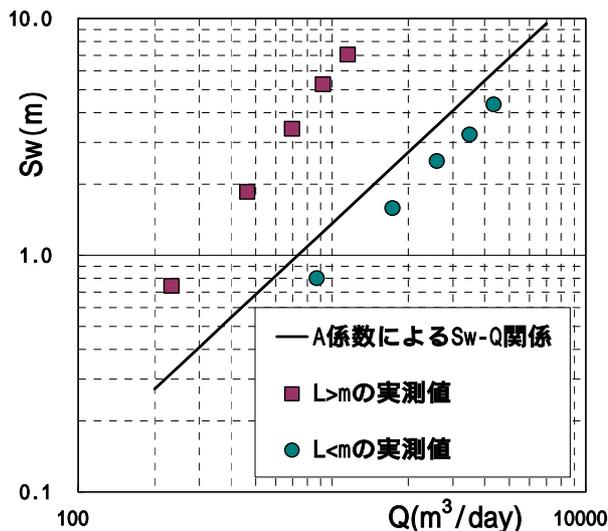


図 3-2. 段階揚水試験の  $Sw-Q$  関係図

一方、実際に施工される井戸の大半は、図 3-3 ないし図 3-4 の帯水層モデルに相当するため、揚水試験の実測値と式(1.1)の関係に誤差が生じる。何故なら、帯水層や不透水層は井戸から離れると層厚が変化するため、図 3-2 の実測値は、図 3-3 の  $L < m$  の場合、式(1.1)を用いた予測値(図 3-2 の実線)よりも下方に、図 3-4 の  $R$  に至るまでの帯水層が薄くなるような  $L > m$  の場合には、上方にプロットされるからである。

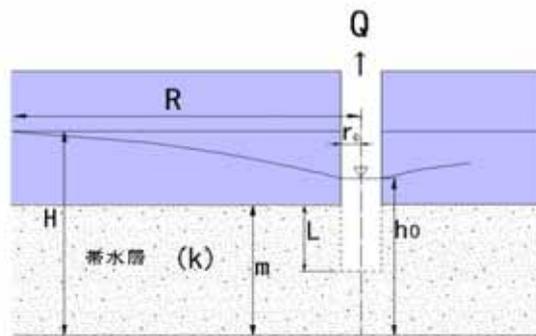


図 3-3. 被圧帯水層のモデル図( )

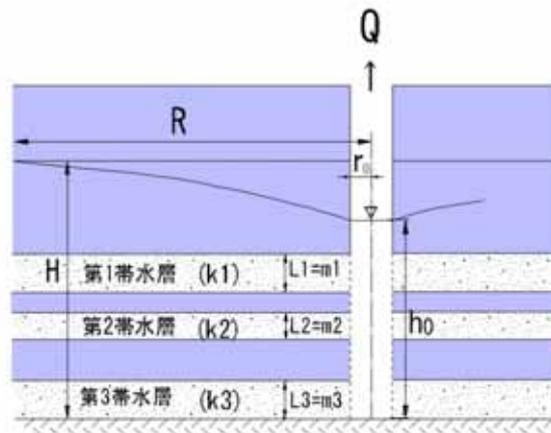


図 3-4. 被圧帯水層のモデル図( )

従って、実測値と式(1.1)との関係を整合させるには、式(1.2)の  $A$  係数に含まれる透水量係数  $km$  に対して式(1.3)のように補正する必要がある。

$$S_w = \frac{\ln(R/r_0)}{2\pi\mu km} \cdot Q \quad \dots (1.3)$$

$$S_w = B \cdot Q \quad \dots (1.4)$$

ここに、 $\mu$  を透水量補正係数と呼び、 $A$  係数の分母に  $\mu$  を乗じたものを  $B$  係数と呼ぶ。

ただし、 $\mu$  は  $L$  と  $m$  の関係によるものだけでなく、前報<sup>2)</sup>によると基盤底の断層や亀裂からの地下水供給も考慮すべき補正係数と考える。

次に  $R$  一定の条件のもとで  $B$  係数以外の井戸損失項として、井戸のスクリーン長  $L$  や開口率などが影響する採水部での損失水頭を考える。すなわち、相対的に  $L$  や  $\delta$  が 0 に近づくほど管内流速が速くなり、 $Q$  の増加に対して  $S_w$  の損失も大きくなると考えることができる。<sup>3)</sup>

これは過剰揚水によって管内が乱流域となる( $R > R$  と仮定)以前においても、 $R$  一定条件、すなわち層流域においても採水部の穿状条件に伴い損失水頭が生じ、これが過剰となって目詰まりを発生させないためにも採水部での損失水頭を把握しておくべきと考える。

採水部の損失水頭に関する既往研究としては、福川(1969)が次式(1.5)を提案している。<sup>4)</sup>

これは、 $L$ 、 $\delta$  以外に重力加速度、採水部の断面形状、スクリーン形状、管外の充填材料の形状などを考慮した経験式と言える。

$$hs = \frac{\alpha}{2g\phi} \left( \frac{t}{b} \right)^{3/4} \left( \frac{Q}{L \cdot D \cdot \pi \cdot \delta \cdot \beta} \right)^2 \quad \dots (1.5)$$

ここに、 $hs$ : 採水部損失水頭(m)、 $Q$ : 揚水量( $m^3/day$ )  
 $\alpha$ : スクリーン形状、 $g$ : 重力加速度( $m/sec^2$ )、 $t$ : 巻線幅(径)(mm)、 $b$ : スクリーン間隔(mm)、 $L$ : スクリーン長(m)、 $D$ : 井戸口径(m)、 $\delta$ : 開口率、 $\beta$ : 充填材料の形状係数、 $\phi$ : 充填材料の間隙率( $=f/Uc^2$ )、 $f$ : 間隙率に対する係数、 $Uc$ : 均等係数である。

なお、福川は透水量補正係数  $\mu$  については言及していないので式(1.2)に式(1.5)を加えると、井戸損失式は式(1.6)のようになる。

$$S_w = A \cdot Q + C \cdot Q^2 \quad \dots (1.6)$$

ここに、 $hs = C \cdot Q^2$  であり、 $C$  係数は  $day^2/m^5$  に単位換算して適用することができる。

一方、著者は福川の提案を肯定する観点より、次式(1.7)を井戸損失実用式として提案する。

式(1.7)では、Thiem の平衡式に重力加速度や井戸の断面形状が考慮されていないので、これらを導入せず、また管外の充填材料は帯水層よりも流路抵抗は少ないと考えて無視し、管内流入部の  $C$  係数には式(1.8)に示す  $L$  と  $B$  係数を用いた。

$$S_w = B \cdot Q + C' \cdot Q^2 \quad \dots (1.7)$$

ここに、 $C'$  係数の単位は  $day^2/m^5$ 、開口率は  $\delta = 0.2$  を基準とした。

$$C' = \frac{0.2}{\delta \cdot L} B^2 \quad \dots (1.8)$$

次節では式(1.6)、(1.7)を用い、要素分析結果により深井戸施工が行われた位置での揚水試験結果と対比する。

これらの提案式を適用する理由は、揚水試験の内、段階揚水試験では通常 5、6 段階毎に一定の揚水量と水位低下量の関係が得られるが、必ずしも層流域と乱流域とに区分できる結果が得られるとは限らないからである。

例えば、 $S_w-Q$  関係が対数紙上で直線関係となり限界揚水量が求めにくいことや乱流域であってもあたかも直線性があるとみなして設計揚水量を求めていることがあり、段階揚水試験結果からの判断だけに従い設計揚水量を設定すると、過剰揚水となり得る可能性が多分にあると考えられる。また揚水時の目詰まり防止としては、 $R > R$  の仮定による乱流域での過剰揚水に係わらず、採水部損失項での損失水頭が過剰になることも捉えて設計揚水量を設定することが必要と考える。

### 3.2 設計揚水量の検討結果

調査事例は、消雪散水に利用している滋賀県湖北平野の深井戸 2 箇所、また農業用水として兵庫県淡路島中部洪積台地下の深井戸 2 箇所につき、ここでは設計揚水量の妥当性について検討する。

まず、各井戸では垂直電気探査、プレボーリング調査、電磁探査等の事前調査結果より、各提案式の水理定数を求めた。次に新設井戸の揚水試験実測値と提案式の整合を図るため、著者の提案式(1.7)には透水量補正係数  $\mu$  を定めて井戸効率  $E_w$  を 1.0 とし、福川の提案式(1.6)では  $\mu$  を用いないので  $E_w$  により調整することにした。

さらに、築 37 年の既設井戸では経年劣化による揚水量の低下がみられたため、式(1.7)では  $E_w=0.8$  の算定結果も図示した。

### 1) 滋賀県湖北平野の設計揚水量

当地は先に述べたように沖積平野下で沖積層、洪積層、基盤岩からなる水平な成層状態により、深井戸は沖積層の圧密沈下を発生させないように、洪積粘土層下に加圧された砂礫層より揚水を行うものである。

深井戸 WS-1 と WS-2 の帯水層モデル、井戸構造及び水理定数に係わる主な特性は下記のようにまとめられる。

#### WS-1(平成 11 年施工)

- ・ 基盤岩までは厚い洪積砂礫層が分布するため、スクリーン長  $L$  より、帯水層モデルは図 3-3 のタイプの  $L < m$  の条件となり、 $B$  係数の  $\mu$  は 1.6 とした。
- ・ スクリーンは帯水層において 4m×7 本が連続した単層構造  $L=28(m)$  となる。
- ・ プレボーリング調査の現場透水試験結果より、平均透水係数は  $k=3.72 \times 10^{-2}(cm/sec)$  となる。

#### WS-2(平成 11 年施工)

- ・ 基盤岩まで洪積砂礫層と粘土層が互層し、井戸先端が基盤岩となったため、帯水層モデルは図 3-4 のタイプ に相当するが、互層の変化が想定され  $L > m$  の条件となり、 $B$  係数の  $\mu$  は 0.6 とした。
  - ・ スクリーンは互層条件に従い 4m×3 本の多層構造  $L=12(m)$  となる。
  - ・ プレボーリング調査の現場透水試験結果より、平均透水係数は  $k=7.57 \times 10^{-2}(cm/sec)$  となる。
- また、WS-1、WS-2 のスクリーン構造は共に開口率 20% の巻線加工を施したものである。

段階揚水試験の実測値と提案式との対応は、 $Sw-Q$  関係図、及び比湧出量  $Q$  を算出して  $Q-Q$  関係図に表わした。

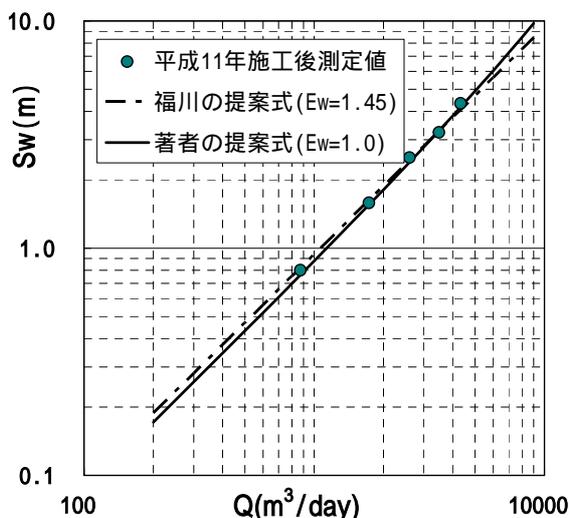


図 3-5.1.  $Sw-Q$  関係図(新設井戸 WS-1)

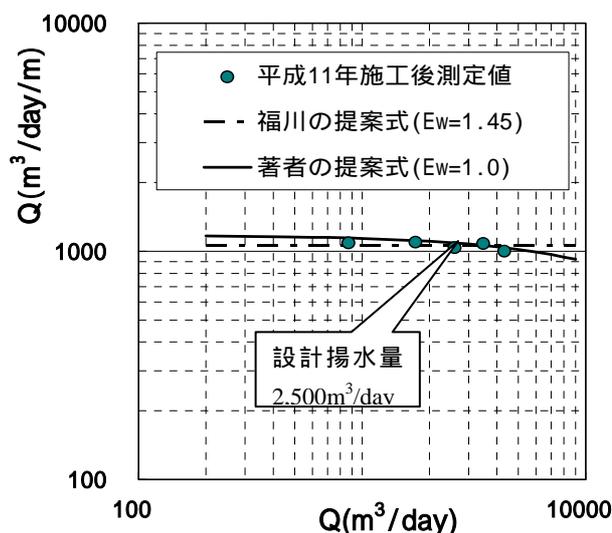


図 3-5.2.  $Q-Q$  関係図(新設井戸 WS-1)

WS-1 は  $Q=870 \sim 4,300(m^3/day)$  間で段階揚水が行われ、水位低下量  $Sw$  との関係が図 3-5.1 に示されるように、実測値は対数紙上で直線性が見出され、且つ 2 つの提案曲線上にほぼプロットされるため、限界揚水量を特定できない。また図 3-5.2 に示す比湧出量  $Q$  については、全段階において実測値が  $Q=1,050(m^3/day/m)$  付近にあり、ほぼ著者の提案曲線上に乗る。

従って、WS-1 ではいずれの図からも実測値は層流域の測定結果を表わしていると考えられ、限界揚水量から設計揚水量を求めることが困難と言える。

しかし、図 3-5.2 の著者の提案曲線では、採水部損失水頭の増加が顕著になって  $Q$  がやや下りはじめの傾向が  $Q=2,500(m^3/day)$  付近よりみられるので、限界揚水量が定まらなくても層流域での目詰まり防止を考慮すると、 $Q=2,500(m^3/day)$  を設計揚水量として提示できる。

WS-2 は  $Q=230 \sim 1150(m^3/day)$  間で段階揚水が行なわれ、水位低下量  $Sw$  との関係が図 3-6.1 に示されるように実測値は対数紙上で直線性が見出されるが、初期段階より両提案曲線から離れたところにプロットされる。

これは採水部損失水頭が次第に増加してくる領域で、2 段階目以降の実測値は明らかに乱流域に相当していて、ここで乱流域の実測値を繋いだ直線と提案曲線との交点より、限界揚水量は  $300m^3/day$  付近に想定される。

図 3-6.2 に示す  $Q$  については、初期段階より  $Q$  の実測値が急低下する傾向が見られ、また著者の提案曲線よりも低い測定結果となっている。

従って、WS-2 では、乱流域の実測値のみで限界揚水量や設計揚水量を決めがたく、設計揚水量は、WS-1 と同様に著者の提案曲線上で考えると、 $Q$  がやや下りはじめの  $Q=210(m^3/day)$  に求められる。なお、この設計揚水量は先に提示した限界揚水量  $300m^3/day$  の 0.7 となり、一般的な結果を得る。

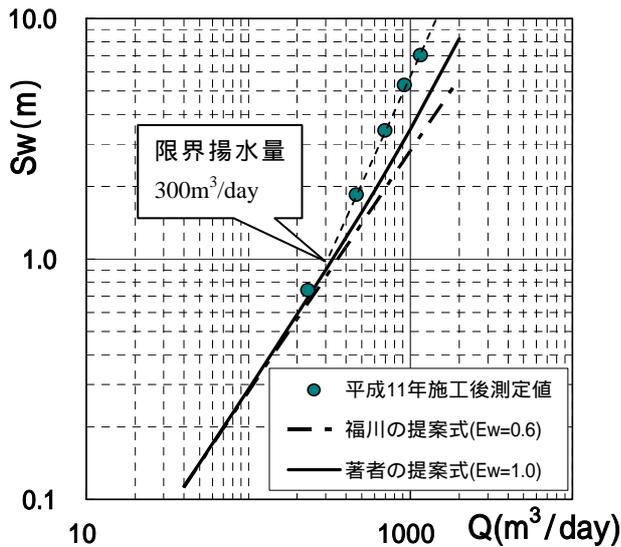


図 3-6.1. Sw-Q 関係図(新設井戸 WS-2)

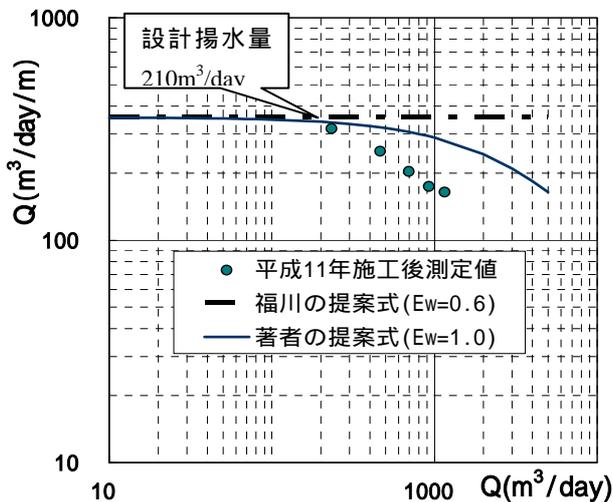


図 3-6.2. Q-Q 関係図(新設井戸 WS-2)

以上のように、段階揚水試験の実測値からは、層流域と乱流域の区分を見出せない場合があり、限界揚水量と設計揚水量を的確に捉えるには、透水量補正係数  $\mu$  や採水部損失項を導入した井戸損失提案式と対比することによって可能と考える。

すなわち、 $Sw-Q$  関係図及び  $Q-Q$  関係図の両面から層流域と乱流域を判別することを基本として、また採水部損失水頭の増加に着目することによって、目詰まりによる経年劣化を防止できるよう、設計揚水量を求めることが重要と判断する。

なお、福川の提案式(1.6)による採水部損失項での水位低下量は、全般に微量に算出されたため、当現場の井戸仕様の場合には、層流域で目詰まりの影響が殆どないと考察される。

一方、著者の提案式(1.7)では、WS-1 の実測値は提案曲線上にほぼプロットされて層流域での採水部損失水頭に

伴う  $Q$  の低下傾向が現れ、また WS-2 では  $Sw$ 、 $Q$  の実測値は乱流域にプロットされるが、提案曲線の低下傾向に対応する故、揚水量の増加に伴い目詰まりの悪影響が次第に大きくなると考察される。

このように両提案式における損失水頭の相違は、各式に導入した係数の考え方や各式を導いた現場条件の差異によるものと思われる。

## 2)兵庫県淡路島中部地区の設計揚水量

当地の帯水層は、地史的な造構運動より傾斜や変位を伴い、正確には水平多層構造ではないと考えられるが、帯水層モデルは先に示したタイプを適用し、また地下水供給が想定される断層や撓曲構造の影響は透水量補正係数  $\mu$  を用いて井戸損失式を調整した。

深井戸 K-1 と F-1 の帯水層モデル、井戸構造及び水理定数に係わる主な特性は、下記のようにまとめられる。

### F-1(平成 15 年施工)

- ・基盤岩まで大阪層群の砂層、粘土層、砂礫層が互層し、井戸先端が基盤岩となるため、帯水層モデルは図 3-4 のタイプに相当し、近隣断層からの地下水供給が想定されて  $L < m$  の条件となり、 $B$  係数の  $\mu$  は 2 とした。
- ・なお、 $\mu=2$  は基盤岩の断層、すなわち大阪層群以外の地下水経路による特異な数値として捉えられる。
- ・スクリーンは互層条件に従い  $5m \times 10$  本の多層構造  $L=50(m)$  となる。
- ・また開口率は 25% で、巻線加工仕上げが施された。
- ・施工時の現場透水試験結果より、平均透水係数は  $k=2.37 \times 10^{-3}(cm/sec)$  となる。

### K-1(昭和 52 年施工)

- ・基盤岩まで大阪層群砂層と粘土層が互層するが、亀裂性の粘土層にもスクリーンが設けられ、井戸先端より基盤岩までは 100m 深と電磁探査により推定され、帯水層モデルは図 3-3 のタイプに相当し、 $L < m$  の条件となり、 $B$  係数の  $\mu$  は 4 とした。
- ・スクリーンは互層条件に従い  $12m \times 3$  本、 $6m \times 1$  本の多層構造  $L=42(m)$  となる。
- ・また開口率は 4% で、スリット加工仕上げが施された。
- ・施工時の現場透水試験結果より、平均透水係数は  $k=1.71 \times 10^{-3}(cm/sec)$  となる。

次に、 $Sw-Q$  関係図、及び  $Q-Q$  関係図を作成して F-1、K-1 の設計揚水量について検討した結果を述べる。

F-1 は  $Q=150 \sim 1,050(m^3/day)$  間で段階揚水が行われ、その水位低下量  $Sw$  との関係が図 3-7.1 に示されるように実測値は対数紙上で直線性が見出され、且つ著者の提案曲線上にほぼプロットされ、限界揚水量を特定できない。

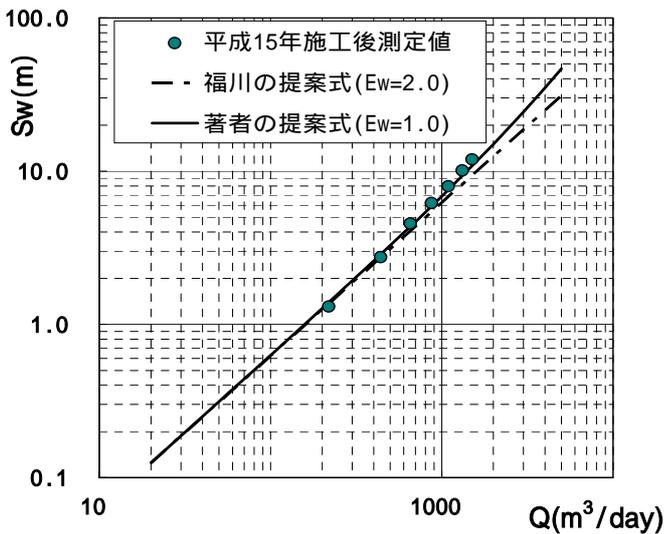


図 3-7.1. Sw-Q 関係図(新設井戸 F-1)

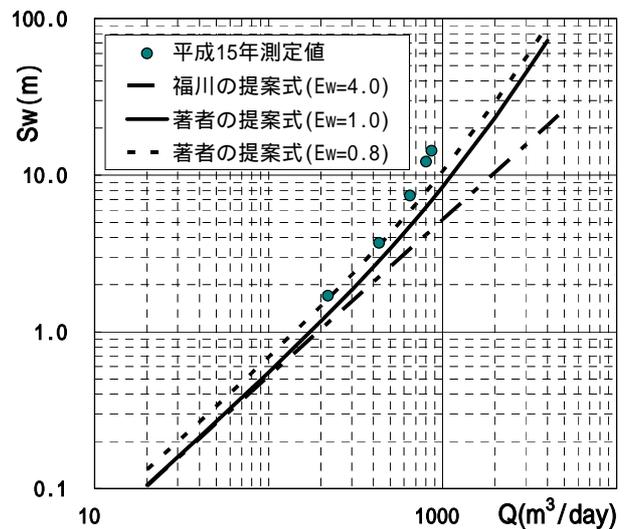


図 3-8.1. Sw-Q 関係図(既設井戸 K-1)

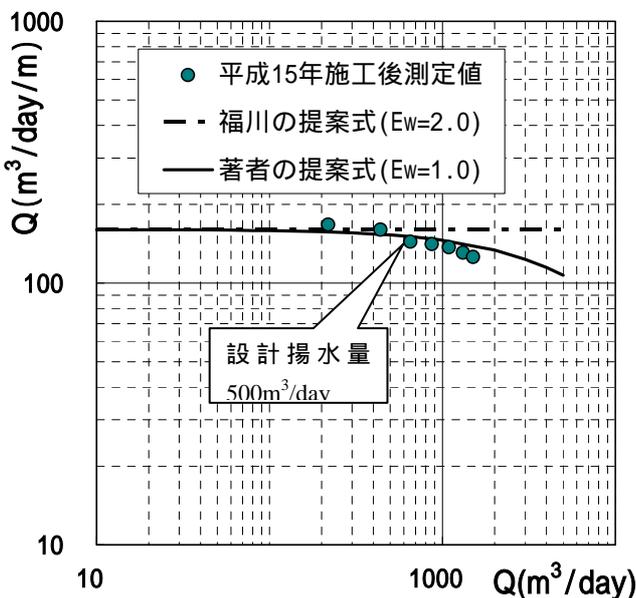


図 3-7.2. Q-Q 関係図(新設井戸 F-1)

図 3-7.2 に示す  $Q$  については、実測値がほぼ著者の提案曲線上にプロットされるが、 $Q=500(\text{m}^3/\text{day})$  付近より  $Q$  の実測値は曲線より下方にあり、強いて限界揚水量を  $Q=500 \sim 1,000(\text{m}^3/\text{day})$  間に求めなくても、設計揚水量を  $500\text{m}^3/\text{day}$  として特に問題はないと考える。

K-1 は築 37 年を経ている、施工時の適正揚水量  $1,150\text{m}^3/\text{day}$  と比べて井戸効率  $E_w$  が下がっている。すなわち、今回は  $Q=150 \sim 600(\text{m}^3/\text{day})$  間で段階揚水が行われ、その水位低下量  $Sw$  との関係が図 3-8.1 に示されるように、実測値は  $E_w=1.0$  の著者の提案曲線よりも上方に離れ、 $E_w$  の低下が把握できる。そこで、初期段階の実測値に合わせて提案曲線を作成すると、 $E_w=0.8$  となった。

従って、今後はこの井戸効率で設計揚水量を求める必要があり、また目詰まりの防止も考慮しなくてはならないと考える。図 3-8.2 より、開口率 4% の  $E_w=1.0, 0.8$  各々の提案曲線に注目すると、いかに層流域としても  $Q$  の

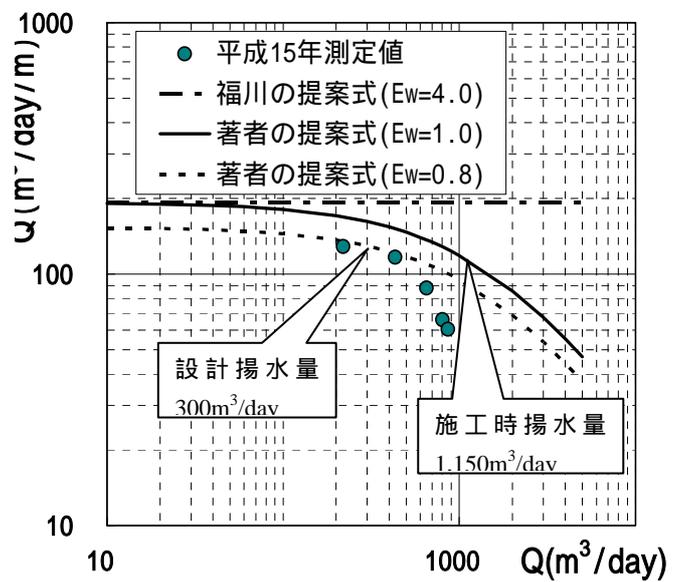


図 3-8.2. Q-Q 関係図(既設井戸 K-1)

低下傾向は著しく、施工時の適正揚水量  $1,150\text{m}^3/\text{day}$  で運転し続けたため、目詰まりによる劣化はかなり進行したものと考察される。

従って、今後の設計揚水量は  $E_w=0.8$  の提案曲線上において、最大でも  $Q=300(\text{m}^3/\text{day})$  が適当と判断される。

なお、福川の提案式を用いた場合は、先に述べた湖北平野の井戸と同様に、採水部損失項での水位低下量は全般に微量に算出された。

以上、両地区の井戸調査事例の解析結果は、表 4-1 に一覧にまとめてみた。

#### 4.まとめ

地域の水環境保全と地下水活用を適切に行うには、水源位置を特定要素、地下水流動の干渉域を非特定要素に区分して帯水層モデル作成し、井戸のモニタリングと地下水シミュレーションが可能な要素分析を行う必要がある。

表4-1.井戸調査解析結果一覧

| 項目                       | 単位          | 施工井戸の調査結果及び解析値 |           |              |           |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------|--------------|-----------|
|                          |             | 新設井WS-1        | 新設井WS-2   | 新設井F-1       | 既設K-1     |
| 井戸名称                     | -           | 新設井WS-1        | 新設井WS-2   | 新設井F-1       | 既設K-1     |
| 利用目的                     | -           | 消雪散水           |           | 農業用水         |           |
| 地域地形                     | -           | 滋賀県湖北平野        |           | 兵庫県淡路島中部洪積台地 |           |
| 施工年月                     | -           | 平成11年11月       | 平成11年10月  | 平成15年10月     | 昭和52年3月   |
| 施工時適正揚水量 $Qd$            | $m^3/day$   | 3,630          | 950       | 1,054        | 1,150     |
| 揚水試験年月                   | -           | 平成11年11月       | 平成11年10月  | 平成15年10月     | 平成15年10月  |
| 業者提案揚水量 $Qd$             | $m^3/day$   | 同上             | 同上        | 同上           | -         |
| 著者提案揚水量 $Qda$            | $m^3/day$   | 2,500          | 210       | 500          | 300       |
| 井戸長 $H_L$                | m           | 76             | 55        | 142          | 102       |
| 帯水層の地質                   | -           | 低位段丘砂礫層        | 低位段丘砂礫層   | 大阪層群砂及び礫優勢層  | 大阪層群砂優勢層  |
| 孔底の地質                    | -           | 低位段丘砂礫層(未着岩)   | 中生層粘板岩    | 風化花崗岩        | 大阪層群(未着岩) |
| ストレナ仕様                   | -           | 巻線加工           | 巻線加工      | 巻線加工         | スリット加工    |
| 影響半径 $R$                 | m           | 500            | 500       | 300          | 500       |
| 井戸半径 $r_0$               | m           | 0.225          | 0.125     | 0.1          | 0.15      |
| 帯水層厚 $H(=L)$             | m           | 28             | 12        | 50           | 42        |
| 基盤層までの帯水層厚 $m$           | m           | 28>            | 12        | 50           | 100       |
| 透水係数 $k$                 | $cm/sec$    | 3.72E-02       | 7.57E-02  | 2.37E-03     | 1.71E-03  |
|                          | $m/day$     | 32.14          | 65.40     | 2.04         | 1.48      |
| 透水量係数 $kH$               | $m^2/day$   | 899.9          | 784.9     | 102.2        | 62.1      |
| 透水量補正係数 $\mu$<br>(著者の提案) | -           | 1.6            | 0.6       | 2.0          | 4.0       |
| 係数(著者の提案) $B$            | $day/m^2$   | 1.364E-03      | 2.80E-03  | 6.237E-03    | 5.20E-03  |
| スクリーン形状 $a$              | -           | 2.42           | 2.42      | 2.42         | 2.42      |
| 巻線幅(径) $t$               | mm          | 5              | 5         | 5            | 5         |
| スクリーン間隔 $b$              | mm          | 2              | 2         | 2            | 2         |
| スクリーン長 $L$               | m           | 28             | 12        | 50           | 42        |
| 井戸孔径 $D$                 | m           | 0.45           | 0.25      | 0.2          | 0.3       |
| 開口率 $\delta$             | -           | 0.2            | 0.2       | 0.25         | 0.04      |
| 充填材の形状係数 $\phi$          | -           | 0.8            | 0.8       | 0.8          | 0.8       |
| 充填材の間隙率 $\beta$          | -           | 0.178          | 0.178     | 0.178        | 0.178     |
| 間隙率に対する係数 $f$            | -           | 0.3            | 0.3       | 0.3          | 0.3       |
| 均等係数 $Uc$                | -           | 1.3            | 1.3       | 1.3          | 1.3       |
| 係数(福川の提案) $C$            | $day^2/m^3$ | 2.081E-11      | 3.675E-10 | 2.997E-11    | 5.203E-10 |
| 係数(著者の提案) $C'$           | $day^2/m^3$ | 2.594E-08      | 6.555E-07 | 6.224E-07    | 3.224E-06 |

このため、本論文では、地域特性の異なる沖積平野下と洪積台地下において、各々の地形・地質条件に適した調査手法を選定して、地下水盆の地質構成と水理定数等を明らかにするための要素分析を行った。また水源位置の特定要素においては、過剰揚水や採水部の井戸構造がもたらす目詰まりの影響を把握するため井戸損失式を考案し、これより揚水管理に必要な設計揚水量を導いた。

以上の主な結果と考察について以下にまとめる。

要素分析に用いた各種電気探査は、その結果の信頼性を把握する上で、リニア・フィルター法の適用やインバージョンと電気検層結果と対比を行い検証した。

沖積平野下では、プレボーリング調査によって地質構成と水理定数の把握に加えて、スクリーン位置を洪積砂礫層に計画して、圧密沈下の防止と相互干渉を避ける

ための揚水分散を立案した。帯水層モデルは、Thiemの平衡式に透水量補正係数  $\mu$  を導入して  $B$  係数を定め、また  $B$  係数とスクリーン長、開口率により採水部損失項  $C'$  係数を加えて井戸損失式を考案して作成した。

これにより、水位低下量  $S_w$ -段階揚水量  $Q$  と比湧出量  $Q-Q$  の提案曲線でもって実測値と層流域、乱流域の対応を明らかにすることができた。また採水部損失項において目詰まりによる損失水頭を考察して、実測値と提案曲線から過剰揚水とならない設計揚水量を求めることができた。さらに既設井戸の経年劣化に対して、提案曲線より井戸効率を求めることも可能と言える。

以上のように、著者の提案式による施工井戸の帯水層モデルでは、新設井戸の安全設計や既設井戸の揚水管理に適用性があり、地域の水環境保全として有効に活用できると考えられる。

## 5.おわりに

今後は地域毎に要素集合の整理を行い、井戸の運転状況から水環境状態を把握す

るために、3次元ないし準3次元の地下水シミュレーションを試み、井戸枯れや地盤沈下等の地下水問題の有無、新設井戸計画、掘削工事に対する影響などの評価を地下水流動や水頭変化等より予測して、当地域地下水のモニタリングシステムを構築したいと考える。

以上

## 【引用文献】

- 1) 鎌田烈, 藤縄克之, 「アーバンボタ特集地下水」, Vol.27, pp.15-19, pp.52-57, (1988).
- 2) 奥野日出, 小山修平, 「地下構造可視化技術を用いた深井戸計画の成功例と失敗例」, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム, (社)地盤工学会関西支部主催, pp.82~87, (2007).
- 3) 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp.95, (1998).
- 4) 福川 豊著, 「実用深井戸工学」, 日本道路技術研究会監修, 政府刊行物, pp.61-64, (1969).