# 地域地下水管理に関する揚水モデルと井戸損失式の提案

# 奥野 日出<sup>1</sup>,小山 修平<sup>2</sup>

1 株式会社アスカソイルコーナー

2 大阪府立大学・大学院生命環境科学研究科

## 概 要

全国井戸台帳によると、深井戸は帯水層の地質構成に基づき、多層スクリーンを有する不完全貫入井戸が多い。 この点は、水資源としての地下水の有効利用だけではなく、水環境の保全にとっても重大な問題である。 したがって、一般に井戸設計では、施工コスト面を踏まえて、できる限り正確に計画揚水量を算定する必要 がある。しかしながら、不完全貫入井戸の場合、水理定数の算定や揚水管理に関して井戸理論を正確に適用 し難く、不適切な設計揚水量を導くこともあり、結果的に不正確な設計揚水量を算出することによって過剰 揚水による井戸の枯渇の助長や地下水位の低下による地盤沈下の被害も多くなっている。本研究においては、 安全な設計揚水量を導くために、プレボーリングによる帯水層の水理学的な地質特性、段階揚水試験及び定 常説を用いて実用的な井戸損失式を提案して本式の有効性について考察した。すなわち、非定常説に基づく Jacob 法と対比される新しい揚水モデルによる井戸損失式を提案し、地下水盆を構成する地質が異なる地域 や任意の井戸構造においても、同一の井戸損失式によって地下水管理が可能であることを実証的に明らかに した。

キーワード:地下水管理,揚水モデル,井戸損失,地域特性,水理地質

# 1. はじめに

全国の地域地下水盆では,近年,地下水採取規制により 地下水位が回復し,地盤沈下は沈静化の傾向にある。しか し,生活用水,農工業用水の深井戸利用は現在も多く,ま た豪雪地域の消雪用地下水や渇水期の地下水利用の急増 によって地盤沈下が生じている状況もあり,さらに今後の 地下水利用の合理化やニーズの変化に伴い,健全な水循環 を保全するための地下水管理に関する整備が不可欠とな っている。

また,地域地下水管理には,水環境保全の観点から地下 水汚染防止も重要であり,採取規制と合わせて自然流下な いし揚水に伴う地下水流動のシミュレーションや涵養機 能の把握が必要である。したがって,地下水の保全目標は, 地域全体の地下水位の維持,水質保全,及び地盤沈下の防 止などであり,それには適正揚水量のあり方に注目する必 要がある。一般に適正揚水量は限界揚水量の 60~80%<sup>1)</sup>, または地域係数<sup>2)</sup>を乗じて算出される。しかしながら,ま ず,本研究では,影響半径や基盤岩起伏で遮断され既設井 戸と相互干渉のない井戸位置を選定するために,電気探査 及びボーリング調査から地域地下水盆下の地質構成,地質 構造,帯水層などの成層状態について把握した。次に,施 工井戸での揚水試験結果から水理定数を求め,揚水モデル を作成して適正な設計揚水量を導く井戸損失式を提案し, その適用性を考察した。

#### 2. 揚水井モデルと井戸損失式

#### 2.1 非定常説に基づく Jacob モデル

Jacob モデル<sup>3)</sup>による非定常説に基づく井戸損失式を式 (1)に示す。

$$S_w = B_j Q + C_j Q^2 \tag{1}$$

ここに、 $S_w$ :水位低下量(m)(全井戸損失量)であり、  $S_w$ はBoonstra, J. and Kselik, R.A.L.の解説<sup>4)</sup>によると、 $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ の和で示される。すなわち、 $S_1$ は理論井戸損失(地層水 の井戸損失)(m),  $S_2$ はグラベルパック、スクリーン孔など の線形井戸損失(m),  $S_3$ は乱流域として考えられる井戸損 失(m)である。また、Q:段階揚水量(m<sup>3</sup>/day),  $B_j$ :線形井 戸損失係数(day/m<sup>2</sup>),  $C_j$ :非線形井戸損失係数(day<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)で あり、 $B_j$ は $B_j = B_1(r_w,t) + B_2$ ,  $B_1(r_w,t) = W(u)/4\pi kh$ の式、 $B_1(r_w,t)$ は地層水損失係数, W(u)は井戸関数で $u = (r_w^2 S)/(4kht)$ の式で 示される。ここに、k:透水係数(m/day), h:帯水層厚(m), kh:透水量係数(m<sup>2</sup>/day), S:貯留係数,  $r_w$ :井戸半径(m), t:揚水時間(min)である。また $B_2$ はグラベルパック、ス クリーン孔などの線形井戸損失係数である。 $C_j$ は乱流域として考えられる係数であり、係数 $B_j$ , $C_j$ は次式(2)を用いて測定値から得られる。

$$S_{\rm w}/Q = B_{\rm j} + C_{\rm j}Q \tag{2}$$



図1 Jacob モデルによる井戸損失と段階揚水損失の関係



図2 揚水井戸の周囲にある水位観測孔模式平面図

段階揚水試験結果を非定常説理論の損失曲線と共に全 井戸損失 S<sub>w</sub>と揚水量 Qとの関係を Boonstra,J. and Kselik, R.A.L.の解説<sup>4)</sup>に基づいて図1に示す。現場測定値は一般 に図1の両対数軸上にプロットして,層流域と乱流域を表 わす2つの直線上の交点が限界揚水量とされる<sup>5)</sup>。

ここに Jacob モデルの全井戸損失量 *S*<sub>w</sub>を *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub>及び *S*<sub>3</sub>の 個別に図 1 に表わすことができるが, *S*<sub>2</sub>は現場測定値に含



図 3 Jacob 法による段階揚水試験結果から得られた Q(揚水量)と Sw(全井戸損失)/Qとの関係例<sup>4)</sup>

まれる損失となっている。しかし,著者らは,スクリーン 孔などの損失*S*2は開口率の異なるスクリーンがあるため, 本来,地層損失*S*1と分けるべきとして*S*2を後述する非線 形項に導入した。

非定常説理論の揚水モデルおいては、帯水層厚 h と単層 スクリーン長 L は等しく、完全貫入井戸として h は揚水井 戸の位置から半無限円状に平行である。つまり、図 2 に示 す揚水井戸から同心円上に水位観測孔を設けた場合は、揚 水に伴う水位低下量は一定となる。ところが、水位低下量 一定となる現場は僅かであり、半無限自然地盤における帯 水層の平行性は殆どない。したがって、非定常説理論の地 層水の損失曲線は段階揚水試験値より井戸損失が必ずし も下位にあるとは限らず、S<sub>2</sub>を線形損失とする根拠も希薄 である。

次に式(2)を用いて乱流域の現場測定値を図 3<sup>4</sup>に示す。 図 3 の直線の傾き  $C_j$ は、固有の井戸がその地下水盆下の 地下水の包蔵性を把握し得る係数として、傾きが大きいほ ど揚水量の増加に伴う地下水の消失が速いと言えるが、段 階揚水時に比湧出量  $Q/\Delta S_w (\Delta S_w は各段階揚水時の水位$  $低下量) に変化がない場合には <math>C_j$ が求まらないことにな る。また、全井戸損失は、スクリーン開口率の影響 <sup>6</sup>を受 けるため、その影響を  $B_2$ の線形損失としていることには 根拠がなく、さらに  $C_j$ の勾配が小さいときには、地層水 損失が乱流域にあるかどうかも分からない。

これに関して,酒井は,図3の縦軸切片*B*<sub>j</sub>に対応する 限界揚水量とは,これを超えると井戸損失が急に大きくな る揚水量のことで,過剰揚水あるいは非平衡の状態が発生 するということではないと述べている<sup>7)</sup>。酒井の研究を踏 まえても,Jacob式の*C*<sub>j</sub>は地層水の乱流域が理論的に示さ れたものではないと推察される。

式(1),(2)の非定常説モデルでは、下記のような施工井 戸では現場と理論との整合性がないため、実用的な水理定 数や設計揚水量を確定し難いと考えられる。

- ・帯水層が複層で多層スクリーンとなる井戸構造
- ・帯水層厚や基盤底深度が変化する場合
- ・不完全貫入井とする場合 など

以上に述べた非定常説の適用性を改善するため,実用的 な揚水モデルでの井戸損失式を次ぎに提案する。

#### 2.2 定常説に基づく実用モデル

著者らは、滋賀、兵庫などの地域地下水盆の調査研究として、計画用水量が満たされる深井戸の適正位置を電気・ 電磁探査及びプレボーリング調査などにより調べ、また揚 水量を試算するための水理定数も検討してきた。さらに 施工井戸で揚水試験を行い、帯水層を構成する地質条件と 揚水挙動との対応を考察した<sup>899</sup>。

ここで著者が提案する井戸損失式は,図4(a),(b)の実用 揚水モデルにおいて帯水層の水理地質特性,段階揚水試験 と井戸設計仕様などを用いて式(3)に示す。

$$S_{\rm w} = B_{\rm e}Q + C_{\rm e}Q^2 \tag{3}$$

ここに、 $S_1 = B_e$  *Q*、 $S_2 = C_e$  *Q*<sup>2</sup>に置き換えると、 $B_e$ :線 形井戸損失係数(day/m<sup>2</sup>)、 $C_e$ :非線形井戸損失係数(day<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>) である。すなわち、線形項は $B_e = \ln(R/r_w)/2\pi\mu kh$ の式で、*R*:

影響圈半径(m), r<sub>w</sub>:井戸半径(m), k:透水係数(m/day), h:帯水層厚(m), µ:透水量補正係数である。また,非線 形項は  $C_e = 0.2 \cdot B_e^2 / (\delta \cdot L)$ となる式で与えられ、 $\delta$ : スクリ ーン開口率, L:スクリーン長(m)である。式(3)右辺の B, は図 4(a), (b)に示す帯水層厚 h が自然地盤では一様でなく 変化するため、定常説の透水量係数 kh には µ の補正が必 要であると推察される。また、C。の式で右辺の 0.2 は、 スクリーン開口率の基準値として採用した.開口率δとス クリーン長Lは,井戸損失に及ぼす要因と考えられ,井戸 損失はδが大きいほど,Lが長いほど小さくなる<sup>8)</sup>。一方, Jacob モデルでは、B,の線形損失係数の要因としてスクリ ーン開口率を考えてはいるが、数式には導入していない。 式(3)は、影響圏半径 R一定の定常説において C。Q<sup>2</sup>の非線 形項を導入することによって, 揚水量 0と水位低下量(全 井戸損失)Swの関係が図5のように示される。すなわち, 式(1)の乱流域を表す非線形項 C<sub>i</sub> Q<sup>2</sup> は式(3)にはなく, Thiem-Dupuit の定常説を拡張して考えると,図5のJacob 式の非線形項は、図4(a)、(b)に示す影響半径 R'>R の領域 となる。

したがって,式(3)は R 一定で揚水量が漸増する過程に おいて地下水面の動水勾配iが次第に急となる仮定をした ものであり, R'>R が非定常説と対比される乱流域の指標 とした。



図 4(a) 著者の提案モデル I; 単層スクリーン不完全貫入井戸損失に関わる諸要因



図4(b) 著者の提案モデルII;多層スクリーン完全貫入井戸損失に関わる諸要因

なお,式(3)の原型は de Prony の式<sup>10)</sup>を引用したものであ り,式(4)に示す。定常説は式(4)の第1項目の線形微分よ り求められたものである。

$$i = \frac{A}{\alpha} (\alpha v + \beta v^2) \tag{4}$$

ここに, i:水路または管底の傾斜角の正弦, A:流れの 断面積,  $\omega$ :潤辺長, v:求める断面における平均流速, a,  $\beta$ :定数である。式(4)より地層水の流れにおいて動水勾配 iは流速 v 及び $v^2$ の関数で表されることから,式(3)の第 二項には $v^2$ に対応する  $Q^2$ の関数を導入した。

一般的に、図1や図5に示す層流域と乱流域の測定値 より両域の直線交点を限界揚水量 Q。とすること<sup>1)5)</sup>が、な されている。しかし、これらの図では Q。が明確に求まら ないことがある。測定値の全てが層流域や乱流域になる ときや乱流域において下がりかけた水位低下量が次の段 階揚水量で回復することがある。酒井はこの水位が回復 したときの交点を第二の交点として、限界揚水量として はならないと述べている <sup>7)</sup>。



図5揚水試験結果と実用モデルの井戸損失式との関係その1

一方,図5の縦軸を比湧出量 Q/ASwにして図6に示すと,式(3)の非線形曲線の曲率より,限界揚水量 Q。を求めることができ,後述する各現場のQ。を求める際に第二の交点があっても,これを無視することができる。

各現場の Q。は、非線形曲線の曲率を直線近似して、層 流域側の直線①と乱流域側の直線②の交点として求めた。



## 3. 地下水盆の地域特性と適正揚水量の設定

## 3.1 地形地質と深井戸位置・井戸構造の関係

全国の地域地下水盆で複数の井戸が分布する地形とし ては沖積平野, 洪積台地に大別され, 地下水涵養は流域降 水量や灌漑用水の浸透量から蒸発散量と流出量を除いた 水量から供給されている。ここでは, 地形地質条件の異な る滋賀県湖北の沖積平野下と兵庫県淡路島中部の洪積台 地下で行った深井戸調査結果からの地域特性より地下水 管理に必要な井戸損失式を導いた経緯について記述する。

図7には滋賀県湖北平野下の井戸分布を示す。当地域で は主に消雪用に2000m<sup>3</sup>/day 以上の地下水利用が行われて いて,他に工場,民家の小規模な揚水井戸もあり,地下水 管理は相互干渉を避けて全体の揚水量規制が不可欠であ る。図7の地下水盆は、山地丘陵を構成する白亜紀花崗岩 類Gr・二畳紀粘板岩 Pslと比高差200m下に分布する沖積 平野 a に約23haの面積を有するが、新設井戸候補WS-1 ~WS-3(1999年施工)の事前調査として垂直電気探査を 広域に行い、沖積平野の下位に洪積礫質土の帯水層分布が 予測される位置でプレボーリング調査を行ったところ、図 7のような地質区分となった。すなわち、深井戸が可能な 領域は、沖積表層下約10m以深の洪積砂礫層Dg(河床堆 積物層)に限られている。なお、崖錐・段丘層Trは細粒 分が比較的多くDg層と比べて11-ゲー低い透水性が得ら れ、井戸候補の位置には不適切と考えられた。

Dgの層厚は20~60m以上と変化し、また粘土層を複数



図7 滋賀県湖北平野下の井戸分布 8)12)

挟み均一性はなく, 琵琶湖に向かって厚く, WS-2, WS-3 位置では着岩した。従って, 井戸形式の構造は, 粘土層を 挟んだ多層スクリーン, 着岩に至る完全貫入井戸, 必要揚 水量に適した不完全貫入井戸が造られている。なお, WS-2 は WS-1 の影響圏内にあるため, 稼働に関しては制限する ことにした。

図8には淡路島中部洪積台地下の井戸分布を示す。当地 域の深井戸は農業用に500~1000m<sup>3</sup>/dayの地下水利用が行 われ,新設井戸 F-1(2004 年施工)は周辺の既設井戸 K-1 な どとの相互干渉を避ける位置とするため,帯水層と基盤岩 起伏の状態を調べるために電磁探査を広域に行った<sup>11)</sup>。

地下水盆は山地丘陵を構成する白亜紀花崗岩類 SGd・ TS と比高差 100m 下に分布する更新世洪積台地 tl・tm 及 び新第三紀洪積丘陵 Aa・As 下に約 300ha の面積を有する が,電磁探査の結果,地表下 500m までの比抵抗構造によ る地質断面図より,既設井戸の大半が,基盤岩凹部で断 層・撓曲構造に隣接していることが分かった。また帯水層 は Aa・As などの砂層と亀裂性の粘土層で不透水粘土層を 挟み,基盤岩周辺の断層・撓曲構造からの劣カ水の供給も 想定された。新設井戸 F-1 は,既設井戸 K-1 とは基盤岩 の起伏によって遮断されて異なる帯水層域であることが 分かった。この結果,F-1 は多層スクリーン・完全貫入井 戸となり,K-1 では多層スクリーン・不完全貫入井戸であ ることが比抵抗-地質断面図より把握できた。

以上より,これらの地域に分布する複数井戸では,非定 常説に基づく井戸モデルに適合しないが,実用的に非定常 説の井戸公式を用いて水理定数を求めると,設計上,過大 もしくは過小評価してしまう可能性は高いと考えられる。

そこで,著者らは実用井戸モデルを前図 4(a),4(b)に提起して実測値から水理定数の補正と開口率,スクリーン長



Fault(断層) **flexure**(撓曲)

図8 兵庫県淡路島中部洪積台地下の井戸分布 11)13)

などの井戸構造を考慮した井戸損失式を作成して,適正な 設計揚水量の設定を試みた。

#### 3.2 深井戸構造の諸元と段階揚水試験結果 <sup>8)1)</sup>

ここでは滋賀湖北低地と兵庫淡路島台地の 2 地域を代 表する深井戸調査事例を掲げ,深井戸構造の諸元及び段階 揚水試験結果の一覧を,それぞれ表1,2に示す。

深井戸構造は表1のとおり,各井戸では複数の帯水層で 揚水可能とする場合,スクリーンを複層に設け,また井戸 の先端が基盤に達する完全貫入井戸ないし基盤に至らな い不完全貫入井戸の構造となっている。段階揚水試験結果 は表2のとおり,各段階の一定揚水量Q(m<sup>3</sup>/day)に対し, 水位低下量⊿S<sub>w</sub>(m)は,初期水位と各段階の最終測定値と の水位差を採用した。これらの詳細データは図 9(a),(b) に示すとおりであり,*Q*-S<sub>w</sub>の関係を前図1のようにプロ ットしたとき,必ずしも結果が限界揚水量を見いだせると は限らない。つまり,両対数軸で2つの直線(一般に層流 域と乱流域を示す直線)が明瞭に交差することなく,あた かも1つの直線になることがある。この理由は先に述べた ように,段階揚水域が全て層流域,または全て乱流域とな る場合や*Q*-S<sub>w</sub>の関係が正確に層流域と乱流域に区分で きる結果とならないと考えられる。

すなわち,  $Q-S_w$ の関係でなく,比湧出量  $Q/\Delta S_w - Q$ との関係により,段階揚水時に  $Q/\Delta S_w$ の変化が微量のときを層流域,そして  $Q/\Delta S_w$ が次第に低下する領域を乱流域と考えるのが妥当である。しかし,層流域とは,井戸理論上で地層水損失が定義されるが,層流域において井戸構造による損失があって,乱流域と区別する必要がある。

井戸	井戸構造	井戸長	井戸施工位置			
名称	刀刀帶起	H (m)	기/ 旭工匠匠			
WS 1	不完全貫入井·	76				
w 5-1	単層スクリーン	70				
WS-2	完全貫入井・	55	滋賀県湖北平野			
W 3-2	複層スクリーン	55				
WS-3	完全貫入井・	100				
W 3-5	複層スクリーン	100				
K-1	不完全貫入井・	102				
<b>K</b> -1	複層スクリーン	102	兵庫県淡路島中部			
F-1	完全貫入井・	142	台地			
	複層スクリーン	142				

表1 深井戸構造の諸元

井戸	揚水量	段階揚水試験							
名称	水位低下量	1段階	2 段階	3 段階	4 段階	5 段階	6段階	7 段階	开户施丄位置
WS-1	Q(m <sup>3</sup> /day)	871	1.734	2,592	3,485	4,333	_	_	
	$\Delta S_w(m)$	0.8	1.58	2.46	3.23	4.63	-	_	
WS-2	$Q(m^3/day)$	233	464	696	922	1,156	-	-	滋賀県湖北平野
	$\Delta S_w(m)$	0.74	1.85	3.42	5.28	7.03	-	-	
WS-3	$Q(m^3/day)$	651	1,303	1,922	2,612	3,217	-	-	
	$\Delta S_w(m)$	0.53	1.07	1.73	2.05	2.71	-	_	
K-1	$Q(m^3/day)$	219	432	651	804	864	-	-	
	$\Delta S_w(m)$	1.70	3.70	7.41	12.21	14.30	-	-	兵庫県淡路島
F-1	$Q(m^3/day)$	219	439	655	871	1,090	1,318	1,506	中部台地
	$\Delta S_w(m)$	1.31	2.75	4.55	6.18	7.95	10.10	11.96	

表 2 段階揚水試験結果一覧



図 9(a) 滋賀県湖北平野下の段階揚水試験結果



図 9(b) 淡路島中部洪積台地下の段階揚水試験結果

そこで著者は先に示した線形損失係数 B<sub>e</sub>, スクリーン 長 L,開口率δなどを用いた非線形項を井戸損失式に設け, 井戸損失式からの層流域と実測値が式から極端に外れる 乱流域を実測値に基づいて検証した。

### 3.3 井戸損失式を用いた地下水性状<sup>8)9)</sup>

先の段階揚水試験結果から、 $Q/ riangle S_w - Q$ の関係を両対数 にとり、プレボーリング、電磁探査に基づく地質構成、孔 内現場透水試験及び既存資料の統計処理などから設定し た透水係数 k, 影響圏半径 R, 井戸半径 r<sub>w</sub>, 帯水層厚 h, 透水量補正係数 µ より線形井戸損失係数 B。を求め、さら にスクリーン長 L,開口率 δ より非線形井戸損失係数 C。 を求めて、式(3)から各井戸の損失式を作成し、実測値と 併記して図 10(a)~10(e)に示す。また各井戸損失式を導い た諸定数と井戸損失曲線の曲率付近の限界揚水量 Q.(直線 近似法の交点)を表3にまとめた。表3より,透水係数は 湖北平野下の洪積砂礫層で 10<sup>-2</sup>cm/sec, 淡路島洪積台地下 の大阪層群では10<sup>-3</sup>cm/secのオーダーで地域別に1オーダ ーの差があり、その補正係数をみると洪積砂礫層でμ=0.6 ~1.6, 大阪層群では µ=2.15~4 となり, 帯水層厚の変化に よって透水量係数 µkh に及ぼす影響が大きい。つまり, µ<1 のときは井戸周辺では帯水層厚が減じ、一方 µ>1 のときは 不完全貫入井戸のため帯水層厚が増え,また完全貫入井戸

の場合でも基盤岩周辺の地質構造からの劣カ水の供給が あると考えられる。

図 10(d)以外は新設時に段階揚水試験を実施したことか ら, 井戸効率 E<sub>w</sub>=1.0 とし, 図 10(d)では築 37 年を経てお り, 施工時の適正揚水量 1,150 m<sup>3</sup>/day にシミュレートとし た損失曲線と比べて井戸効率 Ew が下がっている。すなわ ち,築37年後の段階揚水試験の実測値は、Ew=1.0の損失 曲線よりも下方に離れ, Ew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損失曲線を移動すると, Ew=0.8 となり、本井戸の目詰まりなどの劣化状況が把握 できると考えられる。次に図 10(a)と 10(c)の損失曲線と実 測値に注目すると, 揚水量の漸増過程において比湧出量 Q /∠S<sub>w</sub>が一旦低下してから,再び上昇する傾向が見られる。 これは,先に述べた第二の交点を示し,揚水過程で帯水層 内に間隙の変化、すなわちパイピング現象が生じているこ とが想定され,限界揚水量は帯水層を乱さないために,損 失曲線の曲率近傍に求めることが重要と言える。第二の交 点を限界揚水量として, 揚水稼働時に砂の上昇事例があり, 著者らもこれを確認したことがある。よって, Jacob モデ ルでは第二の交点以降を乱流域として,第二の交点を限界 揚水量として誤認する可能性が高いと言える。

表3 井戸損失式の諸定数と設計揚水量一覧

井戸 名称	透水係数	影響圈半径	帯 水 層の スクリーン長	スクリーンの 開 口 率	透水量 補正係数	線形井戸 損失係数	非線形井戸 損失係数	限界揚水量
	k  (cm/sec)	<i>R</i> (m)	<i>L</i> (m)	δ	μ	$B_{\rm e}({\rm day/m^2})$	$C_{\rm e}({\rm day^2/m^5})$	$Q_{\rm c} ({\rm m}^3/{\rm day})$
WS-1	3.72×10 <sup>-2</sup>	500	28	0.20	1.6	8.52×10 <sup>-4</sup>	2.59×10 <sup>-8</sup>	1,545
WS-2	7.57×10 <sup>-2</sup>	500	12	0.20	0.6	2.80×10 <sup>-3</sup>	6.55×10 <sup>-7</sup>	248
WS-3	4.27×10 <sup>-2</sup>	500	30	0.20	1.5	7.63×10 <sup>-4</sup>	1.94×10 <sup>-8</sup>	1,577
K-1	1.71×10 <sup>-3</sup>	500	49	0.04	4.0	5.20×10 <sup>-3</sup>	5.39×10 <sup>-7</sup>	353
F-1	2.37×10 <sup>-3</sup>	300	55	0.25	2.15	5.80×10 <sup>-3</sup>	3.22×10 <sup>-6</sup>	380



図 10(a) 井戸 WS-1 の段階揚水試験結果



図 10(b) 井戸 WS-2 の段階揚水試験結果





**e** (-----

図 10(e) 井戸 F-1 の段階揚水試験結果

以上のように地下水盆下の地質構成や井戸形式が異な る揚水過程について,著者が提案した式(3)を用いた井戸 損失式で表すことができ,実測値が層流域か乱流域かを検 証することが図  $10(a) \sim 10(e)$ より分かる。また井戸損失曲 線(以下,損失曲線と呼ぶ)の変化点(曲率)は設計揚水量 (限界揚水量)として最大値を表すが,地域規制によって は安全率を考慮して適正な揚水量を定めることもできる。 さらに井戸損失式を用いて,築後の井戸性能を井戸効率  $E_w$ で示すことができる。なお,損失曲線は透水量補正係数  $\mu$ によって曲線の上下移動は可能であるが,左右への移動 はないため,乱流域の測定値のみでも限界揚水量  $Q_c$ を求 めることができる。

## 4.結 論

本研究から得られた主な内容と知見を以下にまとめる。



図 10(d) 井戸 K-1 の段階揚水試験結果

(1)地域地下水盆下の新設井戸は、広域に物理探査や既存 の資料整理などの事前調査を経て、既設井戸との相互干渉 を避け、またプレボーリング調査によって、計画揚水量を 確保し易い井戸位置の選定を行うことが重要である。その 結果から帯水層の地質構成に応じた最適コストで井戸形 式を決定することが必要である。

(2) 井戸形式によって著者が提案した井戸損失式は, Thiem-Dupuit の定常説を拡張したものである。この式の原 型は de Prony の式にあるため,定常説の線形項に非線形項 を井戸構造と揚水試験の実測値から求めた。これより段階 揚水測定値が層流域か乱流域かの対応を明らかにするこ とができた。また,損失曲線は乱流域の測定値のみでも限 界揚水量 Q.を求めることができ,井戸効率 Ewを求めるこ とも可能である。

(3)井戸損失式には, 非定常説による Jacob モデルの提案式 があるが,これは帯水層が単層で完全貫入井戸に適用する 式であり,実用的に非定常説の井戸公式を用いて水理定数 を求めると,設計上,過大もしくは過小評価してしまう可 能性は高いと推察される。

以上のように、揚水モデルと井戸損失式の提案によって、 新設井戸の安全設計や既設の揚水管理に適用性があり、地 域の資源としての水及び水環境保全に資することができ ると考えられる。

## 5. おわりに

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防止し,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であ

## る。

今後は地域毎に帯水層に関する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,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,地域の地下 水のモニタリングシステムを構築したいと考える。

# 参考文献

- さく井・改修工事標準歩掛資料(平成20年度),社)全国さく井 協会,2008.
- 地下水地盤環境に関する研究協議会:地下水地盤環境に関するシンポジウム2008-地盤環境の保全-(発表論文集), pp.123, 2008.
- Jacob, C.E. : Drawdown test to determine effective radius of artesian well. Transactions, American Society of Civil Engineers, 112(2312) : pp.1047-pp.1070, 1947.
- Boonstra, J. and Kselik, R.A.L.: SATEM 2002: Software for Aquifer Test Evaluation, ILRI publication 57, pp.56-pp.60, 2001.

- 5) 村下敏夫: 井戸の適正揚水量ということについて, 地下水と 井戸とポンプ (1990から"地下水技術"に改名), Vol.11, No.10, pp.9-pp.11, 1969.
- 6) 地下水ハンドブック(改訂),建設産業調査会, pp.95, 1998.
- 酒井軍治郎:井戸の揚水テストと井戸定数の計算-誤解されている考え方とやり方-(3),地下水と井戸とポンプ(同上), Vol.13, No.9, pp.6, 1971.
- 奥野日出: 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, 地盤の環境・計測に関するシンポジウム2008(論文 集),社)地盤工学会関西支部, pp.107-pp.114, 2008.
- 奥野日出,小山修平: Thiem-Dupuit の平衡説を用いた非線形井 戸損失式の提案」,社)農業農村工学会全国大会講演,pp.414pp.415, 2009.
- 10) 最上武雄編著 赤井浩一著:土質力学,技報堂出版, pp.199, 1982.
- 11) 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・計測に関するシンポジウム 2007 (論文集),社) 地盤工学会関西支部 ,pp.82-pp.87, 2007.
- 12) 財)滋賀県自然保護財団:滋賀の自然(分冊)地形地質編-1/10万 滋賀県地質図,関西出版発行,1980.
- 高橋浩,寒川旭,水野清秀,服部仁:洲本地域の地質,地域 地質研究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所,1992.

(2009.11.30 受付)

# New approach for pumped water models and well loss euation for groundwater area control

# Hizuru OKUNO<sup>1</sup> and Shuhei KOYAMA<sup>2</sup>

- 1 Asuka Soil Corner Co., Ltd.
- 2 Graduate School of Life & Environmental Sciences, Osaka Prefecture University

# Abstract

According to the Japanese deep-well database maintained by the Land, Infrastructure and Transportation Ministry, many deep wells are partially penetrated, featuring multilayered screens as a result of the geological features of the This is a serious problem not only for the effective use of underground water as a water resource but also for the conservation of the water environment. As part of well design in such aquifers, it is necessary to consider the cost of construction and estimate the design pumping discharge as accurately as possible. However, it is difficult to apply general well theory accurately to the calculation of the hydraulic constant and to pumping groundwater control for partially penetrating wells. Inappropriately designed pumping discharges often result. Therefore designs based on such calculations tend to lead to a drying up of the well through excessive groundwater pumping. Furthermore, the damage caused by subsidence of the ground because of the lowering of the groundwater level also increases. In this study, we propose a practical well loss estimation method that includes consideration of hydraulic geological features of an aquifer using pre-boring, step-drawndown testing and Thime-Dupuit's euilibrium theory to estimate safe designs of pumping discharges. This is a method different from Jacob's method based on non-euilibrium theory. We examine the effectiveness of our proposed method, and conclude that it is possible to manage groundwater in aquifers with partially penetrating wells using the new method. Furthermore, we elucidate that it is possible to apply the new method to groundwater in any geological structure.

Key words: groundwater control, pumped water model, well loss, area characteristics, hydrological geology